



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Ingeniería

Centro Interamericano de Recursos del Agua



**Evaluación de la hidrodinámica de una mina
a cielo abierto mediante un modelo de
simulación, utilizando diversos enfoques de
modelación basados en los atributos
geológicos del acuífero**

TESIS

Que para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA

M. en C. José Enrique Herrera Salazar

Director

Dr. Jaime Garfias Soliz



Toluca, Estado de México

Febrero de 2014

AGRADECIMIENTOS

Principalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por haberme otorgado el apoyo necesario para estudiar este posgrado.

A GoldCorp-Minera Peñasquito, pues este trabajo no habría sido posible sin el gran soporte que me proporcionaron. Especialmente al Ing. Britt Buhl quien por años me estuvo apoyando incondicionalmente para que yo pudiera completar esta fase de mi desarrollo profesional. Muchas gracias Britt.

Al Centro Interamericano de Recursos del Agua, de la Universidad del Estado de México, por haberme aceptado en el posgrado y haberme apoyado para obtener este logro.

A mi director de tesis, el Dr. Jaime Garfias, quien de forma sincera y dedicada se esforzó para obtener lo mejor de mí y convertirme en investigador.

A mis sinodales, los doctores Humberto Salinas, Vicenta Esteller, Pedro Morales, Thierry Calmus y Javier Salas. Gracias por sus valiosas aportaciones para mejorar este trabajo y por su paciencia durante estos años.

A Ivania y Juanita. Gracias por ayudarme en tantas ocasiones. Estoy en deuda con ustedes.

A la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, por su soporte al inicio de estos estudios.

A mis amigos y compañeros de trabajo, Ricardo Cañedo, Pablo Bálsamo, Abel Pérez, Héctor Escalante, Salvador Bautista, Eduardo Rico, Karla Santoyo quienes pacientemente escucharon mis ideas y me motivaron en los momentos difíciles.

A mi colega geólogo, Tito Montaña por su gran incansable disposición para compartir ideas y reflexiones geológicas conmigo.

A mi madre y hermanos quienes siempre me han apoyado de forma incondicional en todas las etapas de mi vida. A mi gemelo Manuel Ernesto, quien me ayudó con la edición final de este trabajo.

A mi nueva familia, quienes cuidaron de mi esposa y mi hija mientras yo estaba lejos.

DEDICACIÓN

A mi amada esposa Marielos, por su comprensión y sacrificio para que yo pudiera cumplir con este objetivo. Gracias por estar siempre a mi lado dándome soporte y consuelo en los momentos difíciles. Puedo decir que esta tesis lleva mucho de ti.

A mis tres amados hijos José, Jesús y Anael, quienes con dulce inocencia y bondad comprendieron mi necesidad de estar lejos de ellos para poder terminar este trabajo. Espero que estén orgullosos de su padre y poder compensarles el tiempo que no pude dedicarles en los últimos años.

RESUMEN

La hidrodinámica de los acuíferos fracturados se encuentra sujeta a la alta heterogeneidad hidráulica dominada por fallas y fracturas y su interacción con la matriz rocosa, cuya caracterización representa un alto grado de complejidad hidrogeológica. La comprensión y modelación de esta heterogeneidad se ha vuelto de vital importancia para los sectores humanos que interactúan con estos acuíferos, siendo uno de los más importantes el sector minero, cuya necesidad primordial es el desagüe de las zonas mineralizadas para permitir el acceso a los minerales de mena.

Dada la gran cantidad de información geológica derivada de la etapa de exploración de la mina que se encuentra en el área de estudio, se realizó un análisis multivariable que toma como base la Designación de la Calidad de la Roca, RQD (Rock Quality Designation por sus siglas en inglés) y su relación con el caudal producido por 37 pozos de desagüe, el cual se presenta como una herramienta para la caracterización hidrogeológica de un acuífero fracturado. Se construyó un modelo sólido con los datos RQD utilizando tres tamaños diferentes para cada celda de la cuadrícula y cuatro métodos de interpolación, donde la cuadrícula más pequeña y el método de ponderación inversa a la distancia en un medio anisotrópico presentaron los mejores resultados. El modelo sólido RQD resultante se utilizó para localizar 22 pozos piloto, en los que se realizó la prueba de *air-lift* para obtener una evaluación cualitativa de su utilidad. Los resultados mostraron una importante relación entre el rendimiento de los pozos, la litología y la alteración de la roca, pero también se encontró que algunas fracturas o fallas, que no se pueden detectar claramente por el RQD, juegan un papel muy importante en la hidrodinámica del acuífero, de modo que la caracterización del acuífero derivó en la obtención de dos dominios hidroestructurales: matriz fracturada y fallamiento regional. Esto mostró que es necesario tener en cuenta todos los factores disponibles que pueden ayudar a identificar el comportamiento hidrodinámico del acuífero para lograr un modelo conceptual representativo.

Posteriormente, se establecieron relaciones entre los atributos geológicos de las unidades rocosas y sus características hidráulicas, controladas mediante ecuaciones exponenciales empíricas. Asimismo, mediante una analogía con un acuífero estratificado y con el uso de ecuaciones básicas en hidrogeología y de la conductividad hidráulica de los pozos de desagüe, se estimaron las propiedades hidráulicas de las zonas de falla, las cuales mostraron un papel importante en la hidrodinámica del acuífero. Estas ecuaciones permitieron integrar un modelo de simulación en tres dimensiones con el apoyo del software Visual ModFlow, aplicado mediante diferentes enfoques de modelación que varían gradualmente su grado de complejidad con respecto a la distribución de la conductividad hidráulica: Medio Poroso Equivalente, Medio Poroso Equivalente Parametrizado y Medio dual-continuo. El primer enfoque constituye la forma común de modelación, donde se definen unidades hidrogeológicas con características hidráulicas propias, a diferencia del segundo en el cual se aplicaron las ecuaciones exponenciales en función de los atributos geológicos de cada celda del modelo para asignarle un valor de conductividad hidráulica único. El tercer enfoque incluyó la modelación de las zonas de falla, lo cual requirió del refinamiento de la malla para permitir la adecuada integración de la geometría de cada una de ellas.

Los resultados mostraron de forma general que es posible obtener calibraciones aceptables en los tres enfoques modelados, lo cual resalta la importancia de la definición de un modelo conceptual adecuado. No obstante, el tercer enfoque es el que pudo representar de manera más apropiadas la hidrodinámica del acuífero, sirviendo como base para el desarrollo de un plan de desagüe para el corto y largo plazo. Este plan mostró que con la adición de diez pozos de desagüe es factible evitar el paso del agua subterránea al área de operaciones de acuerdo con el plan de minado, lo cual permitirá el avance en la excavación del tajo, reduciendo los costos operativos y permitiendo el acceso seguro a los trabajadores de la mina.

ABSTRACT

Hydrodynamics of fractured aquifers depends on the high hydraulic heterogeneity which is mainly controlled by faults, fractures and its interactions with the rock matrix, which characterization represents a high level of hydrogeological complexity. Understanding and modeling this heterogeneity has become vital for human sectors that interact with fractured aquifers, being one of the most important the mining sector, whose primary needs is the dewatering of the mineralized zones to allow access to the ore minerals.

Given the large amount of geological information derived from the exploration stage of the mine that is in the study area, a multivariate analysis based on the Rock Quality Designation (RQD) and its relationship to the flow produced by 37 dewatering wells, which is presented as a tool for hydrogeological characterization of a fractured aquifer. A solid model was constructed with the RQD data using three sizes for each grid cell and four interpolation methods. The inverse distance method with a small grid gives the best results. The resulting RQD solid model was used to locate 22 pilot holes, on which an air-lift test was performed as a qualitative assessment of their usefulness. The results showed a lower water production (1.8 l/s) in shale that has low alteration, whereas in highly altered shale, breccias, and intrusive rock, the flow rate was 3.9 l/s. This implies an important relationship between the pilot-hole performance, the lithology, and the rock alteration, but it was also found that some fractures or faults, which cannot be detected clearly by the RQD, play an important role in the hydrodynamics of the aquifer. Finally, the initial characterization of the aquifer concluded with the definition of two hydrostructural domains: fractured matrix and regional faulted. This shows that it is necessary to consider all available factors that can help to identify the hydrodynamic behavior of the aquifer to achieve representative hydrogeological models.

Thereafter, relationships were established between the geological features of the rock units and their hydraulic characteristics, controlled by empirical exponential equations. Also, analogically with a stratified aquifer using basic hydrogeology equations and the hydraulic conductivity of the dewatering wells, the hydraulic properties of the fault zones were estimated. Those fault zones showed a significant influence in the hydrodynamic of the aquifer. The equations were used to integrate a 3D simulation model with the support of Visual MODFLOW, implemented by different modeling approaches which gradually vary their degree of complexity with respect to the distribution of hydraulic conductivity: Equivalent Porous Medium, Parameterized Equivalent Porous Medium and dual-continuum. The first approach is a common way of modeling, where hydrogeological units with own hydraulic characteristics are defined, unlike the second approach where exponential equations were applied according to the geological features of each model cell for assigning a unique value of hydraulic conductivity at each one. The third approach involved modeling of fault zones, which required the mesh refinement to allow proper integration of the geometry of each of those features.

The results showed that it is generally possible to obtain acceptable calibrations in the three approaches modeled, which highlights the importance of defining an appropriate conceptual model. However, the third approach provide the most appropriate way to represent the hydrodynamics of the aquifer, serving as a basis for developing a dewatering plan for the short and long term. This plan which showed that with the addition of ten dewatering wells is feasible to prevent the passage of ground water to the area of operations in accordance with the mine plan, which will allow progress in the excavation pit, reducing operating costs and allowing secure access to the miners.

ÍNDICE

Resumen	iii
Abstract	v
Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xiii

Capítulo I

Introducción a la tesis	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Organización de la tesis.....	5
1.4 Referencias.....	7

Capítulo II

Caracterización de un acuífero fracturado mediante sus atributos geológicos, relacionado con el desagüe de una mina a cielo abierto	9
2.1 Introducción.....	9
2.2 Marco hidrogeológico.....	12
2.2.1 Características geográficas del área de estudio.....	12
2.2.2 Marco geológico.....	14
2.2.3 Hidrogeología.....	19
2.3 Metodología.....	20

2.3.1	Análisis de datos.....	20
2.3.2	Obtención de los atributos geológicos.....	22
2.3.3	Estimación de propiedades hidráulicas	22
2.3.4	Construcción del modelo sólido	23
2.4	Resultados y discusión	28
2.4.1	Obtención de dominios hidroestructurales	28
2.4.2	Aplicación el modelo optimizado.....	33
2.4.3	Análisis de las propiedades hidráulicas.....	33
2.4.4	Resultados del modelo sólido de RQD.....	36
2.4.5	Análisis de los pozos piloto perforados.....	38
2.4.6	Integración de atributos geológicos.....	40
2.4.7	Potencial hidráulico relacionado a los atributos geológicos.....	41
2.4.8	Modelo hidrogeológico conceptual	47
2.5	Conclusiones	49
2.4	Referencias.....	50

Capítulo III

	Obtención de conductividad hidráulica en función de los atributos geológicos de un acuífero fracturado	53
3.1	Introducción	53
3.2	Metodología	54
3.2.1	Conductividad hidráulica para el domino matriz fracturada	54
3.2.2	Conductividad hidráulica para el dominio fallamiento regional	58
3.3	Resultados	59
3.3.1	Resultados de los modelos sólidos	59
3.3.2	Ecuaciones de conductividad hidráulica para matriz fracturada	62
3.3.3	Conductividad hidráulica de las zonas de falla	76
3.4	Discusión.....	78
3.4.1	Valores extremos de RQD.....	78
3.4.2	Confiabilidad de los modelos sólidos.....	78
3.5	Conclusiones	79
3.4	Referencias.....	81

Capítulo IV

Modelo matemático de un acuífero fracturado aplicando diferentes enfoque de modelación, aplicado al desagüe de una mina a cielo abierto.....	82
4.1 Introducción	82
4.1.1 Descripción general del área de modelación.....	82
4.1.2 Funcionamiento hidrogeológico del área del modelo	84
4.1.3 Enfoques de modelación	90
4.2 Metodología	91
4.2.1 Análisis de datos de entrada.....	91
4.2.2 Enfoques de modelación	92
4.2.3 Modelo matemático.....	99
4.3 Propiedades hidráulicas del acuífero.....	105
4.3.1 Balance hidrometeorológico	105
4.3.2 Condiciones de frontera	108
4.3.3 Simulaciones de flujo subterráneo	111
4.4 Resultados	118
4.4.1 Sensibilidad de la recarga.....	118
4.4.2 Enfoque 1: Medio poroso equivalente.....	119
4.4.3 Enfoque 2: Medio poroso equivalente parametrizado.....	130
4.4.4 Enfoque 3: Medio dual-continuo.....	140
4.4.5 Calibración con respecto al nivel de agua en el tajo	147
4.4.6 Plan de desagüe a largo plazo	151
4.5 Discusión.....	157
4.5.1 Comparación entre enfoques de modelación.....	157
4.5.2 Confiabilidad del plan de desagüe a largo plazo.....	160
4.5.3 Confiabilidad de los modelos.....	161
4.6 Conclusiones	162
4.7 Referencias.....	164

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones generales	166
5.1 Conclusiones generales	166
5.2 Recomendaciones.....	169
Apéndice A Datos de bombeo utilizados para la modelación.....	170
Apéndice B Datos de calibración	174
Apéndice C Artículo publicado.....	180

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Datos generales de los 37 pozos de desagüe correlacionados con su valor de RQD promedio y litología y alteración predominantes. Algunos pozos fueron eliminados para permitir el avance en la excavación del tajo y otros fueron abandonados debido a su baja productividad, de modo que actualmente se utilizan como pozos de observación	24
Tabla 2.2 Atributos geológicos y resultados de las pruebas de aire a presión (air-lift) en los pozos piloto localizados mediante el modelo sólido de RQD optimizado	34
Tabla 2.3 Datos hidráulicos de los 37 pozos de desagüe y métodos de interpretación utilizados.....	35
Tabla 2.4 Comparación entre los métodos de interpolación utilizados para crear el modelo sólido de RQD, considerando los dos dominios hidrogeológicos identificados. El tamaño de malla utilizado para esta evaluación fue la más fina (50x50x10 m)	38
Tabla 2.5 Rango de valores utilizados en la interpolación de los modelos sólidos para cada atributo geológico y su significado.	42
Tabla 3.1 Valores extremos de conductividad hidráulica utilizados como apoyo en la definición de las ecuaciones para obtención de la conductividad hidráulica para cada celda del modelo matemático en función de sus atributos geológicos, aplicada a pozos pertenecientes al dominio matriz fracturada. Para fines prácticos de nomenclatura, se incluye una abreviatura para cada grupo.	56
Tabla 3.2 Representación cuantitativa de RQD, litología y alteración utilizados en la interpolación para obtener los modelos sólidos.	59
Tabla 3.3 Valores representativos de RQD, litología y alteración para cada pozo, obtenidos a partir de los modelos sólidos.....	61
Tabla 3.4 Resultados del proceso de calibración para encontrar el rango adecuado para la clasificación de los pozos en los dos dominios hidroestructurales. Se seleccionó el rango de -1.1×10^{-6} a 1.1×10^{-6} m/s, pues al ampliarlo se empieza a perder la correlación.....	70
Tabla 3.5 Ecuaciones de $K = f(RQD, litología, alteración)$ a utilizar para la definición de la conductividad hidráulica para cada celda el modelo matemático, de acuerdo con el rango de tolerancia de residual seleccionado ($\pm 1.10 \times 10^{-6}$).....	70
Tabla 3.6 Comparación entre valores de conductividad hidráulica de los 24 pozos correspondientes con el dominio de matriz fracturada, obtenidos a partir de la ecuación general para este dominio y de cada ecuación definida con base en el resto de atributos geológicos. Se observa que el porcentaje de variación entre el valor de conductividad hidráulica real y calculado disminuye notablemente al definir la ecuación con base en la litología y alteración.....	75

Tabla 3.7 Conductividad hidráulica real y estimada para cada pozo, de acuerdo con sus atributos geológicos, utilizados para la obtención de las ecuaciones de $K = f(RQD)$. Los valores de K_{matriz} se estimaron a partir de las ecuaciones obtenidas para el rango de valores seleccionado para el modelo matemático, y K_f mediante la aplicación de la ecuación (4).....	77
Tabla 4.1 Unidades hidrogeológicas para el primer escenario de modelación.....	93
Tabla 4.2 Bombeo simulado para los años del 2014 al 2022, en metros cúbicos por día ($m^3/día$). Los volúmenes corresponden con el mes de enero de cada año. Los pozos del DW49 al DW58 integran el plan de desagüe a largo plazo, entrando cinco en operación en el 2014 y cinco en el 2018.....	104
Tabla 4.3 Volumen de bombeo para los tres periodos de estrés modelados. Durante el primer periodo el bombeo fue enfocado hacia el tajo, mientras que en los siguientes el bombeo fue más intenso en sus alrededores.....	108
Tabla 4.4 Evolución anual de los pozos de observación utilizados para la definición de la carga hidráulica en las celdas de carga constante	110
Tabla 4.5 Valores iniciales utilizados en los grupos de celdas de carga constante.....	110
Tabla 4.6 Rangos de conductividad hidráulica utilizados para la calibración del modelo en cada unidad hidrogeológica y valores de conductividad calibrada.....	111
Tabla 4.7 Valores de parámetros de almacenamiento calibrados en el modelo en cada unidad hidrogeológica y valores obtenidos de bibliografía	113
Tabla 4.8 Valores de parámetros de almacenamiento calibrados en el modelo en cada unidad hidrogeológica y valores obtenidos de bibliografía para el enfoque de modelación 2.....	115
Tabla 4.9 Zonas de falla modeladas asociadas a cada pozo perteneciente al dominio de fallamiento regional. Se incluye el valor de conductividad hidráulica inicial y el valor final después de la calibración	116
Tabla 4.10 Valores de parámetros de almacenamiento calibrados en el modelo en cada unidad hidrogeológica y valores obtenidos de bibliografía para el enfoque de modelación 3.....	117
Tabla 4.11 Sensibilidad del acuífero a la recarga, tomando como base el enfoque de modelación 2 (Medio Poroso Equivalente Parametrizado). Los resultados corresponden al valor del RMS Normalizado (%)......	118
Tabla 4.12 Elevación del fondo del tajo de acuerdo con el plan actual de minado. Se incluyen también los resultados de la modelación considerando la adición de cinco o diez pozos de desagüe.....	151
Tabla 4.13 Localización, y condiciones de modelación utilizadas para en la adición de los diez pozos de desagüe propuestos para el plan a largo plazo. Las coordenadas son en sistema NAD27, Zona 14.....	155
Tabla 4.14 Resultados obtenidos en la modelación de los tres enfoques	157
Tabla 4.15 Comparación de ventajas y desventajas entre los enfoques de modelación utilizados ..	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Zonas con alto y bajo RQD en barrenos de exploración geológica. a Los tramos de barreno donde la mayoría de las piezas de roca son mayores que 10 cm se consideran de alto RQD. b Los tramos donde la mayoría de los fragmentos recuperados son menores que 10 cm, se consideran de bajo RQD.	11
Figura 2.2 Localización del área de estudio en el estado de Zacatecas, México. Se incluyen las curvas de elevación topográfica, así como las principales corrientes superficiales, mostrando la forma de la subcuenca del valle de Mazapil.....	13
Figura 2.3 Mapa geológico del área de estudio (SGM 2004a; SGM 2004b).....	17
Figura 2.4 Columna estratigráfica del área de estudio (SGM 2004a; SGM 2004b)..	18
Figura 2.5 Localización de los pozos de desagüe utilizados para optimizar el modelo sólido de RQD. También se muestran los pozos piloto construidos para probar su aplicación. En paréntesis se indica el caudal inicial de cada pozo de desagüe, así como el caudal obtenido en la prueba de aire a presión en los pozos piloto. Además, se indica el dominio al cual pertenece cada pozo	25
Figura 2.6 Diagrama de flujo que muestra el proceso de modelación realizado para la obtención del modelo sólido de RQD: a Generación de la base de datos de RQD; b definición del tamaño de celda; c selección del método de interpolación e interpolación; d obtención del modelo sólido y extracción de valores de RQD por pozo; e comparación entre los resultados del modelo sólido en cada pozo con respecto a su conductividad hidráulica; f definición del modelo sólido de RQD optimizado. Este proceso fue repetido de a hasta e , utilizando tres tamaños de celda distintos y cuatro métodos de interpolación	26
Figura 2.7 Distribución de los valores RQD del modelo sólido obtenido, en el corte horizontal correspondiente con la elevación 1800 msnm. La escala de color muestra los valores en porcentaje de RQD en intervalos de 10%, variando desde 0 (lo cual es asociable con una conductividad hidráulica alta) a 100% (asociado con una conductividad hidráulica baja). En la leyenda, 0-10 significa desde 0 hasta menos que 10. Además, se incluye la ubicación de los barrenos utilizados para la obtención del modelo, así como la dirección de los que son inclinados .	29
Figura 2.8 Correlación entre los valores de <i>RQD promedio</i> y la conductividad hidráulica de cada pozo (numerado) con respecto a los tres tamaños de malla utilizados, calculados para el área de estudio completa sin disgregar por grupos. Los tamaños de malla utilizados son: a 250x250x50 m, b 100x100x20 m, c 50x50x10 m. Se muestra una correlación muy escasa, lo que a la vez demuestra que el tamaño de la malla no es el principal factor que afecta a la correlación.....	31
Figura 2.9 Evolución hidrodinámica de los pozos activos de Junio de 2011 a Diciembre de 2012 en el área de estudio. Se observa la presencia de dos dominios, los cuales se asume que corresponden con un dominio de matriz fracturada (<i>dominio 1</i>) y a un dominio de fallamiento regional (<i>dominio 2</i>), cuyo límite es representado de forma general por la línea segmentada color rojo. El caudal de cada pozo se muestra entre paréntesis.....	32

Figura 2.10 a-f Relación entre el RQD promedio obtenido del modelo y la conductividad hidráulica de cada pozo (numerado) para los tres diferentes tamaños de celda de cada malla, considerando dos dominios hidrogeológicos. <i>Panel izquierdo: dominio 1, panel derecho: dominio 2</i>	37
Figura 2.11 Gráfica de dispersión que muestra la correlación entre los valores de RQD promedio que se obtuvieron a partir del modelo sólido optimizado y el caudal obtenido en la prueba de aire a presión en cada pozo piloto perforado, incluyendo la litología y alteración dominantes en cada pozo. Se observa que los menores caudales corresponden con lutitas sin alteración.....	39
Figura 2.12 Sobre-posición de los modelos de RQD, litología y alteración con relación a la conductividad hidráulica de los pozos de desagüe en vista de planta correspondiente con la elevación 1700 msnm. La <i>línea azul continua</i> divide el grado de alteración, mientras la <i>línea punteada</i> representa el contacto entre la brecha e intrusivo con la lutita. Es claro que la conductividad hidráulica tiende a disminuir con el aumento del RQD y cuando la alteración de la roca disminuye. Con respecto a la litología, la mayoría de los pozos que se encuentran en brecha e intrusivo tienden a presentar las conductividades hidráulicas más altas.....	43
Figura 2.13 Esquema que muestra la metodología aplicada, la cual considera los datos hidráulicos de los pozos con relación a la información de RQD, litología y alteración de las rocas del acuífero. Un cuarto factor asociado, es la intersección con zonas de falla y fracturas de buena conectividad que el modelo de RQD no detecta claramente.....	45
Figura 2.14 Modelo hidrogeológico conceptual para el área de estudio. Se muestran la forma del tajo, así como su contorno final en superficie. También se muestra la forma del flujo de agua subterránea causado por el bombeo de los pozos de desagüe, los cuales presentan diferente comportamiento en el nivel dinámico derivado de sus valores de conductividad hidráulica, de acuerdo con el dominio hidroestructural al que pertenecen.....	48
Figura 3.1 Diagrama de flujo que muestra el procedimiento utilizado para la definición de las ecuaciones utilizadas para convertir la información generada por los modelos sólidos de RQD, litología y alteración a valores de conductividad hidráulica para cada celda del modelo matemático	57
Figura 3.2 Variación vertical de K_r para cada intervalo. Se muestra una posible zona de falla, con espesor b_f	60
Figura 3.3 Obtención de la ecuación general para obtener K para ambos dominios hidrogeológicos, mediante la relación del valor promedio de RQD de cada pozo con su K_r correspondiente	64
Figura 3.4 Gráfica de valores de R_k incluyendo ambos dominios hidrogeológicos, donde $K = f(RQD)$. También se muestra el grupo al que cada pozo pertenece de acuerdo con sus valores representativos de atributos geológicos. Las líneas rojas indican el intervalo evaluado, que en este caso incluye pozos cuyo valor residual es $\pm 2.5 \times 10^{-7}$ m/s.....	65
Figura 3.5 Ecuación para el dominio de matriz fracturada obtenida a partir de la relación entre el valor promedio de RQD de cada pozo y su conductividad hidráulica real. La figura mostrada corresponde a la ecuación obtenida para un rango de variación de $R_k \pm 2.5 \times 10^{-7}$ m/s.....	66

Figura 3.6 Obtención de las ecuaciones para el dominio de matriz fracturada en función del RQD, alteración y litología, previo a la reubicación de los pozos 29 y 5 al grupo de LAA. Las gráficas muestran las relaciones entre el valor promedio de RQD de cada pozo y su K_r , para los tres grupos definidos en función de la litología y alteración de la roca: a BI, b LAB, c LAA. Los valores en los extremos de RQD fueron tomados de bibliografía (0 y 100 %). Se muestran los resultados relacionados con un rango de $R_k \pm 2.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$	68
Figura 3.7 Ubicación de pozos y dominio hidroestructural al que pertenecen. También se incluyen la ubicación de los barrenos de exploración de geología, así como el rumbo y echado de las estructuras principales (Sally 2012).....	72
Figura 3.8 Correlación entre K_r y la K_{matriz} obtenida, a aplicando la ecuación general para el dominio matriz fracturada y b con las ecuaciones definidas en función de los atributos geológicos	73
Figura 3.9 Comparación entre los valores de K_r (línea azul continua) y K_{matriz} (línea roja continua) obtenidos: a al aplicar la ecuación general para el dominio matriz fracturada y b al aplicar las ecuaciones definidas en función de los atributos geológicos. Se observa que las líneas de tendencia (líneas punteadas) se vuelven muy similares al aplicar las ecuaciones para cada grupo a diferencia de las tendencias obtenidas al aplicar la ecuación general	74
Figura 4.1 Valle de Mazapil (sombreado en color azul) y área del modelo. Se incluyen el área operativa de la mina y las celdas activas, las cuales están delimitadas por el polígono en color rojo	83
Figura 4.2 Configuración de elevación del nivel estático en Octubre de 2004. Este periodo incluye nueve puntos de observación con los cuales se estimaron las curvas de isovalores de elevación del nivel estático que muestra que el flujo durante el periodo es claramente de este a oeste. En las zonas de piedemonte se infiere un flujo paralelo a los arroyos, moviéndose a través de la capa aluvial.....	86
Figura 4.3 Configuración del nivel estático en Diciembre 2007. A finales de este periodo inician operación los primeros tres pozos de desagüe ubicados en el área donde se planea excavar el tajo. Se observa el efecto que estos pozos tuvieron en la capa aluvial mediante la distorsión de la curva 1950 msnm. No obstante, la dirección de flujo se mantiene este – oeste. La piezometría fue trazada con 19 puntos de referencia, de modo que fue inferida en zonas sin información como al sureste el área del modelo	87
Figura 4.4 Configuración de la elevación del nivel estático en diciembre de 2010. Durante este periodo se perforan varios puntos de monitoreo, incluyendo tres en la presa de jales y tres en el patio de lixiviación llegando a 25 puntos para configurar las curvas piezométricas. Se observa la formación del cono de abatimiento en el área del tajo, derivado de la operación de 13 pozos de desagüe.....	88
Figura 4.5 Configuración de la elevación del nivel estático en marzo de 2013. Durante este periodo se intensificó el bombeo principalmente en los alrededores del tajo, mediante la operación de 34 pozos de desagüe. Asimismo, se incrementó el número de pozos de observación llegando a 36. El cono de abatimiento resultante muestra la forma general de la dirección de la mayor conductividad hidráulica, que coincide con la dirección principal de fallamiento	89

Figura 4.6 Unidades hidrogeológicas modeladas en el escenario 1, con base en los modelos sólidos de RQD, alteración y litología. La sección es Oeste – Este y muestra la forma de la diatrema, así como la distribución de las unidades hidrogeológicas.....	94
Figura 4.7 Distribución de conductividad hidráulica en el escenario 2, obtenida mediante ecuaciones que relacionan los valores cuantitativos de RQD, alteración y litología obtenidos a partir de los modelos sólidos. La sección es Oeste - Este	96
Figura 4.8 Procedimiento para incluir la geometría del dominio de fallamiento regional en el modelo matemático. A partir de la información estructural y de la distribución de conductividades hidráulicas del escenario 2, se modeló el enfoque dual-continuo, incluyendo las estructuras de acuerdo con su geometría y con su conductividad hidráulica estimada	98
Figura 4.9 Imagen de satélite del valle de Mazapil que muestra el lineamiento asociable con la falla que afecta al pozo DW41. Se observa que la misma dirección del lineamiento se repite en el valle.....	100
Figura 4.10 Distribución de las celdas de carga constante y malla utilizadas como base para la modelación. Para definir el valor de las celdas de carga constante se utilizaron los datos principalmente de los puntos de observación B147, B45 y PH29 al este y B23 al oeste.....	109
Figura 4.11 Distribución de los valores de conductividad hidráulica calibrada (puntos en color azul) con respecto a los rangos obtenidos en las pruebas de bombeo (línea continua). Como referencia se incluyen los rangos de valores definidos por Shingal y Gupta mediante una línea segmentada (1999)	113
Figura 4.12 Zona de ajuste colocada para corregir el efecto de la interpolación. Esta zona se colocó debido a que el gradiente hidráulico es muy alto producto del contraste litológico. No obstante, esta condición no fue interpolada de forma consistente con la geología en los modelos sólidos	114
Figura 4.13 Resultados de la simulación para el primer periodo de estrés (2004-2007) en el enfoque 1. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona.....	120
Figura 4.14 Resultados de la calibración del enfoque 1 para el primer periodo de estrés (2004 – 2007). a relación entre valores de cargas simuladas y observadas; b relación entre los residuales y cargas observadas.....	121
Figura 4.15 Resultados de la simulación para el segundo periodo de estrés (2007-2010) en el enfoque 1. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona. Durante este periodo el modelo falla en reproducir la curva 1800 msnm dentro del tajo.....	123
Figura 4.16 Resultados de la calibración del enfoque 1 para el segundo periodo de estrés (2007 – 2010). a relación entre valores de cargas simuladas y observadas; b relación entre los residuales y cargas observadas.....	124

Figura 4.17 Resultados de la simulación para el tercer periodo de estrés (2010-2013) en el enfoque 1. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. En general se observa una buena correspondencia entre curvas observadas y simuladas, aunque el modelo no alcanza a reproducir apropiadamente las curvas al noroeste del tajo	125
Figura 4.18 de la calibración del enfoque 1 para el tercer periodo de estrés (2010 – 2013). a relación entre valores de cargas simuladas y observadas; b relación entre los residuales y cargas observadas	126
Figura 4.19 Evolución del nivel estático en el área del tajo, enfoque 1. a diciembre de 2007; b diciembre de 2010; c marzo de 2013 en sección Oeste – Este; d marzo de 2013 en sección Sur – Norte. El nivel observado en el piezómetro TP-1760 en marzo de 2013 es de 1582.0 msnm y el nivel simulado es de 1627.8 msnm	128
Figura 4.20 Evolución del nivel estático en el área del modelo para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2022, para el enfoque 1. Se observa que bajo las condiciones de bombeo modeladas el nivel en el área del tajo se estabiliza a desde el 2014. Sólo se observan abatimientos en la parte sureste del área del modelo por efecto de las celdas de carga constante colocadas en esa zona.....	129
Figura 4.21 Resultados de la simulación para el primer periodo de estrés (2004-2007) en el enfoque 2. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona.....	131
Figura 4.22 Resultados de la calibración del enfoque 2 para el primer periodo de estrés (2004 – 2007). a relación entre valores de cargas simuladas y observadas; b relación entre los residuales y cargas observadas.....	132
Figura 4.23 Resultados de la simulación para el segundo periodo de estrés (2007-2010) en el enfoque 2. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona. Asimismo, en este enfoque también falla la simulación de la curva 1850 msnm que denota el abatimiento en el tajo.....	133
Figura 4.24 Resultados de la calibración del enfoque 2 para el segundo periodo de estrés (2007 – 2010). a relación entre valores de cargas simuladas y observadas; b relación entre los residuales y cargas observadas.....	134
Figura 4.25 Resultados de la simulación para el tercer periodo de estrés (2010-2013) en el enfoque 2. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. En general se observa una buena correspondencia entre curvas observadas y simuladas, aunque al igual que en el enfoque 1, el modelo no alcanza a reproducir apropiadamente las curvas al noroeste del tajo	135
Figura 4.26 Resultados de la calibración del enfoque 2 para el tercer periodo de estrés (2010 – 2013). a relación entre valores de cargas simuladas y observadas; b relación entre los residuales y cargas observadas.....	136

Figura 4.27 Evolución del nivel estático en el área del tajo, enfoque 2. a diciembre de 2007; b diciembre de 2010; c marzo de 2013 en sección Oeste – Este; d marzo de 2013 en sección Sur – Norte. El nivel observado en el piezómetro TP-1760 en marzo de 2013 es de 1582.0 msnm y el nivel simulado es de 1627.8 msnm	138
Figura 4.28 Evolución del nivel estático en el área del modelo para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2022, para el enfoque 2. Se observa que bajo las condiciones de bombeo actuales, el nivel tiende a estabilizarse desde el 2014. Aunque se presenta un abatimiento en el centro del tajo, este no es suficiente para soportar el plan de minado, pues para el 2022 el fondo del tajo se encontrará en la cota 1265 msnm.....	139
Figura 4.29 Resultados de la simulación para el primer periodo de estrés (2004-2007) en el enfoque 3. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona.	141
Figura 4.30 Resultados de la calibración del enfoque 3 para el primer periodo de estrés (2004 – 2007). a relación entre valores de cargas simuladas y observadas; b relación entre los residuales y cargas observadas.....	142
Figura 4.31 Resultados de la simulación para el segundo periodo de estrés (2007-2010) en el enfoque 3. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona. En este enfoque la simulación de la curva 1850 msnm empieza a generarse, a diferencia de los dos enfoques anteriores.....	143
Figura 4.32 Resultados de la calibración del enfoque 3 para el segundo periodo de estrés (2007 – 2010). a relación entre valores de cargas simuladas y observadas; b relación entre los residuales y cargas observadas.....	144
Figura 4.33 Resultados de la simulación para el tercer periodo de estrés (2010-2013) en el enfoque 3. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. En general se observa una buena correspondencia entre curvas observadas y simuladas y en este caso sí se logró una mejor correspondencia entre curvas al noroeste del tajo, aunque el modelo falla en la zona sureste	145
Figura 4.34 Resultados de la calibración del enfoque 3 para el tercer periodo de estrés (2010 – 2013). a relación entre valores de cargas simuladas y observadas; b relación entre los residuales y cargas observadas.....	146
Figura 4.35 Evolución del nivel estático en el área del tajo, enfoque 3. a diciembre de 2007; b diciembre de 2010; c marzo de 2013 en sección Oeste – Este; d marzo de 2013 en sección Sur – Norte. El nivel observado en el piezómetro TP-1760 en marzo de 2013 es de 1582.0 msnm y el nivel simulado es de 1627.8 msnm	148
Figura 4.36 Evolución del nivel estático en el área del modelo para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2022, para el enfoque 3. Se observa que bajo las condiciones de bombeo actuales, el nivel tiende a estabilizarse desde el 2014. Aunque se presenta un abatimiento en el centro del tajo, este no es suficiente para soportar el plan de minado, pues para el 2022 el fondo del tajo se encontrará en la cota 1265 msnm.....	149

Figura 4.37 Calibración de los modelos con respecto al nivel de agua observado en el piezómetro TP-1760 localizado dentro del tajo, en la porción centro-sur	150
Figura 4.38 Evolución del nivel estático en el tajo para el periodo de 2014 a 2022 adicionando cinco y diez pozos a la operación.....	152
Figura 4.39 Evolución del nivel de agua en el tajo de acuerdo con el plan de desagüe propuesto de acuerdo con el plan de minado, para el periodo 2015 – 2018. Se observa que el nivel de agua siempre se encuentra por debajo del nivel de minado.....	153
Figura 4.40 Evolución del nivel de agua en el tajo de acuerdo con el plan de desagüe propuesto de acuerdo con el plan de minado, para el periodo 2019 – 2022. Se observa que el nivel de agua siempre se encuentra por debajo del nivel de minado.....	154
Figura 4.41 Ubicación de los diez pozos propuestas para desagüe a largo plazo.	156

CAPÍTULO I

Introducción a la tesis

1.1 Antecedentes

El establecimiento de una gran operación minera tiene consecuencias socio-económicas en los niveles nacional, estatal y local. Una mina crea empleos de forma directa durante su construcción y en su fase operativa e indirectamente a través de la demanda de insumos, o incluso aún más lejanamente, por el efecto multiplicador que inducen las compras de bienes y servicios de sus trabajadores (McMahon y Remy 2001).

En la etapa de producción de una mina el desagüe es esencial para permitir el acceso del personal y maquinaria a las reservas minerales de interés. Un correcto desagüe deriva de un conocimiento adecuado de la hidrogeología e hidrodinámica del sitio de modo que es de vital importancia el conocimiento de los factores que gobiernan el flujo de agua subterránea para garantizar la seguridad del personal que labora en las zonas de mina propensas a inundarse y para reducir los costos operativos. Sin embargo, es sorprendente la falta de información referente a este tema (Younger y Wolkersdorfer 2004).

En general, la mayoría de las minas se encuentran en ambientes rocosos, de modo que la circulación del agua en ellas se realiza principalmente a través de las fracturas interconectadas hidráulicamente (Rapantova et al. 2007), las cuales se definen como

superficies o planos de discontinuidad en la roca a lo largo de los cuales se pierde la cohesión del material (Rubilar 1999). A diferencia de los acuíferos formados en depósitos granulares recientes, los acuíferos fracturados presentan una fuerte heterogeneidad a causa de los grandes contrastes en las propiedades hidráulicas entre los tipos de fracturas y la matriz, la cual presenta permeabilidad baja (Lemieux et al. 2006).

En la actualidad, la hidrogeología es desafiada por complejos problemas de heterogeneidad e incertidumbre (Galloway 2010), derivada principalmente de los acuíferos fracturados. Los problemas más frecuentes que se presentan en la evaluación de los acuíferos relacionados con minas, son la deficiencia de datos necesarios para la caracterización hidrogeológica del área, escasez de información de las propiedades hidráulicas del acuífero y problemas de escala (Younger y Robins 2002). Es común que en la evaluación de la hidrogeología de minas se presente escasez de datos hidrogeológicos y abundancia de planos de la mina y datos de los barrenos de exploración enfocados a exploración mineral. Debido a esta deficiencia de información, los hidrogeólogos se han visto obligados a inferir la distribución de las cargas hidráulicas, lo que genera incertidumbre en la evaluación del volumen de entradas subterráneas a la mina. Asimismo, se han esforzado en simplificar la información contenida en los abundantes planos de mina e información de los barrenos de exploración, para transformarlos en datos hidrogeológicos que sirvan de apoyo en la identificación de las posibles conexiones hidráulicas entre familias de fracturas. Sin embargo, siempre existe el riesgo de simplificar demasiado la información o considerar demasiadas observaciones de poca utilidad, lo cual dependerá de la experiencia y capacidad analítica del hidrogeólogo.

Por lo tanto, es necesario comprender que, dada la naturaleza compleja de los acuíferos fracturados, siempre existirá un grado de incertidumbre en su evaluación, que se manifiesta en problemas como, subestimación o sobrestimación de la cantidad de agua que ingresa a la mina y dificultades en la predicción de la tasa de bombeo requerida en el desagüe. Las causas de estos problemas son múltiples y varían en cada caso, pero principalmente derivan de la incertidumbre de las propiedades hidráulicas de las fracturas y de la matriz, es decir, de la doble porosidad.

Con respecto al problema de escala, un sistema de fracturas puede estar altamente interconectado a gran escala, pero dominado por unas pocas fracturas a una escala menor. A pequeña escala puede utilizarse el análisis a partir de fracturas discretas, donde el flujo se estima a partir del conocimiento de la geometría y transmisividad de cada fractura. A escala mayor puede aplicarse un enfoque continuo o de medio poroso equivalente, donde la heterogeneidad de la roca fracturada se modela utilizando un número limitado de regiones con propiedades uniformes. También pueden utilizarse métodos híbridos, que consisten en el uso de modelos de fracturas discretas para construir una aproximación continua (NRC 1996). Una aplicación de un enfoque híbrido es el enfoque dual-continuo, donde se consideran dos dominios hidrogeológicos que coexisten, como las fracturas y la matriz.

Con respecto a la investigación de los acuíferos fracturados, muchos investigadores tienden a caracterizar el flujo de agua subterránea a partir del establecimiento de relaciones estructurales en la roca, mediante la clasificación de las familias de fracturas de acuerdo con su dirección, longitud y apertura principalmente. De este enfoque se desprende que el movimiento del agua subterránea no siempre coincide con la dirección estructural predominante (Gernard y Heidtman 1997) y que las intersecciones son de gran importancia hidrogeológica, sobre todo las que se presentan entre estructuras verticales y horizontales (Meir et al. 2007). Por otro lado, se han realizado análisis que incluyen los procesos tectónicos que generaron las familias de fracturas (Fernandes y Rudolph 2001; Owen et al. 2007) en los cuales se concluye que las fracturas en distensión son las que definen la dirección principal del flujo de agua subterránea. Estos autores también realizaron un enfoque con relación al campo de esfuerzo regional, toda vez que la capacidad conductora de una estructura varía con su orientación con respecto a éste (Henriksen y Braathen, 2006). En este sentido, Rogers (2003) ha encontrado que las fracturas orientadas de 20-30° a partir de la dirección del máximo componente horizontal del esfuerzo in-situ (σ_{hmax}), son las que se encuentran más activas hidráulicamente. Además, algunos autores consideran de gran importancia la respuesta dúctil o frágil en las rocas de acuerdo a su litología (Tiab y Donalson 2004). Particularmente, para el caso de las rocas sedimentarias, se ha destacado la importancia de las fracturas paralelas a la estratificación, de modo que éstas controlan el movimiento lateral del agua subterránea (Muldoon et al. 2001, Eaton y Bradbury 2003).

Considerando la problemática anterior, el fin de este trabajo de tesis es aportar formas sencillas y eficaces de conceptualizar y modelar acuíferos fracturados relacionados con la minería, tomando la abundante información geológica enfocada hacia la evaluación mineral y convertirla en información hidrogeológica de utilidad, como base fundamental en el desarrollo de modelos matemáticos que soporten las estrategias de desagüe y así permitir el acceso seguro al personal que extrae el mineral, minimizando a su vez el impacto hacia el ambiente y a las comunidades cercanas.

1.2 Objetivos

El objetivo principal es caracterizar el comportamiento del flujo de agua subterránea durante la etapa de producción de una mina alojada en un acuífero fracturado constituido por rocas calcáreo-arcillosas, rocas intrusivas y brechas, mediante la elaboración de un modelo de simulación que incluya un enfoque dual-continuo, orientado hacia la elaboración de estrategias óptimas de control de desagüe.

Para lograr el cumplimiento del objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar de forma preliminar el acuífero y el área de mina, mediante la recopilación y análisis de la información existente correspondiente con cortes litológicos, parámetros hidráulicos, piezometría histórica, climatología e hidrometría, para establecer un modelo hidrogeológico conceptual inicial.
- Definir los atributos geológicos que influyen directamente en la hidrodinámica del acuífero, caracterizarlos y parametrizar el modelo conceptual inicial para aplicarlo al modelo matemático.
- Definir la geometría de las estructuras que dominan el flujo de agua subterránea con base en estudios previos, mediciones de campo, análisis de imágenes de satélite y estimar sus propiedades hidráulicas con base en la información hidráulica de los pozos.

- Transformar la información cuantitativa generada en el modelo conceptual a información hidrogeológica como base para la elaboración del modelo de simulación de flujo que incluya un enfoque dual-continuo y calibrarlo de manera que sea capaz de predecir el comportamiento de las cargas hidráulicas durante las condiciones de producción.

1.3 Organización de la tesis

El presente trabajo de tesis consiste en cinco capítulos, siendo los principales del 2 al 4. Estos capítulos consisten de una breve introducción al tema, metodología, resultados, discusión, conclusiones y bibliografía, escritos en un formato independiente favorable para su publicación como artículos de investigación.

En el capítulo 2 se describen las características generales del área de estudio y se evalúan los atributos geológicos como base del modelo conceptual. El análisis parte de la relación de un parámetro que refleja el grado de fracturamiento de las rocas, el índice de calidad de roca (RQD, por sus siglas en inglés) con la hidráulica del acuífero obtenida a partir de las pruebas de bombeo. Dado que se observa que la relación no es directa, se realiza un análisis más a fondo que involucra la evolución de niveles dinámicos, la litología y el grado de alteración de las rocas de forma que concluye con la definición de dos dominios hidroestructurales que permiten caracterizar apropiadamente la hidrodinámica del acuífero: matriz fracturada y fallamiento regional. El análisis incluyó la creación y optimización de modelos sólidos en tres dimensiones para los tres atributos geológicos principales: RQD, litología y alteración, de modo que el producto final en este capítulo fue el modelo conceptual hidrogeológico como base del modelo de simulación.

En el capítulo 3 se utilizó la información cuantitativa generada en los modelos sólidos obtenidos en capítulo anterior y se convirtió en conductividad hidráulica. Dado que los modelos generaron un valor de RQD, litología y alteración en cada celda, se realizaron correlaciones de estos tres parámetros con la conductividad hidráulica obtenida en cada pozo a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo. De este modo, el producto principal de este capítulo fue la obtención de las ecuaciones exponenciales optimizadas

para definir la distribución espacial de la conductividad hidráulica en toda el área del modelo en función del valor de cada atributo geológico. Por lo tanto, la fijación de este parámetro hidráulico permitió la calibración del modelo matemático a partir, principalmente, de los parámetros de almacenamiento.

El capítulo 4 consiste en la construcción del modelo matemático para comprobar la certidumbre del modelo conceptual definido en el capítulo 2 y la eficiencia de las ecuaciones definidas en el capítulo 3. Con fines de comparación, el modelo matemático fue desarrollado mediante dos enfoques: medio poroso equivalente y dual-continuo. A su vez, el primer enfoque tuvo dos variantes en la distribución de la conductividad hidráulica. En la primera, se consideró una distribución por zona en función de las características de las unidades hidrogeológicas definidas en función de los atributos geológicos. La conductividad hidráulica asignada a cada zona se derivó del análisis de las pruebas de bombeo realizadas en cada una de ellas. En el segundo caso, la conductividad hidráulica fue distribuida por celda, de acuerdo con las ecuaciones exponenciales obtenidas en el capítulo 3. El enfoque dual-continuo incluyó el refinamiento de la malla utilizada en los dos modelos anteriores y la inclusión de las zonas de falla definidas en estudios previos. A estas zonas de falla se les asignó el valor de conductividad hidráulica obtenida en el capítulo 3.

La calibración del modelo se desarrolló obteniendo las cargas iniciales a partir de la piezometría del 2004 (estado estacionario) y mediante las cargas obtenidas para los años 2007, 2010 y 2013 (estado transitorio). Por último, las predicciones del comportamiento hidrodinámico del área se realizaron del 2014 al 2022.

Finalmente, el capítulo 5 consiste en un resumen de las conclusiones obtenidas en los capítulos anteriores, englobando de forma general las principales aportaciones del trabajo y sus limitaciones. Asimismo, se incluyen recomendaciones para los siguientes estudios que se realicen en acuíferos fracturados.

1.4 Referencias

- Eaton T, Bradbury K (2007) Characterizing flow zones in a fractured and karstified limestone aquifer through integrated interpretation of geophysical and hydraulic data: *Hydrogeology Journal*. 15: 225 – 240 p.
- Fernandes A, Rudolph D (2001) The influence of Cenozoic tectonics on the groundwater – production capacity of fractured zones: a case study in Sao Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 9:151 – 167 p.
- Galloway D (2010) The complex future of hydrogeology. *Hydrogeol J* 18:807-810
- Gernand J, Heidtman J (1997) Detailed pumping test to characterize a fractured bedrock aquifer: *Groundwater*, vol. 35, No. 4, 632-637 p.
- Henriksen H, Braathen A (2006) Effects of fracture lineaments and in-situ rock stresses on groundwater flow in hard rocks: a case study from Sunnfjord, western Norway: *Hydrogeology Journal*. 14:444 – 461 p.
- Lemieux J, Therrien R, Kirkwood D (2006) Small scale study of groundwater flow in a fractured carbonate – rock aquifer at the St – Eustache quarry, Québec, Canada: *Hydrogeology Journal*, 14:603 – 612 p.
- McMahon G, Remy F (2003) Grandes minas y la comunidad: Efectos socioeconómicos en Latinoamérica, Canadá y España: Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo y Banco Mundial, Ed. Alfaomega.
- Meir N, Jaeggi D, Herfort M, Loew S, Pezard P, Lods G (2007) Characterizing flow zones in a fractured and karstified limestone aquifer through integrated interpretation of geophysical and hydraulic data: *Hydrogeology Journal*, 15: 225 – 240 p.
- Muldoon M, Simo J, Bradbury K (2001) Correlation of hydraulic conductivity with stratigraphy in a fractured – dolomite aquifer, northeastern Wisconsin, USA: *Hydrogeology Journal*. 9: 570 – 583 p.
- National Research Council (1996) *Rock Fractures and Fluid Flow, Contemporary Understanding and Applications*: National Research Council, National Academy Press, Washington, DC, p. 551.
- Owen R, Maziti A, Dahlin T (2007) The relationship between regional stress field, fracture orientation and depth of weathering and implications for groundwater prospecting in crystalline rocks. *Hydrogeology Journal*, 13:771–786 p.
- Rapantova N, Grmela A, Vojtek D, Halir J, Michalek B (2007) Groundwater flow modeling applications in mining hydrogeology. *Mine Water and the Environment*, 26:264–270 p.
- Rogers S (2003) Critical stress – related permeability in fractured rocks: The Geological Society of London, special publications; v. 209; 7–16 p.

Rubilar H, (1999) Apuntes de geología estructural. Primera parte: estructuras frágiles.

Tiab D, Donaldson E (2004) Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties: Elsevier, second ed., Chap. 8.

Younger P, Robinson N (2002) Challenges in the characterization and prediction of the hydrogeology and geochemistry of mined ground. Geological Society, London, Special Publications, 198, 1-16 p.

Younger P, Wolkersdorfer C (2004) Mining impact on the fresh water environment: technical and managerial guidelines for catchment scale management. Mine Water and the Environment, 23, 2-80 p.

CAPÍTULO II

Caracterización de un acuífero fracturado mediante sus atributos geológicos, relacionado con el desagüe de una mina a cielo abierto

2.1 Introducción

La mayoría de las minas a cielo abierto encuentran agua subterránea en alguna etapa de su desarrollo. Por consiguiente, el desagüe se vuelve esencial para permitir el acceso seguro a los operadores que extraen el mineral, para reducir los costos de las voladuras y acarreo, mantener la estabilidad de taludes, prevenir el contacto del agua subterránea con los minerales (principalmente con el sulfuro de hierro o pirita) y el oxígeno para evitar la producción de drenaje ácido, y en algunos casos, para proveer de abastecimiento hídrico para los diferentes usos de la mina (campamento, control de polvo en caminos, proceso metalúrgico, etc.).

La mayoría de las minas a cielo abierto típicamente se encuentran en roca, de modo que hidrogeológicamente, se encuentran en acuíferos fracturados. En estos acuíferos, las estructuras como pliegues, fallas y familias de fracturas presentan el potencial suficiente para influir significativamente en la hidrodinámica subterránea regional (Surrete et al. 2008). De este modo, el principal problema para los hidrogeólogos es detectar esas estructuras pues a pesar de su gran importancia, el flujo a través de medios fracturados no ha sido bien entendido (Gudmundsson 2000).

La tendencia actual de la exploración hidrogeológica en acuíferos fracturados, se enfoca en definir los dominios estructurales (Surrete et al. 2008; Scesi y Gattinoni 2009). Sin embargo, cuando el acuífero presenta un número muy limitado de estructuras a medir debido a que éstas se encuentran cubiertas por aluvión o porque la roca está fuertemente plegada en vez de fracturada, es difícil identificar y caracterizar las estructuras. Aún cuando la pérdida de permeabilidad a mayor profundidad es una tendencia general en las formaciones geológicas (Jiang et al. 2010; Shingal and Gupta 1999), es difícil predecir el comportamiento hidrogeológico a profundidad de estructuras que son medidas en superficie. Otro problema importante es la dificultad de encontrar correlación entre las propiedades geométricas e hidráulicas en una formación fracturada (Berkowitz 2002). Estas dificultades han llevado a fracasos en la localización de pozos en algunas zonas, de modo que el éxito de un proyecto depende de que la persona a cargo tome la decisión correcta al ponderar el costo de varias técnicas de investigación hidrogeológica contra el riesgo de perforar un pozo de baja productividad (Sander 2007). Por lo tanto, predecir el éxito del desagüe en las minas puede ser bastante subjetivo.

Afortunadamente la mayoría de las minas tienen una etapa de factibilidad, en la cual se realiza una intensa campaña de perforación para caracterizar, clasificar y cuantificar las reservas de mineral. Típicamente los barrenos de exploración se perforan con broca de diamante, lo cual permite la recuperación del núcleo de roca. Estos núcleos son descritos por los geólogos, quienes incluyen el índice de calidad de la roca, RQD (Rock Quality Designation, por sus siglas en inglés) en sus descripciones, el cual es un índice semi-cuantitativo obtenido para predecir la dureza del mineral a partir de la medición directa de las piezas del núcleo. Este índice fue propuesto por Deere (1964) y se define como la relación entre las piezas del núcleo con una longitud mayor a 4 pulgadas (alrededor de 10 cm) y de buena calidad, con respecto a la longitud total de perforación, expresándose como un porcentaje (Figura 2.1). Aunque el RQD se utiliza principalmente para definir las propiedades geomecánicas de las rocas, también se considera un parámetro importante para conocer su permeabilidad (Shingal & Gupta 1999). Un RQD bajo puede corresponder con una zona fracturada o de falla a profundidad, lo cual puede representar una zona permeable en la roca dado que las grandes zonas fracturadas usualmente son redes hidráulicas complejas compuestas por varias fracturas (Poteri 2009).



Figura 2.1 Zonas con alto y bajo RQD en barrenos de exploración geológica. **a** Los tramos de barreno donde la mayoría de las piezas de roca son mayores que 10 cm se consideran de alto RQD. **b** Los tramos donde la mayoría de los fragmentos recuperados son menores que 10 cm, se consideran de bajo RQD.

En la actualidad, estas características han recibido poca atención en exploración hidrogeológica, posiblemente debido a la tendencia de la hidrogeología a enfocarse hacia la hidráulica y la solución de las ecuaciones de flujo en vez de la geología y la comprensión y descripción de las facies estructurales de las rocas y sus propiedades (de Marsily et al. 2005). Esto puede llevar a la construcción inapropiada de modelos conceptuales y por consiguiente a modelos numéricos erróneos, pues el problema del modelo conceptual hace las predicciones del modelo numérico inherentemente más inciertas (Bredehoeft 2005). Como resultado, la localización de nuevos pozos en acuíferos fracturados puede llevar a la pérdida de considerables cantidades de dinero y tiempo al perforar pozos poco productivos.

Por lo tanto, este capítulo está dedicado a la comprensión de los factores que controlan el comportamiento hidrodinámico del acuífero fracturado objeto del presente estudio, con el fin de mostrar una herramienta de evaluación hidrogeológica basada en las propiedades geológicas de la roca. Los resultados de este análisis no solo demostrarán la utilidad de las técnicas de investigación usadas para evaluar la dinámica global del tajo a cielo abierto del área de estudio, sino también proveerán ideas sobre otros factores que subsecuentemente pueden integrarse con otras características para desarrollar mejores modelos conceptuales y así mejorar el potencial de localización de pozos exitosos en acuíferos fracturados.

2.2 Marco hidrogeológico

2.2.1 Características geográficas del área de estudio

El área de estudio se encuentra al noreste del estado de Zacatecas, México, en las coordenadas geográficas $101^{\circ}38'38''$ – $101^{\circ}45'25''$ Longitud Este y $24^{\circ}36'04''$ – $24^{\circ}41'12''$ Latitud Norte y a una elevación que varía entre 1750 y 2050 msnm. El área de estudio (44.4 km^2) se encuentra dentro del valle de Mazapil, que cuenta con un área de captación de $\sim 270 \text{ km}^2$ y cuya corriente superficial principal es el Arroyo Grande (Figura 2.2). Las poblaciones más importantes en las cercanías del área son Cedros y Mazapil, con población de 1013 y 794 habitantes en el año 2010, respectivamente. Las principales actividades económicas en la región son la agricultura, ganadería y minería. Ésta última ha adquirido gran importancia debido al enorme potencial minero del área.

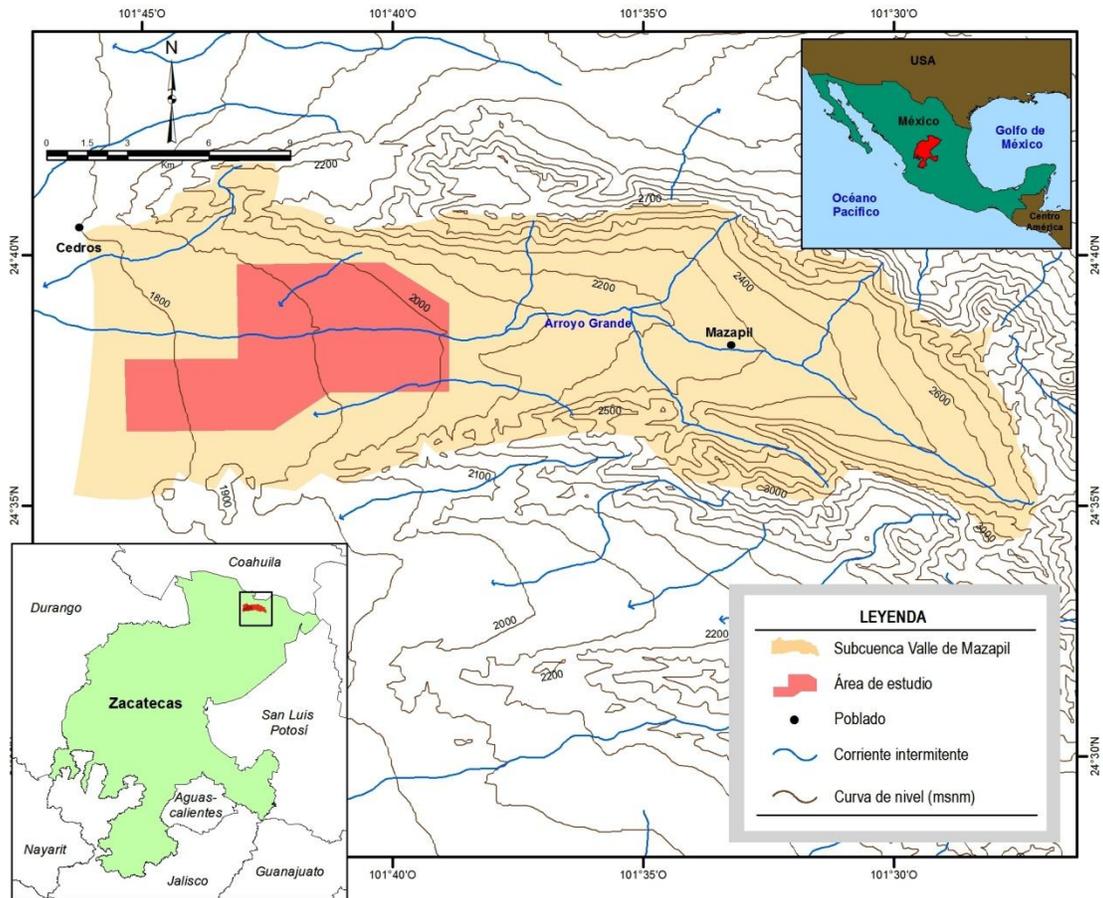


Figura 2.2 Localización del área de estudio en el estado de Zacatecas, México. Se incluyen las curvas de elevación topográfica, así como las principales corrientes superficiales, mostrando la forma de la subcuenca del valle de Mazapil.

El clima es semiárido, con un promedio de precipitación anual de 400 mm. La mayor parte de la precipitación ocurre en los meses de Junio a Septiembre, mientras el mes más seco es Marzo. La temperatura media anual es de 12.5°C y la evaporación potencial de 1920 mm. Estos datos fueron obtenidos de las estaciones meteorológicas Cedros y Mazapil. La vegetación predominante es xerófito, la cual cambia gradualmente a bosque en las partes altas de las sierras de los alrededores.

2.2.2 Marco geológico

Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que cubre el área de estudio se compone por rocas sedimentarias tanto marinas como continentales, volcanosedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, y metamórficas; cuyo rango de edad varía del Jurásico al Cuaternario (Figuras 2.3 y 2.4).

Jurásico

La base de la columna inicia con la Formación Zuloaga, la cual está conformada por calizas con nerineas y dolomías de edad Oxfordiano–Kimmeridgiano, con moluscos y fragmentos de coral. Sus áreas de exposición se encuentran aflorando en las sierras al norte y sur que delimitan el valle de Mazapil, conformando el núcleo de los anticlinales. Su base no aflora dentro del área de estudio. Subyace concordantemente a la Formación La Caja, la cual está compuesta por limolita, caliza y caliza fosfática de edad Kimmeridgiano–Portlandiano. La abundancia de amonitas en esta formación sugiere un depósito de ambiente infranerítico.

Cretácico

El Cretácico inferior inicia en el área con el depósito de calizas y lutitas de la Formación Taraises. Estas rocas contienen pirita diseminada y en nódulos, que al oxidarse le dan a la roca una coloración que ocre amarillento a rojo ladrillo. La edad de esta formación es del Berriasiano–Hauteriviano. Subyace concordantemente a la Formación Cupido la cual está constituida por calizas con estratificación mediana y gruesa, presentando una coloración en tonos de gris. Estas calizas contienen lentes y nódulos de pedernal más abundante que la Formación Taraises, cuyo contacto no es fácil distinguir por ser transicional. Su depósito ocurrió durante el Hauteriviano Tardío al Aptiano Temprano.

Cubriendo a la Formación Cupido se presenta la Formación La Peña, a la cual se le puede observar morfológicamente formando puertos angostos y alargados, formados por calizas y lutitas con fósiles escasos y mal conservados, pero por su posición estratigráfica se le ha asignado una edad correspondiente al Aptiano.

Sobreyaciendo a la Formación La Peña se encuentra las calizas de la Formación Cuesta del Cura, de edad Albiano – Cenomaniano. La principal característica que distingue a esta formación es una estratificación ondulada y abundantes marcas de oleaje. El contenido de fósiles de esta unidad es escaso y se restringe a unas pocas amonitas. Esta formación es cubierta por calizas arcillosas y lutitas calcáreas con estratificación laminar y delgada de la Formación Indidura del Cenomaniano Tardío al Coniaciano. Sobre esta formación descansan los sedimentos flysch de la Formación Caracol, constituida por una alternancia rítmica de lutita y arenisca, cuyo color varía de gris oscuro a casi negro, con contenido faunístico en general muy pobre. Por su posición estratigráfica se le ha determinado una edad que comprende del Coniaciano hasta el Santoniano. Finalmente, se presentan lutitas fósiles de la Formación Parras, de edad Campaniano – Maastrichtiano sobreyaciendo a la Formación Caracol.

Terciario

Cubriendo de forma discordante a las unidades Cretácicas, se presenta un conglomerado polimíctico de la Formación Ahuichila del Eoceno. A su vez, en esta etapa se inicia la primera fase de intrusión con el emplazamiento de cuerpos hipabisales de composición granodiorítica que generan aureolas de metamorfismo de contacto formando zonas de skarn, hornfels y mármol.

En el Oligoceno se presenta una segunda etapa de intrusión representada por pórfidos de composición riolítica. Para el Mioceno existió un evento efusivo con la emisión de brecha volcánica de composición basáltica y de derrames de basalto (SGM 2004a). Por último, durante el Mioceno–Plioceno se depositó un conglomerado polimíctico mal consolidado, el cual se encuentra intercalado con areniscas.

Cuaternario

En el Pleistoceno se depositaron cuerpos de travertino por una fuente de agua termal, mientras que en el Holoceno se depositaron materiales coluviales al pie de las sierras.

Geología estructural y tectónica

El contexto estructural predominante está dado por el efecto de los esfuerzos compresivos provenientes del suroeste, producidos por la Orogenia Laramide con efecto sobre los sedimentos mesozoicos y cenozoicos donde los paleoelementos Isla de Coahuila y la península de Tamaulipas se mantuvieron como contrafuertes. Este proceso originó la forma arqueada de los pliegues, cuando las rocas del Mesozoico se deslizaron hacia el nororiente sobre las rocas del Mesozoico inferior que fueron plegadas y cabalgadas.

Por otro lado, las etapas de fallamiento distensivo se desarrollaron durante el Terciario (SGM 2004b). Finalmente, como producto de los eventos tectónicos dentro del área predominan dos direcciones estructurales principales: la primera NE-SW y la segunda NW-SE, asociadas con fallas laterales y normales.

Mineralización

En el área se presentan dos grandes diatremas que contienen amplios intervalos de mineralización diseminada de plata, oro, plomo y zinc de baja ley. La mineralización se localiza principalmente en brecha y roca intrusiva, con presencia principalmente de esfalerita, pirita, galena, cuarzo y calcita. Como derivado de la interacción térmica y química entre la roca encajonante y los fluidos mineralizantes, ocurren principalmente dos tipos de mineralización y alteración: pirita-calcita (PC) y cuarzo-sericita-pirita-calcita (CSPC) la cual puede ser débil, moderada o fuerte.

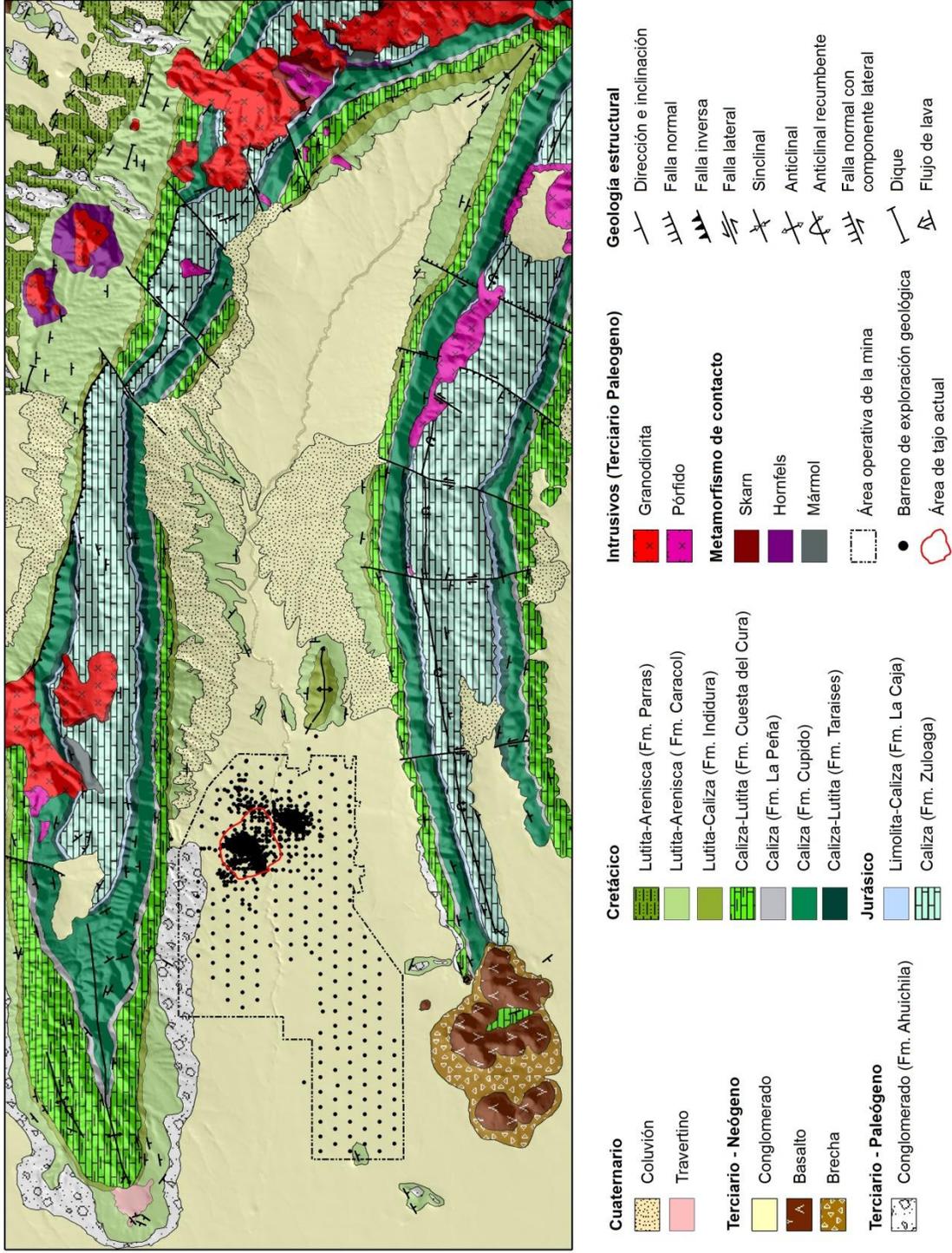


Figura 2.3 Mapa geológico del área de estudio (SGM 2004a; SGM 2004b).

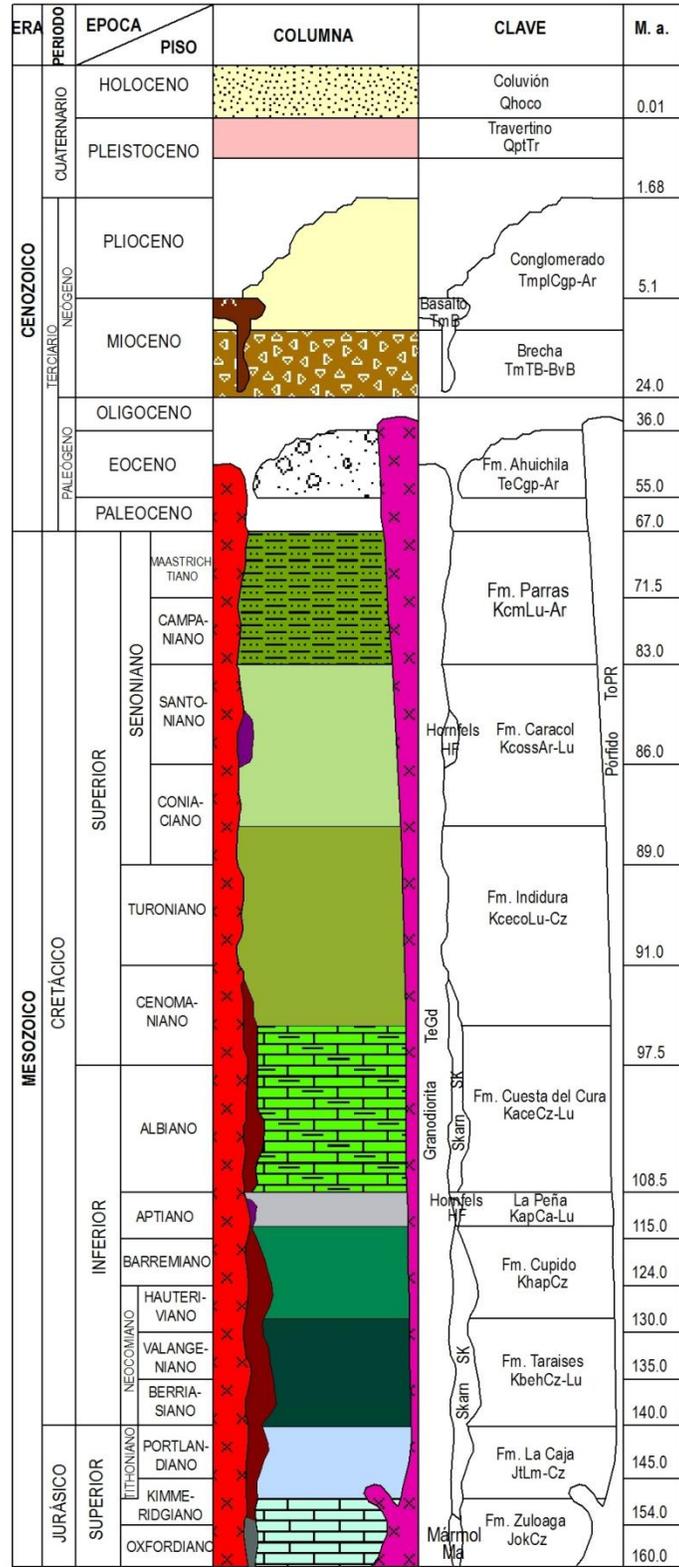


Figura 2.4 Columna estratigráfica del área de estudio (SGM 2004a; SGM 2004b).

2.2.3 Hidrogeología

El acuífero es libre en los flancos y se vuelve semiconfinado hacia la parte central del valle. Está compuesto por una secuencia sedimentaria constituida principalmente por lutita interestratificada con arenisca (Formación Caracol), que presenta un espesor aproximado de 900 m. En algunas zonas esta formación se encuentra alterada y fracturada, presentando condiciones favorables para constituir acuíferos, hecho que se comprueba en las obras mineras. Por otro lado, posteriormente a la formación de las diatremas que dieron origen al yacimiento mineral, la tectónica dio origen a fallamientos con direcciones Noroeste y Noreste. Esas fallas, en combinación con la litología, dieron lugar a una permeabilidad heterogénea de la roca, lo cual afectó directamente a la hidrodinámica subterránea.

Debido a la presencia de la mina a cielo abierto en el área de estudio, el comportamiento del acuífero se ha convertido en un tema de gran importancia por la necesidad de desaguar el tajo y para abastecer de agua el proceso metalúrgico. Por estas razones, se han construido varios pozos de desagüe y producción, así como varios pozos de observación con profundidades que varían desde 193 hasta 812 m y gastos de 2 a 54 l/s. El rendimiento de cada pozo tiende a disminuir con el tiempo debido a la reducción de la columna de agua, principalmente en los pozos de desagüe. La profundidad al nivel estático previo al desagüe era de 12 a 81 m y actualmente se encuentra entre 32 y 364 m, debido a la necesidad de bajar el nivel a una profundidad que permita el minado.

El comportamiento hidrodinámico del acuífero muestra claramente un alto nivel de complejidad hidrogeológica causado por los fuertes contrastes en las propiedades hidráulicas entre las fracturas de alta permeabilidad y la matriz rocosa, y también debido a los contrastes entre los diferentes tipos de fracturas, lo cual es característico de los acuíferos fracturados (Tweed et al. 2005; Lemieux et al. 2006).

2.3 Metodología

La metodología incluye el uso de datos geológicos e hidrogeológicos, así como de los patrones estructurales que controlan el flujo del agua subterránea, para aplicarlos en la caracterización regional del acuífero fracturado, objeto del presente estudio. De este modo, el uso de las propiedades hidráulicas junto con los atributos geológicos deberá resultar en una caracterización y cuantificación más acertada de los recursos de agua subterránea del acuífero.

2.3.1 Análisis de datos

Datos geológicos

Se utilizaron datos de 823 núcleos de barrenación para construir un modelo sólido en tres dimensiones. Los barrenos fueron perforados a profundidades desde 400 a 1422 m, ya sea de forma vertical o inclinados 60° principalmente al norte y sur. Por lo tanto, los datos de RQD se obtuvieron como porcentaje a intervalos de 3 m, donde el 100% de RQD equivale a roca de alta calidad y el 0% corresponde con una zona de calidad de roca muy pobre. Los datos de litología y alteración se obtuvieron de forma descriptiva y a diferentes intervalos, de modo que estos datos fueron transformados a una forma cuantitativa para el proceso de análisis.

Con referencia a los datos de RQD, se realizó una inspección a la base de datos de cada barreno previa a la introducción de los datos para generar el modelo sólido. Durante la inspección se ajustaron los valores anómalos, derivados principalmente de errores de captura. En la mayoría de los casos el valor del intervalo con valor inconsistente fue sustituido por el promedio entre el valor inmediato superior y el inferior.

En cuanto a los datos de litología, para fines prácticos los datos se ajustaron a cuatro grupos principales: lutita (Formación Caracol), brecha, intrusivo y calizas. En general, en la mayoría de los barrenos predominan las lutitas de la formación Caracol. En cuanto a brechas e intrusivos, se presentan de varios tipos. No obstante, dado que no se encontraron

diferencias hidráulicas entre los diferentes tipos, se agruparon todas las variedades dentro de los grupos brecha e intrusivo. Por último, eventualmente se presentan las formaciones Indidura y Cuesta del Cura en el fondo de algunos barrenos, de modo que ambas unidades se agruparon dentro del grupo de calizas.

Con referencia a los datos de alteración, se observó el predominio de cinco grupos: sin alteración, alteración PC (Pirita–Calcita) y alteración CSPC en tres grados (baja, moderada y fuerte). Eventualmente se presentaron otros tipos de alteraciones como argílica, potásica, CSP (Cuarzo, Sericita, Pirita), etc. Dada la muy baja presencia de estas alteraciones, los intervalos asociados a ellas fueron reemplazados con la alteración de los intervalos próximos, dentro de los cinco grupos principales definidos.

Datos hidráulicos

Se utilizaron datos de 37 pozos de desagüe para estimar las propiedades hidráulicas de cada unidad hidrogeológica. No obstante, antes de seleccionar estos datos se realizó una discretización de la información. Los primeros pozos de desagüe presentaron información poco consistente debido a que en varios casos la prueba de bombeo se realizó con muy poca duración (1 a 2 horas) de modo que no se pudieron obtener valores confiables de conductividad hidráulica, y fueron descartados para el análisis. Un ejemplo de esto fueron los pozos DW3, DW7, DW8, DW8A y DW9. En otros casos no se pudo realizar prueba de bombeo porque el pozo no pudo completarse (pozos DW36 y DW38), mientras en otros, el pozo no sostuvo un caudal constante (pozo DW34). Finalmente, el pozo DW43 fue perforado exactamente en el mismo punto que el pozo DW17, así que sólo se utilizó la información hidráulica de este último para el análisis.

2.3.2 Obtención de los atributos geológicos

En hidrogeología de minas, un reto substancial es convertir la abundante información geológica, que usualmente está enfocada a la exploración minera, en datos hidrogeológicos relevantes que puedan utilizarse con propósitos de modelación (Younger and Robins 2002). En el presente estudio, este problema fue abordado mediante el uso de los datos existentes de RQD, litología y alteración de los barrenos de exploración, que anteriormente fueron definidos por los geólogos de la mina para prospección mineral.

Con relación a otras técnicas de caracterización de acuíferos fracturados, Bieniawski (1976) propuso un índice para clasificar los macizos rocosos en excavaciones subterráneas, nombrado Clasificación de la Masa Rocosa (Rock Mass Rating, RMR por sus siglas en inglés). Este índice incluye el espaciamiento, condiciones y orientación de las discontinuidades de la roca, el esfuerzo compresivo del material, el RQD y las condiciones del agua subterránea. Aunque utilizar este índice sería mejor que utilizar únicamente el RQD, en este caso de estudio parte de la información requerida por el RMR no se encuentra disponible, de modo que tendría que obtenerse directamente de los núcleos, de los cuales varios fueron desechados o no están disponibles para consulta, pues los geólogos usualmente almacenan sólo los núcleos de interés mineral. Por lo tanto, se analizaron los atributos geológicos del acuífero como RQD, litología y alteración, en relación con sus propiedades hidráulicas, pues esta información usualmente es fácil de obtener en la mayoría de las minas.

2.3.3 Estimación de propiedades hidráulicas

Los datos de las 37 pruebas de bombeo realizadas del 2007 al 2012 se utilizaron para obtener valores de conductividad hidráulica para el acuífero (Tabla 2.1). La Figura 2.5 muestra la localización de los pozos de desagüe utilizados, los cuales se encuentran dentro y alrededor del tajo de la mina. No obstante, algunos de los pozos ya fueron eliminados para permitir el avance de la excavación del tajo, y otros nunca se utilizaron debido a que presentaron baja productividad desde que fueron construidos (< 4 l/s).

Los datos hidráulicos de las pruebas de bombeo se analizaron mediante métodos establecidos como Theis con corrección de Jacob, Neuman-Boulton, doble porosidad, Hantush con almacenamiento, Papadopulos y Cooper, y Moench. Puede consultarse más información sobre éstos métodos en numerosos textos de hidrogeología (p. ej. Freeze y Cherry 1979; Kruseman y de Ridder 1990; Fetter 1994; Domenico y Schwartz 1990; Driscoll 1987). Dado que el acuífero se comporta como libre en las zonas de piedemonte y como semiconfinado en la parte central, la conductividad hidráulica para cada pozo se obtuvo como el promedio de los métodos que proporcionaron el mejor ajuste con los datos. No obstante, el método que se ajustó mejor a la mayoría de pozos fue el de Moench para flujo en fracturas, seguido por el método de Theis con corrección de Jacob.

2.3.4 Construcción del modelo sólido

Los modelos sólidos se construyeron mediante el software RockWorks 15, el cual permite el modelado de barrenos verticales e inclinados, pues varios de los barrenos utilizados para el análisis fueron perforados con una inclinación de 60°. Las principales ventajas de este software son que es de bajo costo y fácil de utilizar para analizar información de geología, hidrogeología, exploración de petróleo, etc. Sin embargo, el principal algoritmo de interpolación es ponderación inversa a la distancia y el método de kriging no está incluido para interpolación en tres dimensiones. Además, cuando la información es abundante, algunos procesos como la interpolación y el despliegue de imágenes pueden ser muy lentos. En la Figura 2.6 el diagrama de flujo muestra el proceso de modelación utilizado, donde se observan los pasos que se siguieron para obtener los modelos sólidos. Este proceso fue repetido utilizando tres tamaños de celda diferentes y cuatro métodos de interpolación, de modo que se obtuvieron 12 modelos sólidos.

Tabla 2.1 Datos generales de los 37 pozos de desagüe correlacionados con su valor de RQD promedio y litología y alteración predominantes. Algunos pozos fueron eliminados para permitir el avance en la excavación del tajo y otros fueron abandonados debido a su baja productividad, de modo que actualmente se utilizan como pozos de observación.

Pozo	Prof. (m)	Prueba de bombeo (mes/año)	Caudal (l/s)	Abatimiento (m)	Valor de RQD promedio (%)	Litología predominante	Alteración principal
DW1	202	Jul-07	44	20	47	Brecha	CSPC-Fuerte
DW2	202	Sep-07	27	36	46	Lutita	CSPC-Moderada
DW4	201	Nov-07	30	59	43	Lutita	CSPC-Fuerte
DW5	193	Dic-07	2	42	93	Lutita	PC
DW6	201	Dic-07	37	22	72	Lutita	PC
DW10	400	Nov-09	20	252	63	Lutita	CSPC-Fuerte
DW11	401	Feb-09	20	203	81	Lutita	CSPC-Moderada
DW12	447	Nov-10	36	48	54	Lutita	CSPC-Fuerte
DW13	650	Jul-11	28	164	91	Brecha	CSPC-Fuerte
DW14	601	Dic-10	2	439	97	Lutita	CSPC-Baja
DW15	526	Sep-10	26	106	57	Lutita	CSPC-Fuerte
DW16	389	Dic-10	9	130	91	Lutita	CSPC-Moderada
DW17	503	Oct-11	32	8	94	Brecha	CSPC-Fuerte
DW18	503	Feb-11	24	89	97	Brecha	CSPC-Moderada
DW19	565	Nov-11	47	58	52	Lutita	CSPC-Fuerte
DW20	515	Ago-11	27	35	84	Brecha	CSPC-Fuerte
DW21	602	Ago-11	22	251	51	Lutita	CSPC-Fuerte
DW22	481	Nov-12	16	105	65	Lutita	CSPC-Baja
DW23	498	Oct-11	1	329	95	Lutita	PC
DW24	500	Oct-11	3	178	86	Lutita	PC
DW25	597	Oct-11	25	8	91	Brecha	CSPC-Fuerte
DW26	600	Nov-11	20	126	77	Lutita	CSPC-Fuerte
DW27	700	Ago-12	17	94	71	Lutita	CSPC-Fuerte
DW28	700	Mar-12	30	28	51	Lutita	CSPC-Fuerte
DW29	605	Mar-12	25	36	79	Lutita	CSPC-Baja
DW30	598	Feb-12	21	25	75	Lutita	CSPC-Moderada
DW31	721	Abr-12	11	160	92	Brecha	CSPC-Moderada
DW32	702	Abr-12	10	182	84	Lutita	CSPC-Moderada
DW33	693	Mar-12	27	172	56	Lutita	CSPC-Moderada
DW35	497	Feb-12	10	153	94	Brecha	CSPC-Fuerte
DW37	697	Jun-12	10	45	79	Lutita	CSPC-Fuerte
DW39	815	Jul-12	45	69	55	Lutita	CSPC-Fuerte
DW40	806	Jul-12	3	268	56	Lutita	CSPC-Fuerte
DW41	750	Jul-12	36	41	62	Lutita	CSPC-Moderada
DW42	828	Nov-12	36	30	58	Lutita	CSPC-Fuerte
DW44	760	Nov-12	27	33	64	Lutita	CSPC-Fuerte
DW45	756	Nov-12	35	23	52	Lutita	CSPC-Moderada

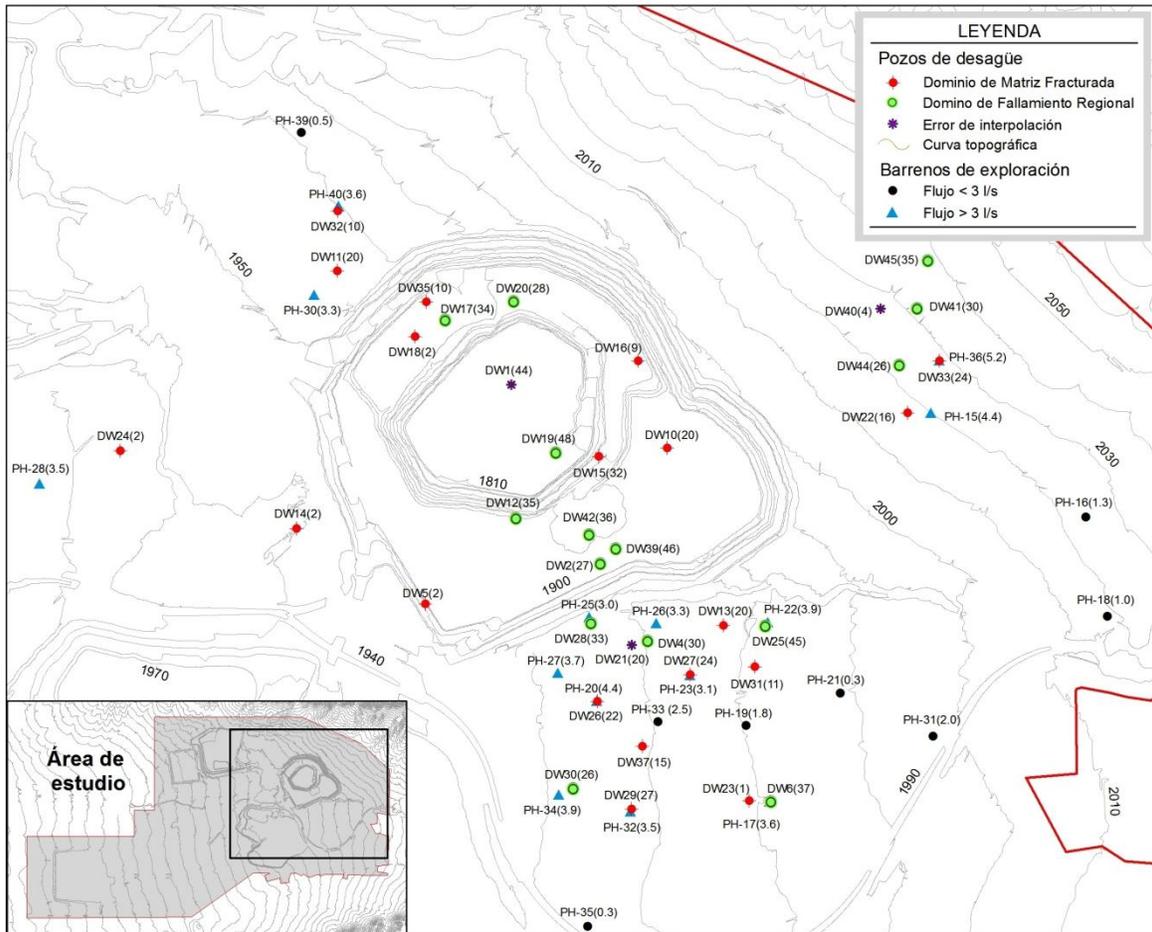


Figura 2.5 Localización de los pozos de desagüe utilizados para optimizar el modelo sólido de RQD. También se muestran los pozos piloto construidos para probar su aplicación. En paréntesis se indica el caudal inicial de cada pozo de desagüe, así como el caudal obtenido en la prueba de aire a presión en los pozos piloto. Además, se indica el dominio al cual pertenece cada pozo.

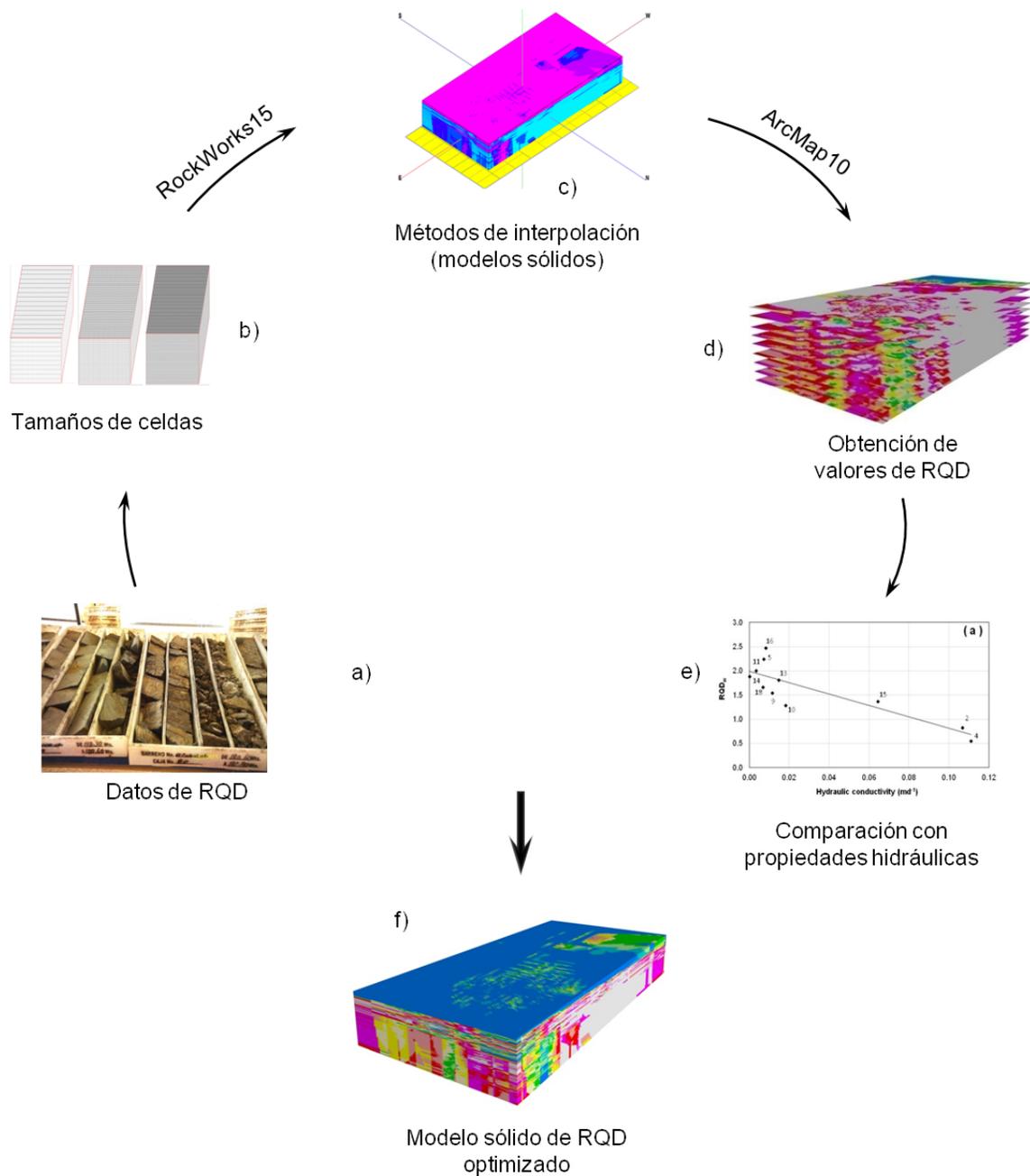


Figura 2.6 a-f Diagrama de flujo que muestra el proceso de modelación realizado para la obtención del modelo sólido de RQD: **a** Generación de la base de datos de RQD; **b** definición del tamaño de celda; **c** selección del método de interpolación e interpolación; **d** obtención del modelo sólido y extracción de valores de RQD por pozo; **e** comparación entre los resultados del modelo sólido en cada pozo con respecto a su conductividad hidráulica; **f** definición del modelo sólido de RQD optimizado. Este proceso fue repetido de **a** hasta **e**, utilizando tres tamaños de celda distintos y cuatro métodos de interpolación.

Una vez que los datos de los barrenos fueron introducidos en el programa, se definieron tres tamaños de celdas. La primera malla fue integrada con celdas de 250x250x50 m (10,584 celdas), con el fin de realizar pruebas iniciales. El segundo tamaño incluyó celdas de 100x100x20 m (163,800 celdas) considerando que la distancia mínima entre pozos que presentan diferente comportamiento hidráulico es de 128 m (pozos DW17 y DW18). Finalmente, se realizó un tercer tamaño de celda reduciendo la anterior a 50x50x10 m (1,301,040 celdas). Después de definir las dimensiones de la malla, se crearon los modelos sólidos mediante los métodos de interpolación de ponderación inversas a la distancia (anisotrópico y ponderado con respecto a la horizontal o vertical) y ponderación direccional (30° y 150 ° de azimuth).

El método del punto más cercano no se utilizó porque es más apropiado en casos en que se esperan cambios en los datos que no son graduales, y en este caso se espera un cambio gradual entre las zonas de alto y bajo RQD. Por otro lado, el método de distancia al punto no se utilizó porque asigna valores a los nodos equivalentes a la distancia al punto de control más cercano, de modo que se consideró que este método no sería útil para representar la heterogeneidad del acuífero. Por lo tanto, se utilizó el método de ponderación inversa a la distancia en modalidad de anisotropía pues utiliza el punto más cercano en cada sector a 90° alrededor de cada nodo. La modalidad de isotropía no se utilizó porque es útil cuando se modelan datos uniformemente distribuidos, el cual no es el caso del presente estudio. Adicionalmente, el método de ponderación con respecto a la horizontal y vertical se utilizó con el fin de probar si existe una tendencia del RQD con relación a las estructuras que son casi verticales, pues la inclinación de las fallas en el área tiende a ser de 75° a 90°. Finalmente, se utilizó también la ponderación direccional para probar el modelo con tendencias relacionadas con la dirección de las dos principales familias estructurales, cuyo azimuth es de 30° y 130°, respectivamente. Todos los modelos sólidos se crearon usando las mismas dimensiones definidas, y sin limitaciones (para obtener el modelo completo, sin espacios vacíos), sin filtrado (para obtener un modelo para todas la dimensión definida, incluyendo tanto valores altos como bajos) y sin opciones adicionales como suavizados.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Obtención de dominios hidroestructurales

El modelo sólido de RQD fue considerado como la base para la caracterización hidrogeológica del área, pues su relación con la conductividad hidráulica se basa en la teoría de que las zonas altamente fracturadas o falladas constituyen los conductos principales del flujo de agua subterránea (Caine y Forster 1999; Rogers 2003). Estas zonas pueden correlacionarse con un RQD bajo, de modo que el principio básico es que la permeabilidad de la roca se correlaciona de forma inversa con este atributo geológico (RQD).

Una vez que se completaron los modelos sólidos se obtuvieron vistas en planta con cortes a intervalos de 50, 20 y 10 msnm de acuerdo con las dimensiones de los tres tipos de malla utilizados. Estas vistas en planta se exportaron a un sistema de información geográfica (SIG) con el fin de correlacionar los resultados de cada modelo con otras características como geología, hidrología, estructuras e imágenes de satélite. Estas últimas han sido utilizadas en varios estudios hidrogeológicos (p. ej. Shaban et al. 2006). La Figura 2.7 muestra un ejemplo de un corte en planta correspondiente con la elevación 1800 msnm, donde los valores de RQD se muestran como porcentaje con una escala de color.

Para comparar los datos de RQD obtenidos de los modelos con los datos de las pruebas hidráulicas realizadas en los 37 pozos de desagüe, fue necesario definir un valor representativo del RQD para cada pozo utilizando los modelos generados. De este modo, el valor de RQD de cada pozo obtenido en cada vista en planta en cada elevación fue promediado considerando únicamente aquellos cortes que se encuentran dentro de la zona saturada de cada pozo, pues la conductividad hidráulica obtenida a partir de las pruebas de bombeo es un valor único que corresponde con la hidráulica de esta.

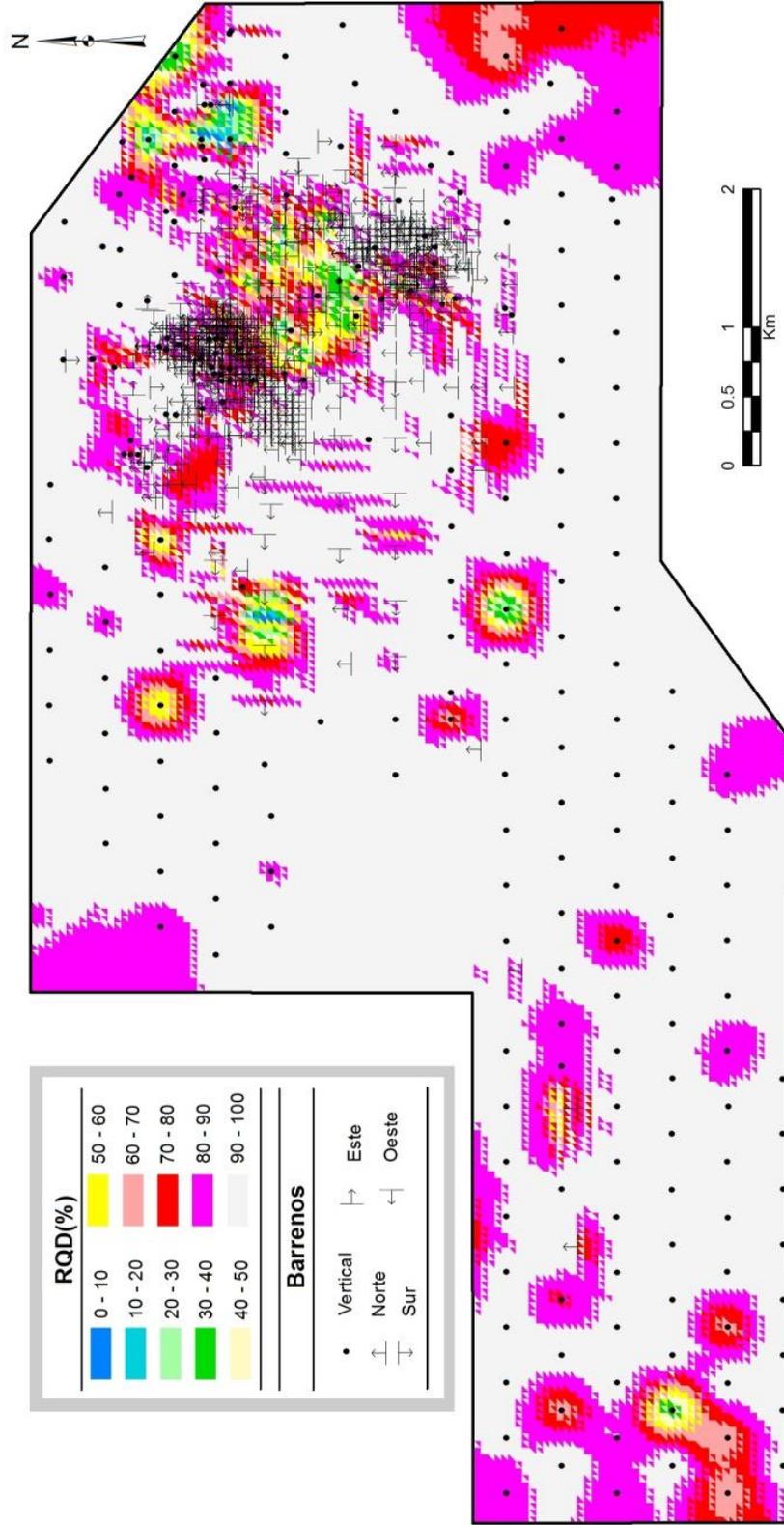


Figura 2.7 Distribución de los valores RQD del modelo sólido obtenido, en el corte horizontal correspondiente con la elevación 1800 msnm. La escala de color muestra los valores en porcentaje de RQD en intervalos de 10%, variando desde 0 (lo cual es asociable con una conductividad hidráulica alta) a 100% (asociado con una conductividad hidráulica baja). En la leyenda, 0-10 significa desde 0 hasta menos que 10. Además, se incluye la ubicación de los barrenos utilizados para la obtención del modelo, así como la dirección de los que son inclinados.

Para cada pozo se obtuvo un valor representativo de RQD y éste fue relacionado con su conductividad hidráulica respectiva obtenida a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo, mediante gráficas de dispersión. Este proceso se realizó con cada modelo obtenido con el fin de encontrar el tamaño de malla óptimo y el método de interpolación más apropiado. Como muestra la Figura 2.8, los resultados obtenidos inicialmente son poco prometedores debido a que el coeficiente de correlación (r) resultó ser < 0.14 . Por lo tanto, los resultados mostraron que en términos generales, la escala no es el principal factor que genera la poca correlación.

La baja correlación obtenida muestra que el RQD no puede relacionarse directamente con la conductividad hidráulica, de modo que es necesario realizar un análisis más profundo. Tratando de encontrar los factores que influyen directamente en la correlación, se analizó la evolución del nivel dinámico en los pozos activos, usando datos de Junio de 2011 a Diciembre de 2012. La Figura 2.9 muestra la evolución hidrodinámica de 27 pozos activos durante ese periodo en el área de estudio, donde se observa la presencia en general de dos dominios. Es evidente que los pozos que presentan una conductividad hidráulica $> 1.0 \times 10^{-6}$ m/s así como los mayores caudales (pozos DW12, 17, 19, 20, 25, 28, 30, 39, 41, 42, 44 y 45) presentan los niveles dinámicos con mayor elevación. Por otro lado, los pozos con conductividades hidráulicas $< 1.0 \times 10^{-6}$ m/s se encuentran relacionados con niveles dinámicos de menor elevación. Considerando esto, los 37 pozos se dividieron en dominio 1 (matriz fracturada) y dominio 2 (fallamiento regional), considerando como criterio de división su valor de conductividad hidráulica menor (dominio 1) o mayor (dominio 2) que 1.0×10^{-6} m/s.

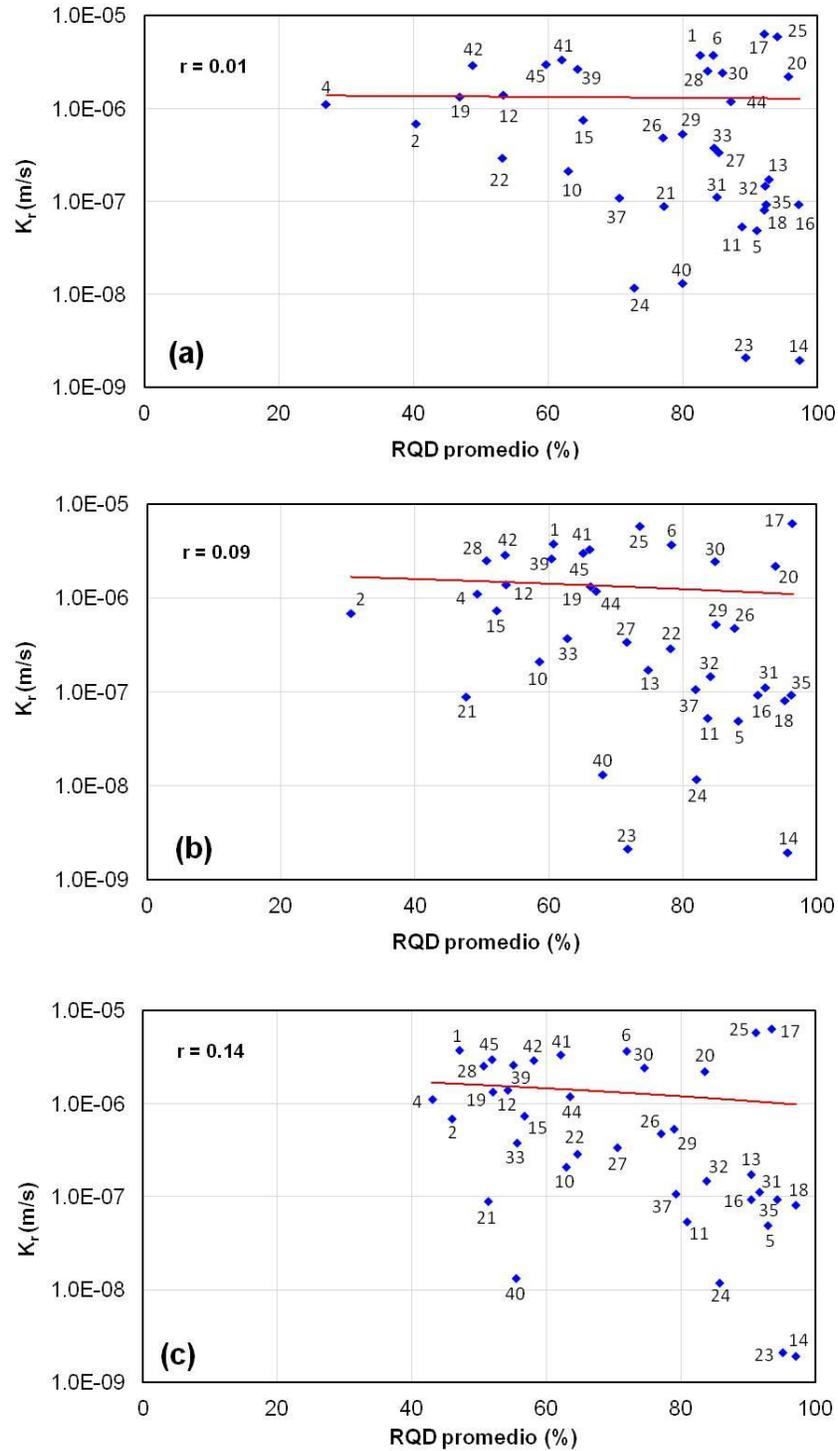


Figura 2.8 Correlación entre los valores de *RQD promedio* y la conductividad hidráulica de cada pozo (numerado) con respecto a los tres tamaños de malla utilizados, calculados para el área de estudio completa sin disgregar por grupos. Los tamaños de malla utilizados son: **a** 250x250x50 m, **b** 100x100x20 m, **c** 50x50x10 m. Las líneas de tendencia (líneas rojas) tienden a ser horizontales, lo que muestra una correlación muy escasa, que a la vez demuestra que el tamaño de la malla no es el principal factor que afecta a la correlación.

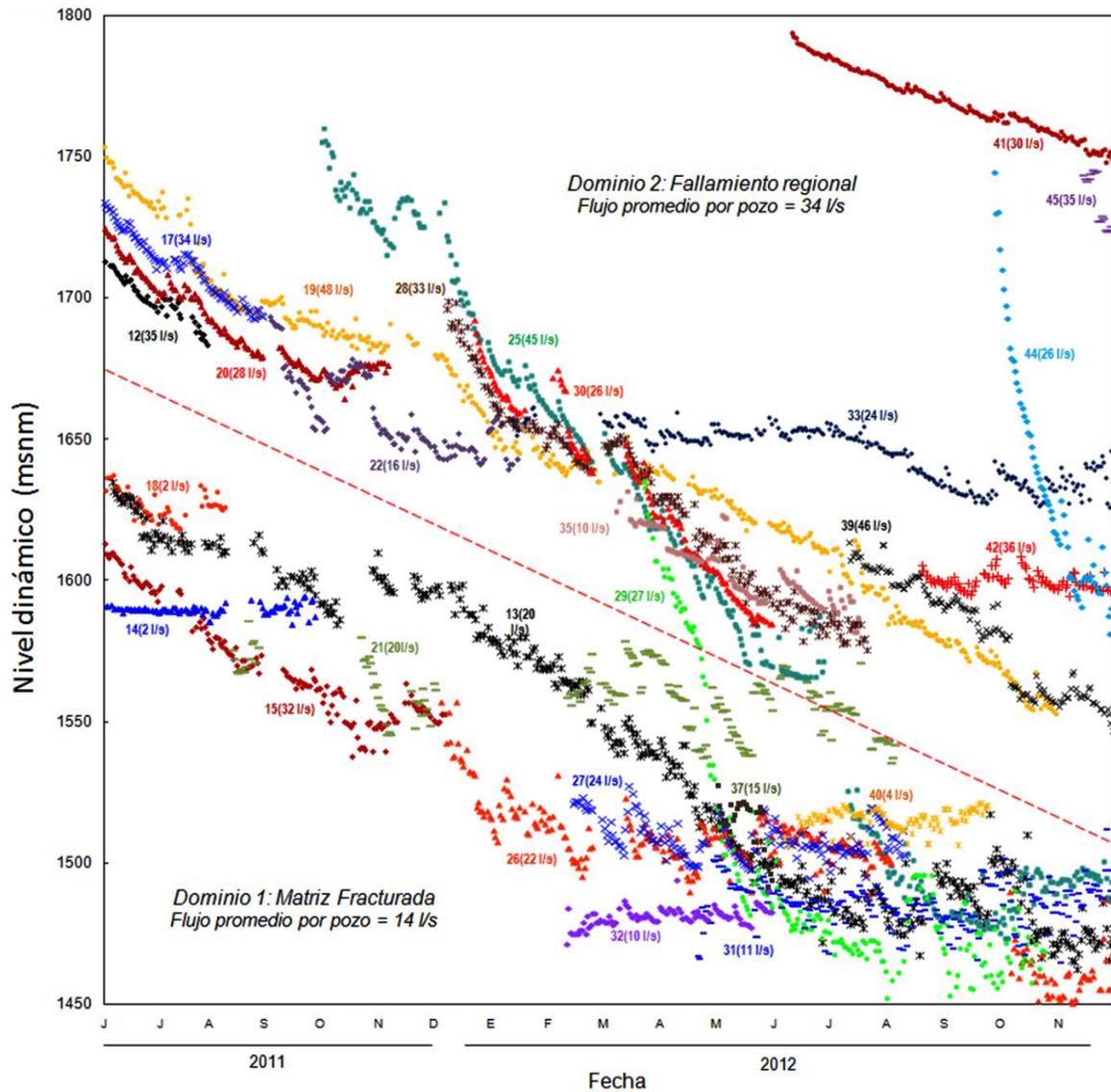


Figura 2.9 Evolución hidrodinámica de los pozos activos de Junio de 2011 a Diciembre de 2012 en el área de estudio. Se observa la presencia de dos dominios, los cuales se asume que corresponden con un dominio de matriz fracturada (*dominio 1*) y a un dominio de fallamiento regional (*dominio 2*), cuyo límite es representado de forma general por la línea segmentada color rojo. El caudal de cada pozo se muestra entre paréntesis.

2.4.2 Aplicación del modelo optimizado

El modelo de RQD optimizado se utilizó para ubicar, perforar y probar 22 pozos piloto como parte de un programa de exploración hidrogeológica realizado con el fin de encontrar fuentes de abastecimiento de agua para los usos de la mina y para desaguar el tajo. Estos pozos se localizaron principalmente en zonas con bajo RQD, de acuerdo con el modelo sólido optimizado. Sin embargo, algunos fueron perforados en zonas con alto RQD con el fin de intersectar algunas fallas inferidas a partir de mapas geológicos, que podrían ser de buen potencial hidrogeológico y que no fueron detectadas claramente en el modelo RQD.

Los pozos piloto fueron perforados a profundidad variable entre 383 y 603 m con un diámetro de perforación de 5.5 pulgadas (14 cm), mediante una máquina de circulación inversa. Una vez perforados, cada pozo fue probado mediante el método de aire a presión (air-lift), el cual se utiliza para estimar la capacidad de los pozos en acuíferos fracturados (p. ej. Henriksen y Braathen 2006). De acuerdo con Sterret (2007), esta prueba es útil para obtener una aproximación del potencial del pozo y es menos costosa que una prueba de bombeo convencional. Los atributos geológicos y resultados de las pruebas en los pozos pilotos se muestran en la Tabla 2.2.

2.4.3 Análisis de las propiedades hidráulicas

El análisis de los resultados de las pruebas de bombeo muestra valores de conductividad hidráulica que varían desde 1.9×10^{-9} a 6.3×10^{-6} m/s (Tabla 2.3). Los valores más altos se localizan principalmente dentro del tajo y hacia el sureste, manifestando una tendencia NW-SE, así como en la porción noreste del área de estudio. Por otro lado, los valores más bajos se encuentran principalmente en los alrededores del tajo. Los pozos incluidos en el dominio 1 presentan valores entre 1.9×10^{-9} y 7.4×10^{-7} m/s, con una media geométrica de 9.4×10^{-8} m/s. Los pozos que se relacionan con el dominio 2 presentan los valores de conductividad hidráulica más altos, variando de 1.2×10^{-6} a 6.3×10^{-6} m/s, con una media geométrica de 2.4×10^{-6} m/s.

Tabla 2.2 Atributos geológicos y resultados de las pruebas de aire a presión (air-lift) en los pozos piloto localizados mediante el modelo sólido de RQD optimizado.

Pozo piloto	Valor de RQD promedio	Caudal en la prueba (l/s)	Litología dominante	Alteración principal
PH15	4.5	4.4	Lutita	CSPC
PH16	3.6	0.3	Lutita	Sin alteración
PH17	6.8	3.6	Lutita	PC
PH18	4.3	1.0	Lutita	Sin alteración
PH19	7.6	1.8	Brecha, Intrusivo	Sin datos
PH20	5.5	4.4	Brecha	CSPC
PH21	6.8	0.3	Lutita	PC
PH22	5.6	3.9	Brecha	CSPC
PH23	5.6	3.1	Brecha, Intrusivo	Sin datos
PH25	3.8	3.0	Brecha	CSPC
PH26	3.4	3.3	Lutita	CSPC
PH27	3.1	3.7	Lutita	CSPC
PH28	3.0	3.5	Lutita	CSPC
PH30	7.2	3.3	Lutita	CSPC
PH31	5.8	2.0	Lutita	Sin alteración
PH32	5.5	3.5	Brecha, Intrusivo	Sin datos
PH33	4.8	2.5	Brecha, Intrusivo	Sin datos
PH34	5.7	3.9	Lutita	CSPC
PH35	5.8	0.3	Lutita	PC
PH36	3.8	5.2	Lutita	CSPC
PH39	6.8	0.5	Lutita	Sin alteración
PH40	6.2	3.6	Lutita	CSPC

PC = Pirita – Calcita; CSPC = Cuarzo – Sericita – Pirita – Calcita

Tabla 2.3 Datos hidráulicos de los 37 pozos de desagüe y métodos de interpretación utilizados.

Pozo	Caudal (l/s)	Abatimiento (m)	Transmisividad (m ² /s)	Conductividad Hidráulica (m/s)	Métodos de interpretación utilizados
DW1	44	20	1.9x10 ⁻³	3.8x10 ⁻⁶	1, 3, 4
DW2	27	36	3.4x10 ⁻⁴	6.9x10 ⁻⁷	1, 2, 3, 4
DW4	30	59	5.6x10 ⁻⁴	1.1x10 ⁻⁶	3, 4
DW5	2	42	2.4x10 ⁻⁵	4.9x10 ⁻⁸	1, 2, 4, 5
DW6	37	22	1.9x10 ⁻³	3.7x10 ⁻⁶	4, 6, 7
DW10	20	252	1.1x10 ⁻⁴	2.1x10 ⁻⁷	8
DW11	20	203	2.7x10 ⁻⁵	5.3x10 ⁻⁸	1, 4
DW12	36	48	6.9x10 ⁻⁴	1.4x10 ⁻⁶	1, 4, 5, 6
DW13	28	164	8.7x10 ⁻⁵	1.7x10 ⁻⁷	1, 5, 6
DW14	2	439	9.7x10 ⁻⁷	1.9x10 ⁻⁹	5
DW15	26	106	3.7x10 ⁻⁴	7.4x10 ⁻⁷	3, 5
DW16	9	130	4.6x10 ⁻⁵	9.3x10 ⁻⁸	2, 8
DW17	32	8	3.2x10 ⁻³	6.3x10 ⁻⁶	1
DW18	24	89	4.1x10 ⁻⁵	8.1x10 ⁻⁸	2, 6, 9
DW19	47	58	6.7x10 ⁻⁴	1.3x10 ⁻⁶	1, 5, 6
DW20	27	35	1.1x10 ⁻³	2.2x10 ⁻⁶	1, 5, 6
DW21	22	251	4.4x10 ⁻⁵	8.8x10 ⁻⁸	5, 6
DW22	16	105	1.5x10 ⁻⁴	2.9x10 ⁻⁷	2, 9
DW23	1	329	1.1x10 ⁻⁶	2.1x10 ⁻⁹	4, 5, 6
DW24	3	178	5.9x10 ⁻⁶	1.2x10 ⁻⁸	1, 3, 9
DW25	25	8	2.9x10 ⁻³	5.9x10 ⁻⁶	5, 6
DW26	20	126	2.4x10 ⁻⁴	4.8x10 ⁻⁷	3, 5, 6
DW27	17	94	1.7x10 ⁻⁴	3.4x10 ⁻⁷	1, 3, 5
DW28	30	28	1.3x10 ⁻³	2.5x10 ⁻⁶	3, 5, 6
DW29	25	36	2.7x10 ⁻⁴	5.3x10 ⁻⁷	9
DW30	21	25	1.2x10 ⁻³	2.4x10 ⁻⁶	5, 6
DW31	11	160	5.6x10 ⁻⁵	1.1x10 ⁻⁷	1, 2, 3, 9
DW32	10	182	7.3x10 ⁻⁵	1.5x10 ⁻⁷	1, 2, 5, 9
DW33	27	172	1.9x10 ⁻⁴	3.8x10 ⁻⁷	1
DW35	10	153	4.7x10 ⁻⁵	9.3x10 ⁻⁸	2, 3
DW37	10	45	5.4x10 ⁻⁵	1.1x10 ⁻⁷	2
DW39	45	69	1.3x10 ⁻³	2.6x10 ⁻⁶	1, 8, 9
DW40	3	268	6.6x10 ⁻⁶	1.3x10 ⁻⁸	1, 2, 9
DW41	36	41	1.7x10 ⁻³	3.3x10 ⁻⁶	2, 5, 6, 8
DW42	36	30	1.5x10 ⁻³	2.9x10 ⁻⁶	2, 3, 9
DW44	27	33	5.9x10 ⁻⁴	1.2x10 ⁻⁶	1, 3, 8, 9
DW45	35	23	1.5x10 ⁻³	3.0x10 ⁻⁶	2, 3, 4, 5, 6, 9

¹Moench para flujo en fracturas, ²Hantush, ³Hantush con almacenamiento, ⁴Boulton, ⁵Theis, ⁶Theis con corrección de Jacob, ⁷Neuman. ⁸Papadopulos y Cooper, ⁹Doble porosidad

2.4.4 Resultados del modelo sólido de RQD

La Figura 2.10 muestra la relación entre el RQD promedio obtenido a partir del modelo sólido y la conductividad hidráulica de los pozos en función de los tres tamaños de celdas definidos, considerando los dos dominios (matriz fracturada y fallamiento regional). Mediante la clasificación de los pozos en estos dominios, el coeficiente de correlación muestra una relación mucho mejor entre el RQD promedio y la conductividad hidráulica, la cual mejora con la malla más fina (Figura 2.10e, f). Al parecer, los pozos pertenecientes al dominio 2 incorporan la permeabilidad de un sistema de fracturas o una falla principal que el modelo de RQD por sí mismo, no alcanza a identificar.

Con respecto a los métodos de interpolación utilizados, se encontró que el proceso de interpolación es relativamente rápido con el método de ponderación inversa a la distancia en modo anisotrópico y ponderación inversa a la distancia usando una relación de carga 3 a 1 entre la horizontal y la vertical, mientras que para la ponderación direccional con dirección 30° y 150° azimutal, el proceso puede tomar varias decenas de horas en una computadora con buen procesador.

El proceso de optimización mostró que el método de ponderación inversa a la distancia en modo anisotrópico produce la mejor correlación con respecto a los dominios hidrogeológicos definidos. La correlación más baja para el dominio 1 se obtuvo en el método de ponderación inversa a la distancia con una relación 3 a 1 entre la horizontal y la vertical, mientras que para la ponderación direccional fue mejor a 30° de azimut que para 130°, y a su vez mostró ser tan buena como la interpolación de ponderación inversa a la distancia en modo anisotrópico (Tabla 2.4). No obstante, este último método, presenta mejor correlación con el dominio 2, de modo que este método con la malla más fina (50 m de ancho, 50 m de largo y 10 m de alto) se adoptaron como la base del modelo sólido optimizado, el cual se utilizó para el resto del análisis.

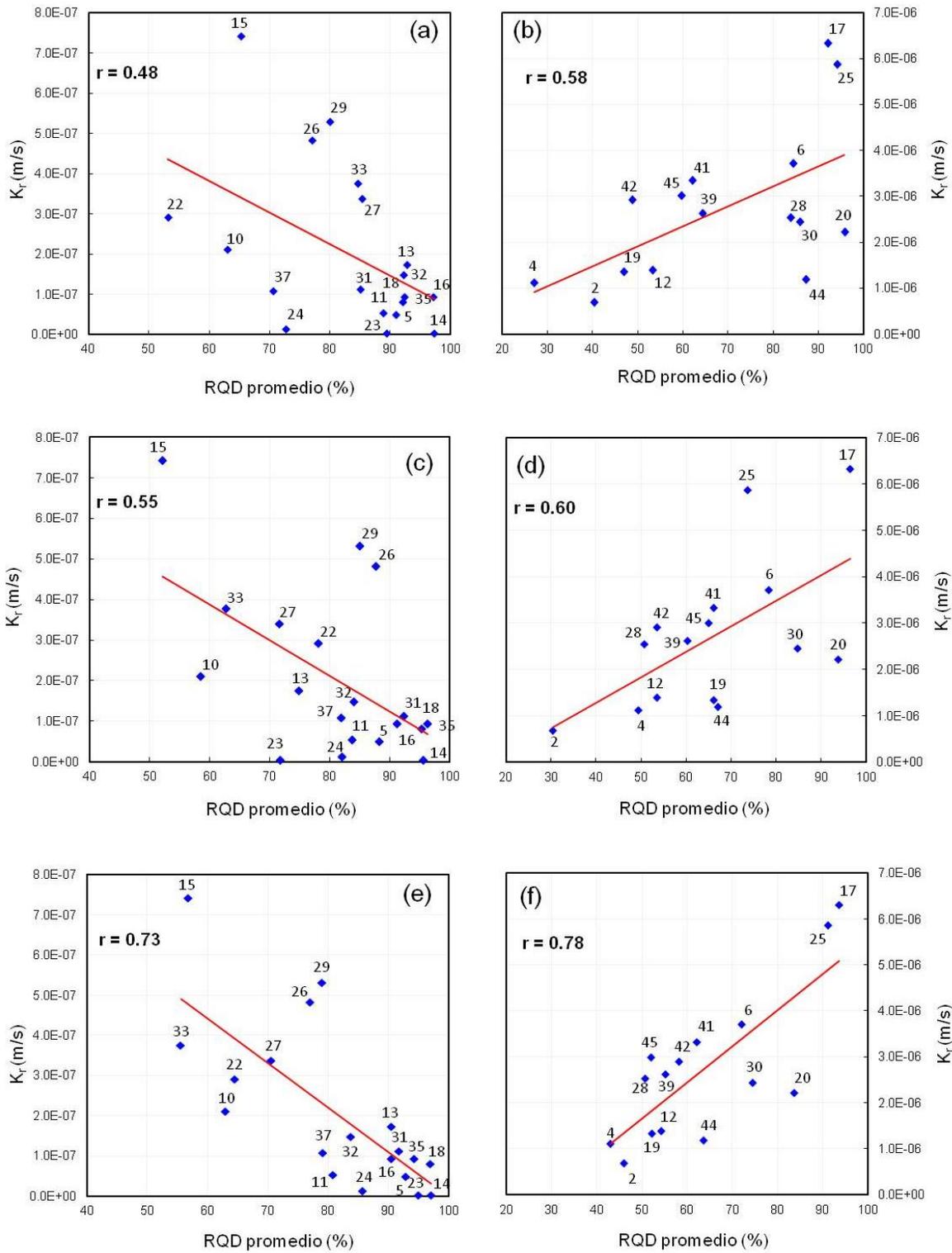


Figura 2.10 a-f Relación entre el RQD promedio obtenido del modelo sólido y la conductividad hidráulica de cada pozo (numerado) para los tres diferentes tamaños de celda de cada malla, considerando dos dominios hidrogeológicos. **a** y **b**, 250x250x50; **c** y **d** 100x100x20; **e** y **f** 50x50x10. *Panel izquierdo: dominio 1, panel derecho: dominio 2.*

Tabla 2.4 Comparación entre los métodos de interpolación utilizados para crear el modelo sólido de RQD, considerando los dos dominios hidrogeológicos identificados. El tamaño de malla utilizado para esta evaluación fue la más fina (50x50x10 m).

Método de interpolación	Coeficiente de correlación (<i>r</i>)	
	Dominio 1	Dominio 2
Ponderación inversa a la distancia – anisotrópico	0.73	0.78
Ponderación inversa a la distancia – relación 3 a 1 de la vertical con respecto a la horizontal	0.62	0.71
Ponderación direccional – 30° azimuth	0.73	0.72
Ponderación direccional – 130° azimuth	0.71	0.66

2.4.5 Análisis de los pozos piloto perforados

El análisis de las pruebas de aire a presión realizadas en los pozos piloto mostró resultados variables con relación al modelo sólido optimizado de RQD. La mayoría de los pozos presentaron buena productividad (más de 3 l/s), excepto los pozos PH19, 21, 31, 33, 35 y 39, localizados en zonas de alto RQD; y los pozos PH16 y 18, ubicados al este del área en zonas de bajo RQD. Para explicar estas diferencias, se estudiaron los cortes litológicos de cada pozo piloto. Se observó que los pozos que perforaron rocas poco competentes (lutitas de la Formación Caracol con alteración baja o inexistente), presentan los menores caudales, mientras los perforados en rocas competentes como lutitas con alteración media a fuerte, brecha o intrusivos, presentaron los caudales más altos (Figura 2.11). Esto es consistente con Tiab y Donalson (2004) quienes consideran que la respuesta dúctil (tendencia a plegarse) o frágil (tendencia a romperse) de las rocas es de gran importancia hidrogeológica. En este caso, las lutitas tienden a ser dúctiles, pero al estar moderada a fuertemente alteradas se vuelven frágiles. Esto probablemente se deriva del cuarzo que se presenta por la alteración CSPEC. De hecho, un indicativo importante para la definición del grado de alteración es el color de la roca, pues las lutitas sanas presentan colores gris oscuro, mientras las lutitas muy alteradas presentan color gris claro.

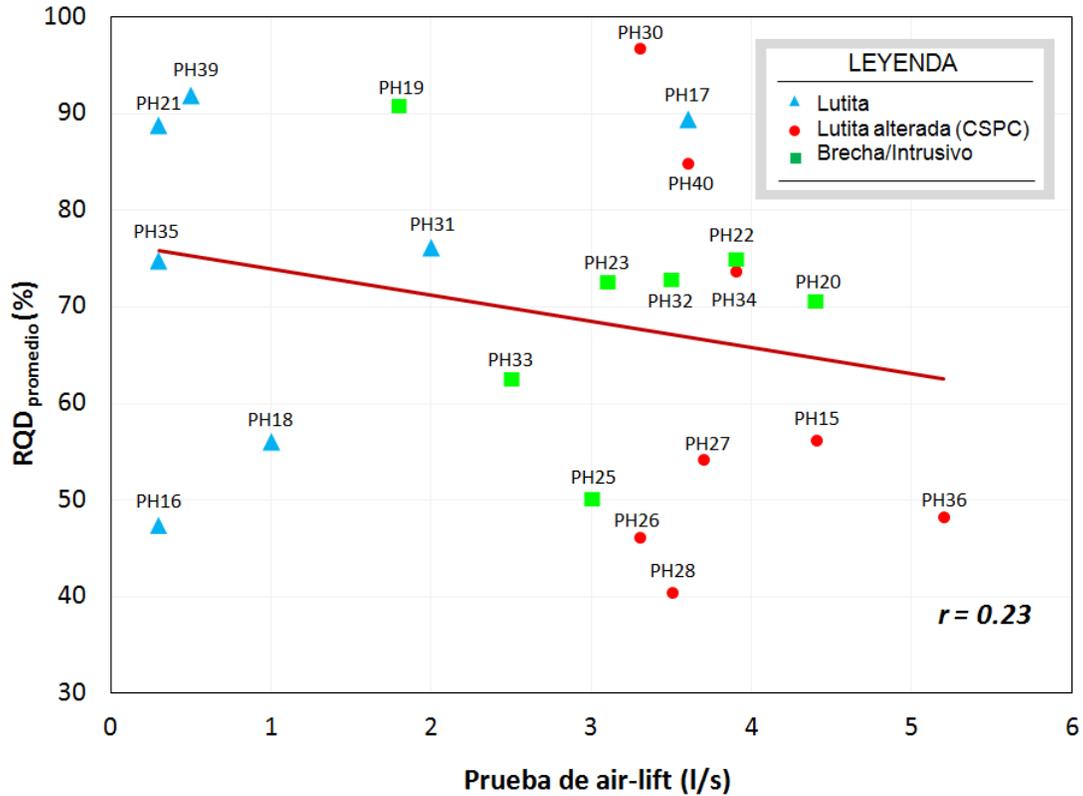


Figura 2.11 Gráfica de dispersión que muestra la correlación entre los valores de RQD promedio que se obtuvieron a partir del modelo sólido optimizado y el caudal obtenido en la prueba de aire a presión en cada pozo piloto perforado, incluyendo la litología y alteración dominantes en cada pozo. Se observa que los menores caudales corresponden con lutitas sin alteración.

Asimismo, los resultados son consistentes con los de Apaydın (2010), quien encontró que la permeabilidad de las fallas se encuentra influenciada, entre otros factores, por las propiedades geológicas como la naturaleza de la roca fallada. En rocas competentes, el fallamiento tenderá a crear zonas de alta permeabilidad, mientras que en rocas débiles e incompetentes, las fallas tenderán a rellenarse de material fino producto del rompimiento de la roca (Masset and Loew 2010; Henriksen and Braathen 2006) lo cual puede impedir el movimiento del agua. Por lo tanto, la Figura 2.9 muestra un bajo coeficiente de correlación ($r=0.23$) entre el modelo RQD y los caudales obtenidos en las pruebas de aire a presión realizadas en los pozos piloto.

Por otro lado, en la Figura 2.11 se podrían separar tres dominios hidrogeológicos para los cuales la correlación podría mejorar notablemente, pero no se tienen argumentos para justificar una separación de dominios. Esto puede implicar la necesidad de realizar un análisis más profundo del método de aire a presión, el cual se encuentra fuera de los objetivos del presente estudio, pues la prueba se utilizó sólo con fines cualitativos. En este sentido, lo que es claramente visible es una fuerte relación entre el caudal obtenido en las pruebas de aire a presión y la litología y alteración de las rocas, pues la mayoría de los pozos piloto asociados con lutita sin alteración presentan los valores más bajos (menores que 2 l/s), mientras que los valores más altos se asocian con lutita alterada, brecha e intrusivos (de 2 a 5.2 l/s).

2.4.6 Integración de atributos geológicos

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas hidráulicas en los pozos piloto, se construyeron dos modelos sólidos adicionales del mismo modo en que se construyó el modelo de RQD: uno para alteración y otro para litología. Para realizar esto, se convirtieron los datos descriptivos en valores cuantitativos para poderlos introducir e interpolar en el software RockWorks 15. Dado que la alteración varía desde roca inalterada, alteración PC, y alteración CSPC baja, media y fuerte, se asignaron valores de 0 a 4 de modo que la alteración aumenta con el número. Para la litología se utilizaron valores del 1 al 4 para correlacionarla con intrusivo, brecha, lutita (Formación Caracol) y calizas de la secuencia sedimentaria que subyace a la Formación Caracol (Tabla 2.5). Ambos

modelos fueron construidos utilizando la malla de 50x50x10 m, así como el método de ponderación inversa a la distancia con anisotropía, pues se comprobó que este método es el que proporciona la mejor correlación. Asimismo se aplicaron las mismas consideraciones que se usaron para generar el modelo sólido de RQD.

2.4.7 Potencial hidráulico relacionado a los atributos geológicos

Para visualizar y analizar los tres atributos geológicos juntos (RQD, litología y alteración), fue necesario generalizar la apariencia de los modelos de alteración y la litología. La Figura 2.12 muestra una vista en planta del RQD, litología y alteración obtenida a partir de los tres modelos generados para la capa con elevación de 1700 msnm (aproximadamente a 300 m de profundidad). Se incluyó la distribución de la conductividad hidráulica en los 37 pozos de desagüe. Los valores de RQD están indicados como porcentaje mediante una escala de color, y las zonas de alteración están definidas por líneas, dividiendo las zonas con alteración alta, moderada a baja y roca sin alteración. Para la litología, casi toda el área está constituida por lutita de la Formación Caracol, a excepción de dos zonas compuestas por brecha e intrusivo, que conforman las dos diatremas donde se encuentra principalmente la mineralización. Esas zonas están indicadas en la Figura 2.12 con líneas punteadas.

Se encontró que la mayoría de los pozos con alta conductividad hidráulica ($>5.0 \times 10^{-6}$ m/s) se localizan en brecha e intrusivo con altos valores de RQD. Por otro lado, los pozos con valores intermedios de conductividad hidráulica (de 1.0×10^{-7} a 5.0×10^{-6} m/s) se encuentran en zonas de lutita mediana a fuertemente alterada, con valores de RQD principalmente bajos. Por último, los pozos con los valores de conductividad hidráulica más bajos ($<1.0 \times 10^{-7}$ m/s) están en lutitas con alto RQD y moderada a baja alteración, con la excepción del pozo DW18 y DW35, ubicados en brecha e intrusivo con alto RQD. Estas correlaciones son consistentes con Jiang et al. (2010), quienes encontraron que estos factores, entre otros, generan la heterogeneidad de la permeabilidad en los acuíferos fracturados.

Tabla 2.5 Rango de valores utilizados en la interpolación de los modelos sólidos para cada atributo geológico y su significado.

Atributo geológico	Valor	Significado
RQD	0	Calidad de roca nula, roca muy fracturada
	100	Alta calidad de la roca, roca sin fracturas
Litología	1	Lutita
	2	Secuencia sedimentaria (calizas, calizas arcillosas)
	3	Brecha
	4	Intrusivo
Alteración	0	Roca sana, sin alteración
	1	Alteración PC (pirita – calcita)
	2	Alteración CSPC baja (Cuarzo, Sericita, Pirita, Calcita)
	3	Alteración CSPC media
	4	Alteración CSPC fuerte

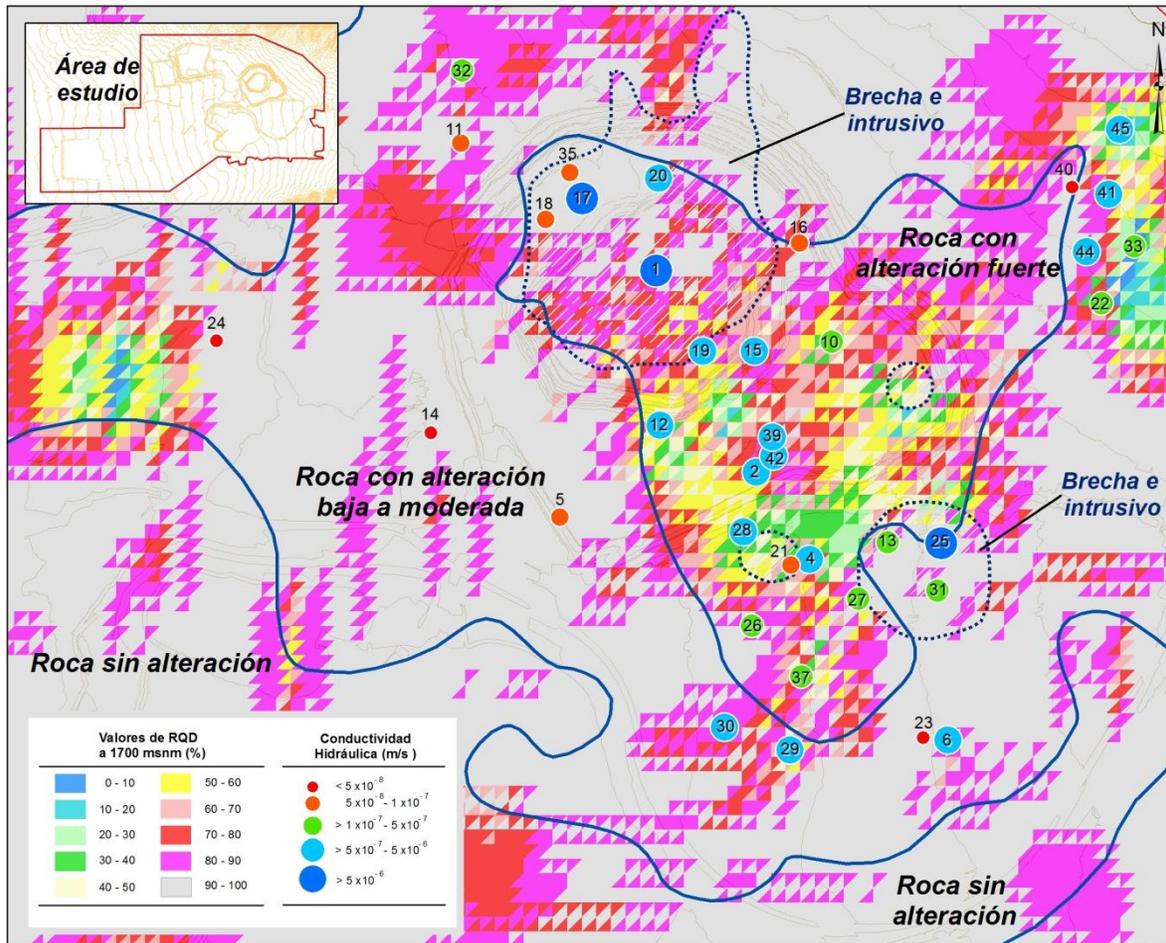


Figura 2.12 Sobreposición de los modelos de RQD, litología y alteración con relación a la conductividad hidráulica de los pozos de desagüe en vista de planta correspondiente con la elevación 1700 msnm. La *línea azul continua* divide el grado de alteración, mientras la *línea punteada* representa el contacto entre la brecha e intrusivo con la lutita. Es claro que la conductividad hidráulica tiende a disminuir con el aumento del RQD y cuando la alteración de la roca disminuye. Con respecto a la litología, la mayoría de los pozos que se encuentran en brecha e intrusivo tienden a presentar las conductividades hidráulicas más altas.

La Figura 2.13 muestra un esquema que resume los resultados obtenidos, considerando básicamente los datos hidráulicos relacionados con los valores de RQD, litología y alteración de las rocas del acuífero. Por lo tanto, este diagrama relaciona la conductividad hidráulica con el RQD y la competencia de la roca, de modo que un RQD bajo asociado con rocas competentes (brecha e intrusivo) puede presentar conductividades hidráulicas más altas que las resultantes de un RQD bajo asociado con rocas incompetentes (lutitas), las cuales en este caso de estudio pueden incrementar sus valores de conductividad hidráulica si presentan alteración CSPC, pues al parecer la alteración con cuarzo le confiere mayor competencia a la roca. Por lo tanto, los pozos en roca intrusiva, brecha o lutita (con grado de alteración moderado a fuerte), presentan buenos valores de conductividad hidráulica (en el presente estudio, mayor que 1.0×10^{-7} m/s), mientras que los pozos ubicados en lutitas sin alteración tienden a presentar valores muy bajos. Por otro lado, de acuerdo con el análisis, los pozos localizados en rocas con alto RQD pueden presentar tanto altos o bajos de conductividad hidráulica, por ejemplo los pozos DW17 y DW18, los cuales presentan los mismos atributos geológicos de acuerdo con los modelos generados. Esto significa que algunos pozos como el DW17, están relacionados con un sistema de fallas o fracturas de alta conectividad que el modelo de RQD no pudo detectar claramente, pero que se manifiesta en los pozos con valores de conductividad hidráulica mayor que 1.0×10^{-6} m/s.

De acuerdo con Berkowitz (2002), genéticamente el dominio 1 (matriz fracturada) puede relacionarse con fracturas derivadas de presiones de fluidos excesivas, y por acción química y térmica, mientras que el dominio 2 (fallamiento regional), además de presentar las fracturas del dominio anterior, es afectado por fallas generadas por eventos tectónicos de gran escala. De este modo, una red de fracturas puede consistir únicamente de una o de un número indistinguible de familias de fracturas (dominio 1), mientras que una familia de fallas consiste usualmente de dos o tres familias de fracturas (dominio 2). De acuerdo con Surrete et al. (2008), ambos dominios podrían ser llamadas *dominios hidroestructurales*.

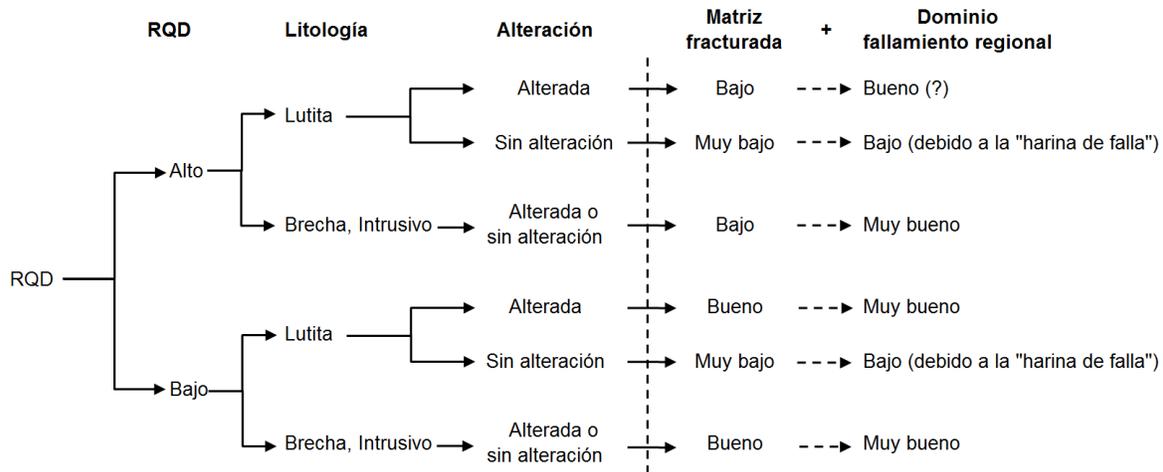


Figura 2.13 Esquema que muestra la metodología aplicada, la cual considera los datos hidráulicos de los pozos con relación a la información de RQD, litología y alteración de las rocas del acuífero. Un cuarto factor asociado, es la intersección con zonas de falla y fracturas de buena conectividad que el modelo de RQD no detecta claramente.

Dominio 1: dominio de matriz fracturada. Este dominio presenta una buena respuesta al modelo sólido de RQD, mejorando a medida que el tamaño de celda disminuye (Figura 2.9). En el presente estudio, los pozos correspondientes con este dominio se sitúan en roca sin alteración o con alteración moderada, principalmente lutita, y en algunos casos en intrusivo y brecha con alto RQD. La mayoría de los pozos incluidos en este dominio tienden a presentar baja conductividad hidráulica, con una media geométrica de 9.4×10^{-8} m/s, y por consiguiente, niveles dinámicos más profundos que los pozos del dominio 2 (Figura 2.9).

Dominio 2: dominio de fallamiento regional. Los pozos incluidos dentro de este dominio presentan los valores más altos de conductividad hidráulica (la media geométrica en el presente estudio es de 2.4×10^{-6} m/s) y por lo tanto presentan niveles dinámicos poco profundos con respecto a los pozos del dominio 1. De acuerdo con la hipótesis inicial de este estudio, estos pozos deberían presentar valores de conductividad hidráulica más baja, o menores valores de RQD, lo cual significa que su productividad es más alta de lo que el modelo sólido de RQD puede estimar. Esto es porque el modelo sólido de RQD sólo detecta zonas de roca fracturada, pero no define su interconexión, de modo que una zona de bajo RQD con un espesor de 3 a 10 m, podría corresponder con un fracturamiento local (matriz fracturada) o bien regional (fallamiento regional). De hecho, la relación con el RQD en este dominio es inversa con respecto al dominio 1 y por ende, respecto a la hipótesis inicial (Figura 2.9). Esto puede significar que una zona de falla puede desarrollar mayor conductividad hidráulica en una roca competente con un alto RQD, que en una roca poco competente. Este dominio se relaciona con zonas de falla con altas conductividades hidráulicas y bien interconectadas, probablemente con una tendencia estructural NE-SW y en menor proporción NW-SE. Estas fallas de gran extensión no son claramente visibles en el modelo sólido de RQD, de modo que fueron inferidas mediante imágenes de satélite, donde son claramente visibles. Esta técnica es ampliamente utilizada para identificar grandes estructuras dado que es un método de bajo costo, no destructivo y no invasivo que puede utilizarse en regiones semiáridas (Zeeb et al. 2010) como la presente en el área de estudio, y para mejorar la modelación (Brunner et al. 2007).

En el presente caso de estudio, la conductividad hidráulica de cada pozo en términos generales muestra el dominio al cual pertenece. Esto implica que aquellos pozos ubicados en el dominio 1 (matriz fracturada) se asocian principalmente con roca que presenta cierto grado de fracturamiento (medido de forma cuantitativa mediante el RQD) y cierto grado de alteración, presentando niveles dinámicos más profundos que el segundo dominio. Los pozos que presentan los niveles dinámicos menos profundos, presentan los valores más altos de conductividad hidráulica debido a las zonas de falla que intersectan. Por otro lado, tres pozos no pudieron ser identificados con uno de los dominios (DW1, 21 y 40), de modo que fueron asociados con errores de interpolación del modelo de RQD.

2.4.8 Modelo hidrogeológico conceptual

En la Figura 2.14 se muestra el modelo hidrogeológico conceptual simplificado del área de estudio, el cual incluye el área del tajo y la forma general de las diatremas que forman el cuerpo mineral en actual explotación. Las diatremas son conductos volcánicos de forma generalmente cónica, formados por explosiones de gases (Laznicka 2006; Moon et al. 2006). Esas explosiones son causadas por el material intrusivo en su ascenso a través de zonas de debilidad de la corteza terrestre (fallas o fracturas), de modo que al entrar en contacto con la zona saturada y debido a la presencia de gases, producen las explosiones que fragmentan la roca encajonante (en este caso lutitas de la Formación Caracol), formando brechas de varios tipos. Los fluidos mineralizantes y el intercambio de calor entre la roca encajonante y el material intrusivo generan un halo de diferentes tipos y grados de alteración, siendo la más importante en la zona de estudio la alteración cuarzo-sericita-pirita-calcita.

Como consecuencia, el acuífero está formado por una gran variedad litológica cuya respuesta ante los procesos tectónicos que han afectado la región, ha producido grandes contrastes en la conductividad hidráulica del área. Las rocas competentes fracturadas por los procesos tectónicos son favorables para la circulación del agua subterránea, pues tienden a romperse (brechas, intrusivos, lutitas con alteración moderada a fuerte), mientras que las incompetentes tienden a plegarse (lutitas y calizas). En el caso de las lutitas, si se rompen tienden a generar arcilla, la cual disminuye drásticamente su permeabilidad.

La dirección del flujo de agua subterránea en el acuífero es hacia el centro del tajo, debido al efecto producido por los pozos de desagüe. La recarga al acuífero se realiza en los piedemonte de las sierras de los alrededores, principalmente a través de las zonas de fallas, pues en el centro predomina la Formación Caracol de baja conductividad hidráulica, la cual puede actuar como acuitardo en conjunto con los depósitos aluviales que presentan un alto contenido de arcilla. La fluctuación actual del nivel de agua en el acuífero se deriva de sus diferencias en la conductividad hidráulica y del efecto de los pozos en operación.

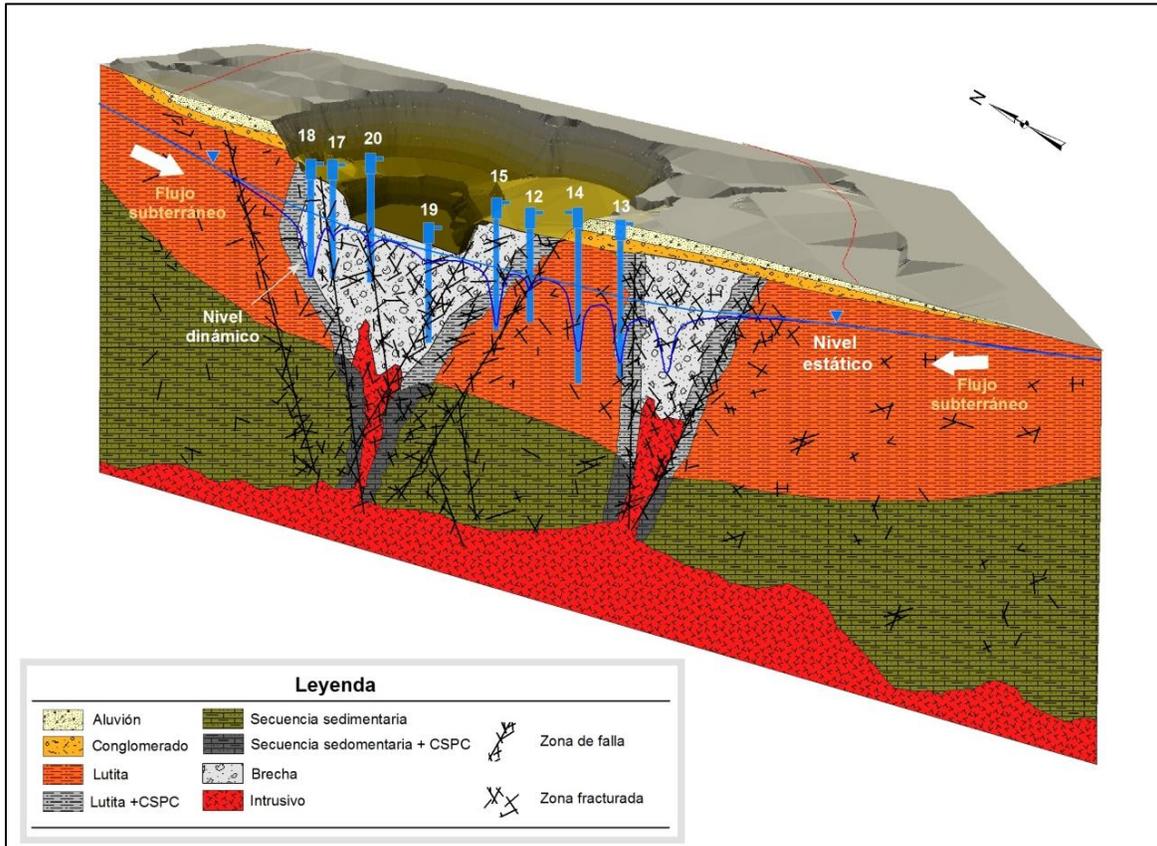


Figura 2.14 Modelo hidrogeológico conceptual para el área de estudio. Se muestran la forma del tajo, así como su contorno final en superficie. También se muestra la forma del flujo de agua subterránea causado por el bombeo de los pozos de desagüe, los cuales presentan diferente comportamiento en el nivel dinámico derivado de sus valores de conductividad hidráulica, de acuerdo con el dominio hidroestructural al que pertenecen.

2.5 Conclusiones

La base del modelo conceptual parte del modelo sólido de RQD, cuyo proceso de optimización mostró que la malla con menor tamaño de celda produce la mejor correlación, así como el método de ponderación inversa a la distancia, en modalidad de anisotropía. La comparación de los resultados muestra que el comportamiento hidrodinámico en el área presenta una respuesta derivada de la conductividad hidráulica resultante de la intersección de los pozos con zonas de falla o fracturas. No obstante, el presente estudio no puede concluir que el tamaño de celda y el método de interpolación utilizados son los apropiados para otras localidades, de modo que para su aplicación en otras áreas deberán probarse otros métodos y tamaños de celdas, de acuerdo con la información disponible en cada caso particular.

Debido a la alta heterogeneidad que caracteriza los acuíferos fracturados, es necesario considerar todos los factores que puedan ayudar a comprender el comportamiento hidrogeológico en cada zona en estudio. El presente caso de estudio mostró que el utilizar únicamente los valores de RQD puede llevar a cometer errores en la prospección hidrogeológica. Por lo tanto, el RQD debe utilizarse en combinación con otras características del acuífero disponibles, como litología y alteración de las rocas que lo forman, información estructural, piezometría, etc. La integración de esta información geológica comúnmente disponible en cualquier proyecto minero, puede convertirse en información hidrogeológica útil para integrar modelos conceptuales y por lo tanto, caracterizar apropiadamente a los acuíferos fracturados presentes en cada zona.

Los resultados obtenidos proporcionan un marco de referencia muy importante para identificar las características principales que controlan la hidrodinámica global de un acuífero fracturado. La determinación de los factores y mecanismos que controlan el flujo en los sistemas naturales fracturados es de vital importancia para predecir el flujo de agua subterránea y los impactos en la calidad del agua en estos ambientes. Por lo tanto, es necesario realizar más análisis de este tipo para lograr una mejor comprensión del desagüe en una mina a cielo abierto y de las fuentes de abastecimiento de agua en los acuíferos fracturados.

2.6 Referencias

- Apaydin A (2010) Relation of tectonic structure to groundwater flow in the Beypazari region, NW Anatolia, Turkey. *Hydrogeol J* 18:1343-1356
- Bear J (1972) *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York. In: Scesi L, Gattinoni P (2009) *Water circulation in rocks*. Springer, 165 p
- Berkowitz B (2002) Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. *Adv in Water Resour* 25: 861-884
- Bieniawski, Z.T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. In: Hoek E, Kaiser P, Bawden W (eds) *Support of underground excavations in hard rock*. Mining Research Directorate and Universities Research Incentive Fund
- Bredehoeft J (2005) The conceptualization problem – surprise. *Hydrogeol J* 13:37-46
- Brunner P, Hendricks F, Kgotlhang L, Bauer-Gottwein P, Kinzelbach W (2007) How can remote sensing contribute in groundwater modeling?. *Hydrogeol J* 15:5-18
- Caine JS, Forster CB (1999) Fault zone architecture and fluid flow: insights from field data and numerical modeling. In: Apaydin A (ed) *Relation of tectonic structure to groundwater flow in the Beypazari region, NW Anatolia, Turkey*. *Hydrogeol J* 18:1343-1356
- Deere D (1964) Technical description of rock cores for engineering purposes. In: US Army Corps of Engineers (eds) *Rock Foundations*, Washington, DC, November 1994
- de Marsily G, Delay F, Gonçalves J, Renard P, Teles V, Violette S (2005) Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeol J* 13:161-183
- Domenico P, Schwartz F (1990) *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & Sons, Inc. 824 p
- Driscoll F (1987) *Groundwater and wells*, Johnson division, St. Paut, Minnesota, 1089 p
- Freeze R, Cherry J (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 604 p
- Fetter C (1994) *Applied hydrogeology*. Third edition, Prentice-Hall Inc. New Jersey, 691 p
- Gudmundsson A (2000) Active fault zones and groundwater flow. *Geophys Res Lett* 27(18):2993-2996
- Henriksen H, Braathen A (2006) Effects of fracture lineaments and in-situ rock stresses on groundwater flow in hard rocks: a case study from Sunnfjord, western Norway. *Hydrogeol J* 14: 444-461

- Jiang XW, Wang XS, Wan L (2010) Semi-empirical equation for the systematic decrease in permeability with depth in porous and fractured media. *Hydrogeol J* 18:839-850
- Kruseman G, de Ridder N (1990) Analysis and evaluation of pumping test data. Second edition, International Institute for Land Reclamation and improvements, Wageningen, Netherlands, 377 p
- Laznicka P (2006) Giant metallic deposits. Springer-Verlag, 732 p
- Lemieux J, Therrien R, Kirkwood D (2006) Small scale study of groundwater flow in a fractured carbonate-rock aquifer at the St-Eustache quarry, Québec, Canada. *Hydrogeol J* 14:603-612
- Masset O, Loew S (2010) Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland. *Hydrogeol J* 18:863-891
- Moon C, Whateley M, Evans A (2006) Introduction to mineral exploration, 2nd edn. Blackwell publishing, 481 p
- Poteri A (2009) Retention properties of flow paths in fractured rock. *Hydrogeol J* 17:1081-1092
- Rogers S (2003) Critical stress-related permeability in fractured rocks. *Geol Soc, London, Spec Pub*, 209, 7-16
- Sander P (2007) Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations. *Hydrogeol J* 15:71-74
- Scesi L, Gattinoni P (2009) Water circulation in rocks. Springer, 165 p
- SGM (2004a) Carta Geológico-Minera Cedros G14-C61. Primera Edición, Servicio Geológico Mexicano.
- SGM (2004b) Carta Geológico-Minera Concepción del Oro G14-C62. Primera Edición, Servicio Geológico Mexicano.
- Shaban A, Khawlie M, Abdallah C (2006) Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeol J* 14:433-443
- Shingal B, Gupta R (1999) Applied hydrogeology of fractured rocks. Kluwer academic publishers, 400 p
- Sterret R (2007) Groundwater and wells. Johnson screens, New Brighton MN
- Surrete M, Allen D, Journeay M (2008) Regional evaluation of hydraulic properties in variably fractured rock using a hydrostructural domain approach. *Hydrogeol J* 16:11-30

- Tiab D, Donaldson E (2004) *Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*: Elsevier, second ed., Chap. 8.
- Tweed S, Weaver T, Cartwright I (2005) Distinguishing groundwater flow paths in different fractured-rock aquifers using groundwater chemistry: Dandenong Ranges, southeast Australia. *Hydrogeol J* 13:771-786
- Younger P, Robins N (2002) Challenges in the characterization and prediction of the hydrogeology and geochemistry of mined ground. *Geol Soc Lond Spec. Publ* 198:1-16
- Zeeb C, Göckus D, Bons P, Al Ajmi H, Rausch R, Blum P (2010) Fracture flow modeling based on satellite images of the Wajid Sandstone, Saudi Arabia. *Hydrogeol J* 18:1699-1712

CAPÍTULO III

Obtención de la conductividad hidráulica en función de los atributos geológicos de un acuífero fracturado

3.1 Introducción

En el área de estudio, el grado de fracturamiento fue definido cuantitativamente en función del RQD. Por otro lado, se comprobó que efectivamente la respuesta dúctil o frágil en las rocas de acuerdo a su litología presenta influencia directa sobre los parámetros hidráulicos (Tiab y Donalson 2004). Asimismo, se encontró que esta respuesta ante la deformación también está en función de la alteración de la roca, de modo que una roca con alteración media a fuerte, al fracturarse presenta propiedades hidráulicas distintas a la misma roca sana (Herrera y Garfias 2013).

Anteriormente se generaron los modelos sólidos de RQD, alteración y litología para caracterizar la hidrodinámica del área del tajo, obteniendo para cada celda un valor cuantitativo de cada parámetro. En el presente capítulo se describirá la forma en que esos valores geológicos fueron correlacionados con la información hidráulica obtenida de las pruebas de bombeo con el fin de obtener ecuaciones representativas aplicables a cada celda y así determinar su conductividad hidráulica para aplicarla al modelo matemático. De este modo, se facilita la calibración del modelo al fijar los valores de conductividad hidráulica, variando así los parámetros de almacenamiento principalmente. La propuesta de este

proceso fue correlacionar los resultados de las pruebas de bombeo, que son la herramienta principal para manejar la heterogeneidad en los acuíferos (de Marsily 2005) con las propiedades geológicas del medio, de modo que la conductividad hidráulica en cada celda se encuentra en función de los parámetros geológicos de cada una obtenidos a partir de método de interpolación de cargas inversas a la distancia.

3.2 Metodología

3.2.1 Conductividad hidráulica para el dominio matriz fracturada

El RQD es una estimación empírica del grado de fracturamiento de la roca (Scesi y Gattinoni 2009). Por lo tanto, un RQD bajo puede corresponder con una zona fracturada o de falla a profundidad, de modo que los valores mínimos de este parámetro pueden representar una zona permeable en la roca. En este sentido, la conductividad hidráulica se consideró inversamente proporcional al valor de RQD, y fue estimada inicialmente tomando como base este atributo geológico, y ajustada considerando los dos factores geológicos restantes (Figura 3.1).

Para realizar este análisis se determinó una ecuación general para mostrar la relación del valor de RQD promedio obtenido a partir del modelo sólido, con su conductividad hidráulica real determinada a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo (Figura 3.1a y b), es decir $K = f(RQD)$. No obstante, en el capítulo anterior se demostró la coexistencia de dos dominios hidroestructurales: matriz fracturada y fallamiento regional, de modo que fue necesario realizar una clasificación preliminar de cada pozo de acuerdo al dominio al que pertenecen (Herrera y Garfias, 2013). Para realizar esta clasificación de forma más precisa, se aplicó la ecuación general a cada pozo y se graficaron los residuales entre la conductividad hidráulica real y la obtenida mediante la ecuación general (Figura 3.1c). Se consideró que los pozos con los valores más cercanos a cero, responden aceptablemente bien a la ecuación general y por lo tanto, son asociables al dominio de matriz fracturada. Por otro lado, los pozos cuyo residual es mayor que cero, muestran que su conductividad hidráulica calculada es mucho menor a la real, lo cual se puede explicar con la asociación de estos pozos con una zona de falla de mayor conductividad hidráulica,

por lo tanto, se considera que estos pertenecen al dominio de fallamiento regional. Por último, algunos pozos presentaron residuales negativos, lo cual indica que su conductividad hidráulica estimada es mayor que la real. Entonces, se consideraron como inconsistentes con ambos dominios, y por consiguiente no correlacionables con los resultados de los modelos sólidos, cuya falta de correlación es atribuible a un error de interpolación del modelo derivado de la falta de datos o del método de interpolación en sí.

Para determinar el rango de tolerancia representativo y así clasificar con mayor precisión a los pozos en uno de los dominios estructurales, se realizaron varias estimaciones haciendo el rango cada vez mayor (Figura 3.1d). En cada una de ellas, los pozos identificados como relacionados con el dominio de matriz fracturada (Figura 3.1e) se clasificaron en tres grupos de acuerdo con su litología y grado de alteración (Figura 3.1f). El primer grupo fue conformado por pozos con predominio de brecha, incluyendo cualquier grado de alteración. El segundo grupo fue formado por pozos perforados en lutitas con alteración nula, alteración PC y CSPC baja; y el tercero lo conformaron los pozos con predominio de lutitas con grado de alteración CSPC moderada a fuerte. No obstante, dentro de los grupos definidos el rango de valores de RQD no se incluyen valores en los extremos (0 y 100 %). Se comprobó que esto puede originar inconsistencia al aplicar las ecuaciones obtenidas con respecto a los rangos de valores definidos en bibliografía y por consiguiente con el modelo conceptual. Por lo tanto, en los tres grupos se consideraron los valores extremos a obtenerse de acuerdo con los rangos de valores obtenidos a partir de bibliografía (Shingal y Gupta, 1999). Los valores extremos del primer grupo se asociaron con los valores para rocas cristalinas fracturadas e intemperizadas, mientras que los del segundo grupo se asociaron con los valores para lutitas y limolitas (Tabla 3.1). El tercer grupo se asoció con los valores de rocas cristalinas al igual que el primero, pues el efecto observado de la alteración CSPC, es que le confiere mayor competencia a las lutitas lo que las vuelve susceptibles a romperse y crear zonas de mayor permeabilidad, en vez de rellenarse con materiales finos que impiden el movimiento del agua, característica más asociable con rocas cristalinas que con lutitas (Herrera y Garfías, 2013).

Una vez obtenidas las ecuaciones representativas de cada grupo (Figura 3.1g) correspondientes con el primero rango de tolerancia seleccionado, se realizó seis veces más el procedimiento desde la definición de un nuevo rango (Figura 3.1d) hasta la obtención de las ecuaciones (Figura 3.1g), obteniendo un total de 18 ecuaciones. Finalmente, se seleccionó el conjunto de ecuaciones más representativas para el desarrollo del modelo matemático (Figura 3.1h).

La correlación entre las conductividades hidráulicas reales y las calculadas por medio de las ecuaciones decrece en la medida que el rango de tolerancia aumenta, de modo que este fue uno de los criterios de selección para las ecuaciones finales. No obstante, en la selección y calibración fue prioritario el cumplimiento de la ecuación para la estimación de los valores de conductividad hidráulica de las celdas formadas por lutitas con RQD > 90% y con alteración nula a baja, pues estas celdas son las predominantes en el modelo matemático, de modo que éste es extremadamente sensible a la ecuación obtenida para el segundo grupo.

Tabla 3.1 Valores extremos de conductividad hidráulica utilizados como apoyo en la definición de las ecuaciones para obtención de la conductividad hidráulica para cada celda del modelo matemático en función de sus atributos geológicos, aplicada a pozos pertenecientes al dominio matriz fracturada. Para fines prácticos de nomenclatura, se incluye una abreviatura para cada grupo.

Grupo de pozos	Abreviatura utilizada	Valor de K (m/s)		Descripción litológica correspondiente (Shingal y Gupta 1999)
		(Shigal & Gupta 1999)		
		Mínima (100% de RQD)	Máxima (0% de RQD)	
Brecha-Intrusivo, todos los grados de alteración	BI	3×10^{-9}	1×10^{-4}	Roca cristalina fracturada e intemperizada
Lutita, alteración nula (0), PC (1) y CSPC baja (2)	LAB	9×10^{-11}	3×10^{-9}	Lutita y limolita fracturada
Lutita, alteración CSPC moderada (3) y fuerte (4)	LAA	3×10^{-9}	1×10^{-4}	Roca cristalina fracturada e intemperizada

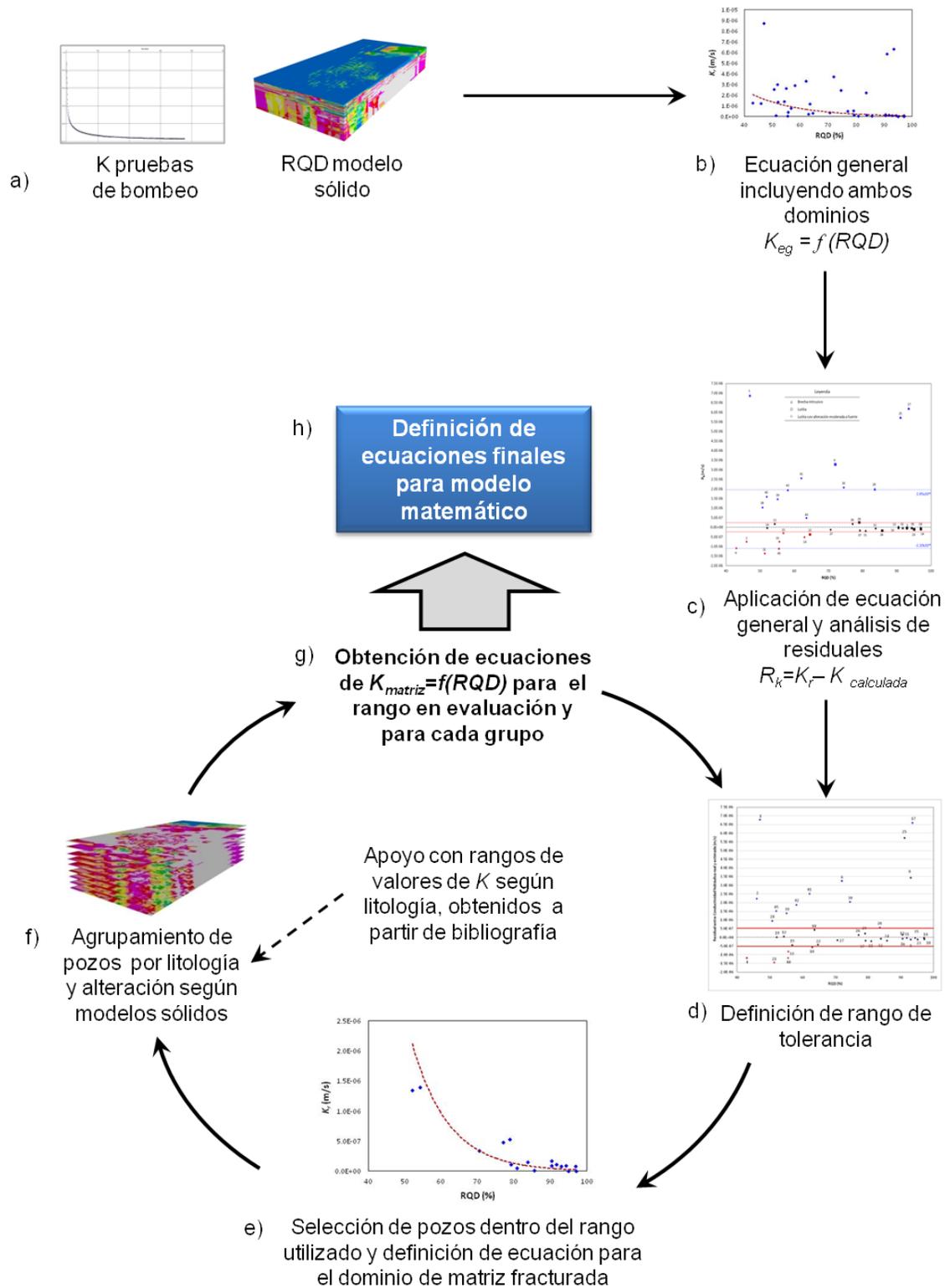


Figura 3.1 Diagrama de flujo que muestra el procedimiento utilizado para la definición de las ecuaciones utilizadas para convertir la información generada por los modelos sólidos de RQD, litología y alteración a valores de conductividad hidráulica para cada celda del modelo matemático.

3.2.2 Conductividad hidráulica para el dominio fallamiento regional

De acuerdo con el modelo conceptual, las zonas de falla podrían considerarse como un estrato con una conductividad hidráulica mucho mayor con respecto a la roca circundante. Con la información de los modelos sólidos y las ecuaciones obtenidas se obtuvo la conductividad hidráulica en capas a intervalos de cada 10 m para cada pozo. Conceptualmente, dentro de esas capas se encuentra por lo menos una zona de falla en los pozos definidos dentro del dominio de fallamiento regional, de modo que al menos una de las capas deberá presentar la conductividad hidráulica de la falla (Figura 3.2).

Para estimar la conductividad hidráulica en las zonas de falla, de forma análoga a un acuífero estratificado, se consideraron capas horizontales y flujo horizontal. La ecuación base utilizada que relaciona el espesor saturado con la conductividad hidráulica es (Roscoe Moss Company 1990):

$$K_{promedio} = \frac{K_1 b_1 + K_2 b_2 + \dots + K_n b_n}{b_1 + b_2 + \dots + b_n} \quad (1)$$

donde $K_{promedio}$ (L/T), será considerada equivalente a la conductividad hidráulica real en cada pozo (K_r), obtenida en las pruebas de bombeo; $K_1, K_2 \dots K_n$, corresponden con la conductividad hidráulica obtenida para cada capa del modelo al aplicar las ecuaciones correspondientes, siendo n el número de capas, con espesores saturados $b_1, b_2 \dots b_n$ (L).

Dado que en los pozos correspondientes con el dominio de fallamiento regional se considera que la zona de falla se encuentra en una de las capas, aplicando el concepto de transmisividad, donde:

$$T = Kb \quad (2)$$

sustituyendo (2) en (1), y considerando que $b_1 + b_2 + \dots + b_n = b$:

$$T_{real} = T_1 + T_2 + \dots + T_n + T_f \quad (3)$$

donde T_r es la transmisividad real del pozo; T_1, T_2, T_n , corresponden con la transmisividad para cada capa hipotética y T_f , es la transmisividad de la falla. Por lo tanto, despejando T_f de (3) y utilizando (2), la conductividad hidráulica de las zonas de falla se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$K_f = \frac{T_r - (T_1 + T_2 + \dots + T_n)}{b_f} \quad (4)$$

donde K_f es la conductividad hidráulica de la falla y b_f es su espesor saturado.

3.3 Resultados

3.3.1 Resultados de los modelos sólidos

Los modelos sólidos proporcionaron valores cuantitativos de RQD de 0 a 100%, alteración de 0 a 4 y litología de 1 a 4 para cada celda, de acuerdo con la Tabla 3.2. Los valores promedio para cada pozo, considerando únicamente su tramo saturado, se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2 Representación cuantitativa de RQD, litología y alteración utilizados en la interpolación para obtener los modelos sólidos.

Valor	Atributo geológico		
	RQD (%)	Litología	Alteración
0	Roca totalmente fracturada	NA	Sin alteración
1		Lutita	PC
2		Caliza	CSPC-Baja
3		Brecha	CSPC-Moderada
4		Intrusivo	CSPC-Fuerte
100	Roca totalmente compacta	NA	NA

PC: Pirita-Calcita, CSPC: Cuarzo-Sericita-Pirita-Calcita, NA: No Aplica

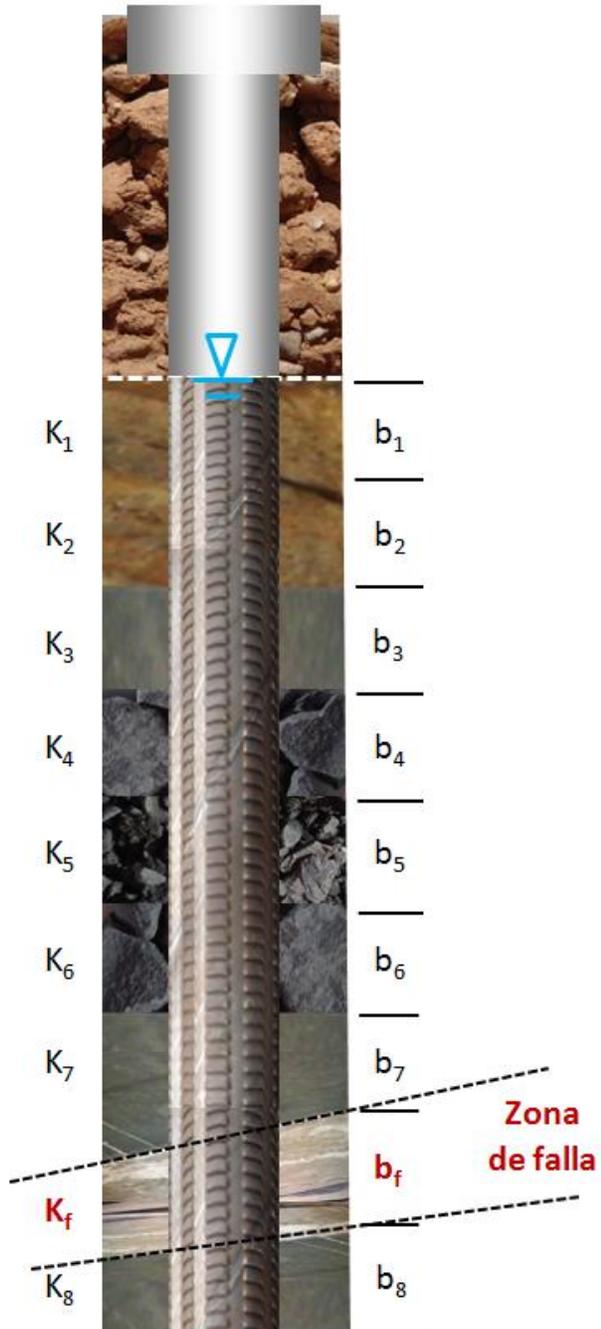


Figura 3.2 Variación vertical de K_r para cada intervalo. Se muestra una posible zona de falla, con espesor b_f .

Tabla 3.3 Valores representativos de RQD, litología y alteración para cada pozo, obtenidos a partir de los modelos sólidos.

Pozo	Espesor saturado (m)	RQD promedio (%)	Litología predominante	Alteración principal
DW1	146	47	3	4
DW2	146	46	1	3
DW4	145	43	1	4
DW5	122	93	1	1
DW6	106	72	1	1
DW10	293	63	1	4
DW11	265	81	1	3
DW12	301	54	1	4
DW13	459	91	3	4
DW14	566	97	1	2
DW15	381	57	1	4
DW16	196	91	1	3
DW17	317	94	3	4
DW18	331	97	3	3
DW19	292	52	1	4
DW20	260	84	3	4
DW21	410	51	1	4
DW22	221	65	1	2
DW23	417	95	1	1
DW24	456	86	1	1
DW25	387	91	3	4
DW26	384	77	1	4
DW27	341	71	1	4
DW28	412	51	1	4
DW29	305	79	1	2
DW30	335	75	1	3
DW31	525	92	3	3
DW32	574	84	1	3
DW33	498	56	1	3
DW35	223	94	3	4
DW37	357	79	1	4
DW39	501	55	1	4
DW40	567	56	1	4
DW41	546	62	1	3
DW42	507	58	1	4
DW44	389	64	1	4
DW45	493	52	1	3

3.3.2 Ecuaciones de conductividad hidráulica para matriz fracturada

Debido al amplio rango de variación de los valores de conductividad hidráulica (K) en los pozos, de 1.9×10^{-9} a 6.3×10^{-6} m/s, la ecuación que mejor se ajusta a la relación $RQD - K$ es exponencial, con un valor de coeficiente de correlación (r) de 0.47 (Figura 3.3). De este modo, la ecuación:

$$K = 0.00002e^{-0.056RQD} \quad (5)$$

se utilizó como ecuación general representativa para la relación $RQD - K$ en el área de estudio. Después de aplicar esta ecuación a cada pozo y obtener su valor de conductividad hidráulica general, se definieron los residuales de cada uno mediante la siguiente expresión:

$$R_k = K_r - K_{eg} \quad (6)$$

donde R_k es el valor residual de conductividad hidráulica, K_r es la conductividad hidráulica real para cada pozo obtenida a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo y K_{eg} corresponde con la conductividad hidráulica obtenida aplicando la ecuación general a cada pozo, con base en su valor representativo de RQD.

En la Figura 3.4, además de los valores de R_k obtenidos para cada pozo con relación a su RQD, también se muestra su clasificación de acuerdo con su litología y alteración. La línea segmentada en color negro representa el valor de $R_k = 0$, que corresponde como una correspondencia exacta entre el valor de K_r y K_{eg} . Por lo tanto, los pozos cercanos a esta línea se consideran congruentes con la ecuación general y con el modelo sólido de RQD. Los pozos con valores de R_k mucho mayores que cero, se consideran inconsistentes con la ecuación pues presentaron valores de $K_r \gg K_{eg}$, lo cual significa que la ecuación subestima sus valores de K . Esta condición es independiente de la litología y alteración, pues varios pozos cuyo valor de R_k tiende a cero presentan la misma litología y alteración que otros con valores de R_k muy altos. Así, estos pozos son asociables con el dominio de fallamiento regional, pues la K de la falla puede haber incrementado el valor de K_r del pozo, es decir para estos pozos $K_r = K_{matriz} + K_{falla}$. Por último, existen pozos cuyo valor de R_k es menor que cero, es decir $K_r < K_{eg}$. Esto implica que la ecuación general sobrestima esos valores, lo

cual puede explicarse por errores en la interpolación de los modelos sólidos derivados de la falta de datos o por deficiencias del método de interpolación utilizada (ponderación inversa a la distancia), que localmente pudo fallar en la representación de la heterogeneidad del medio.

Para definir el límite entre dominios se obtuvieron varias ecuaciones variando el rango de tolerancia de R_k . La Figura 3.4 muestra el rango de variación inicial ($\pm 2.5 \times 10^{-7}$ m/s), considerando que los pozos dentro de las líneas de color rojo (puntos en color negro) se encuentran dentro del dominio de matriz fracturada, los pozos en color azul pertenecen al dominio de fallamiento regional y los de color rojo son errores de interpolación. La Figura 3.5 muestra un gráfico de dispersión de K con relación al RQD, incluyendo sólo los pozos dentro del rango utilizado. De este modo se obtuvo una ecuación representativa para el medio de matriz fracturada. Para el caso del rango de tolerancia de $\pm 2.5 \times 10^{-7}$ m/s de R_k , el coeficiente de correlación aumentó a 0.73 con respecto al valor de 0.47 de la Figura 3.3.

Para incluir la litología y alteración en la estimación de K_{matriz} , los pozos seleccionados como parte del dominio de matriz fracturada fueron clasificados de acuerdo con la Tabla 3.1, tomando como base sus valores representativos (Tabla 3.3). De este modo, para cada grupo se obtuvo una ecuación exponencial. En el caso del ciclo que considera un rango de variación de R_k de $\pm 2.5 \times 10^{-7}$ m/s, los coeficientes de correlación (r) obtenidos con las ecuaciones de $K_{matriz} = f(RQD)$ fueron de 0.93, 0.69 y 0.95 para los grupos BI, LAB y LAA, respectivamente (Figura 3.6). Las ecuaciones resultaron representativas para los casos de las rocas competentes (BI y LAA), mientras que para las lutitas con nula o poca alteración (LAB), los resultados muestran valores dispersos.

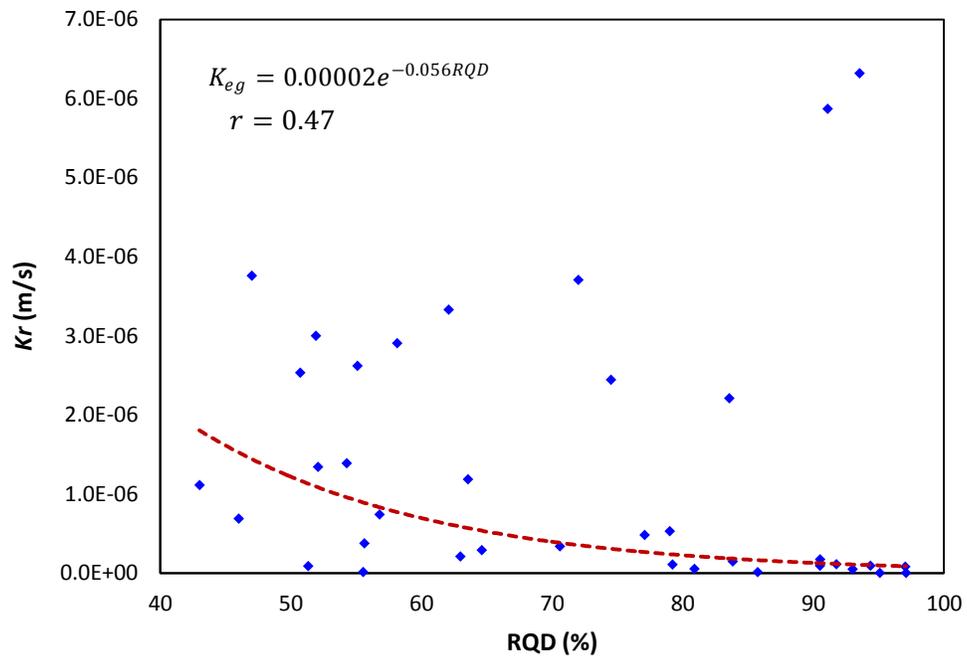


Figura 3.3 Obtención de la ecuación general para obtener K para ambos dominios hidrogeológicos, mediante la relación del valor promedio de RQD de cada pozo con su K_r correspondiente.

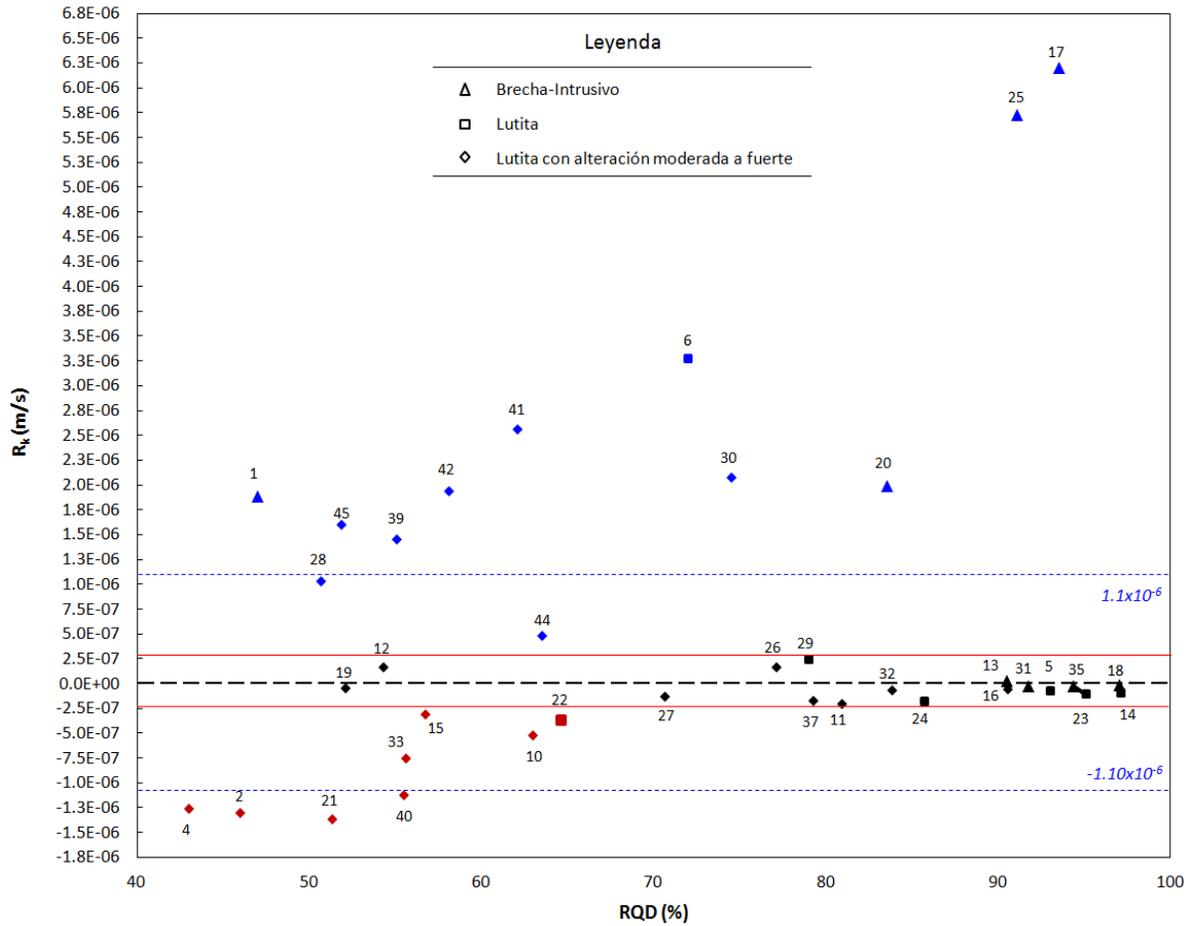


Figura 3.4 Gráfica de valores de R_k incluyendo ambos dominios hidrogeológicos, donde $K = f(RQD)$. También se muestra el grupo al que cada pozo pertenece de acuerdo con sus valores representativos de atributos geológicos. Las líneas rojas indican el intervalo evaluado, que en este caso incluye pozos cuyo valor residual es $\pm 2.5 \times 10^{-7}$ m/s.

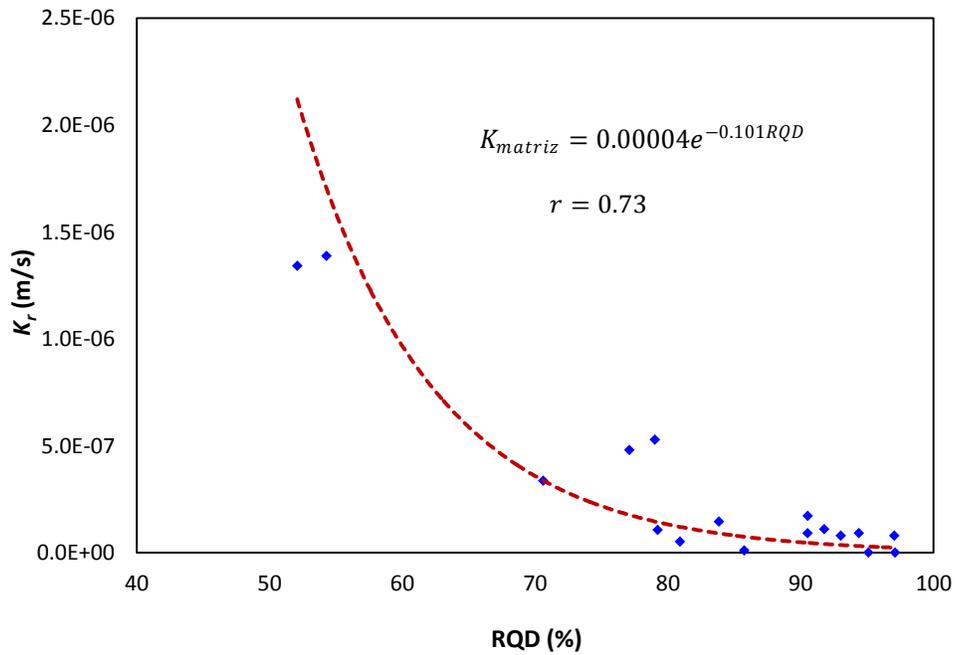


Figura 3.5 Ecuación para el dominio de matriz fracturada obtenida a partir de la relación entre el valor promedio de RQD de cada pozo y su conductividad hidráulica real. La figura mostrada corresponde a la ecuación obtenida para un rango de variación de $Rk \pm 2.5 \times 10^{-7} \text{m/s}$.

La menor correlación para el grupo LAB (Figura 3.6b) se debe principalmente a los pozos 29 y 5, en los que el valor de K_r es más alto que el estimado. En el caso del pozo 29, el corte litológico muestra zonas de alteración moderada a fuerte en la parte superior, y baja a nula en el fondo. Esto se debe a que el pozo se ubica en la parte sur (Figura 3.7), donde la densidad de información de barrenos disminuye, de modo que probablemente el modelo sólido de alteración interpoló valores bajos de alteración cuando los valores en la realidad son más altos, haciendo que el pozo cayera dentro del grupo LAB. El valor de K_r de este pozo es de 5.3×10^{-7} m/s, y al aplicar la ecuación del grupo donde se encuentra, se obtiene una conductividad hidráulica de 1.4×10^{-8} m/s. Sin embargo, si al pozo se le aplica la ecuación del grupo LAA, su valor aumenta a 1.5×10^{-7} m/s, lo que muestra que este pozo realmente es más compatible con este grupo. Al reubicar este pozo, el coeficiente de correlación para el grupo de LAB aumenta a 0.79 y el del grupo de LAA disminuye ligeramente a 0.93.

En cuanto al pozo 5, se presenta un caso similar. Este pozo se ubica en el límite suroeste del tajo (Figura 3.7), donde la densidad de información es menor. Su valor de K_r es más alto que el estimado por el modelo. Esta diferencia puede deberse a una condición similar al pozo 29 donde se considera que la falta de información para la interpolación del modelo sólido de alteración, resultó en una alteración representativa más baja que la real, lo cual lo llevó a ubicarse en el grupo de LAB. Al reubicar este pozo al siguiente grupo, el coeficiente de correlación del grupo de LAB aumenta a 0.90, y el del grupo de LAA aumenta ligeramente a 0.94.

Para la obtención de las ecuaciones representativas para los siguientes rangos se consideró la reubicación de los pozos 29 y 5. No obstante, para el siguiente ciclo de obtención de ecuaciones se observó un comportamiento similar a estos por parte del pozo 22, cuyo corte litológico presenta predominio de alteración moderada a alta. Este pozo se encuentra al este del área de estudio, en una zona con poca información de barrenos. También se observa que responde mejor a la ecuación para el grupo LAA, de modo que fue reubicado a este grupo.

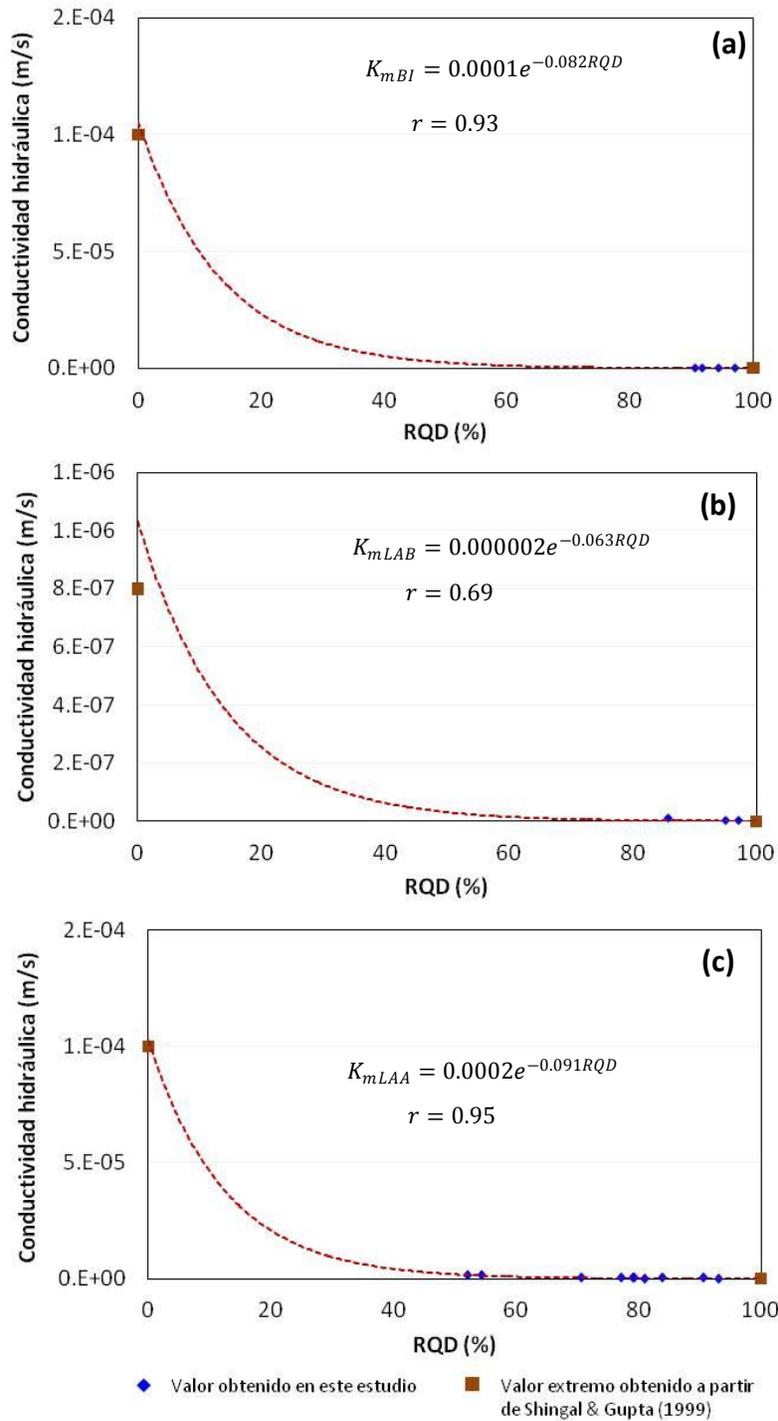


Figura 3.6 Obtención de las ecuaciones para el dominio de matriz fracturada en función del RQD, alteración y litología, previo a la reubicación de los pozos 29 y 5 al grupo de LAA. Las gráficas muestran las relaciones entre el valor promedio de RQD de cada pozo y su K_r , para los tres grupos definidos en función de la litología y alteración de la roca: **a** BI, **b** LAB, **c** LAA. Los valores en los extremos de RQD fueron tomados de bibliografía (0 y 100 %). Se muestran los resultados relacionados con un rango de $R_k \pm 2.5 \times 10^{-7}$ m/s.

Con respecto a los pozos del grupo BI, se observó que por lo general los valores estimados son más bajos que los reales. Esto se debe a los valores extremos asignados de acuerdo con Shingal y Gupta (1999). Al aumentar el valor de mínimo de conductividad hidráulica de 3×10^{-9} a 3×10^{-8} m/s para un valor de RQD de 100%, el valor de K estimada se ajusta mejor a K_r , de modo que el coeficiente de correlación aumenta notablemente de 0.93 a 0.99. Esto podría explicarse porque Shingal y Gupta (1999) definen un rango para rocas cristalinas, pero en los pozos predomina la brecha volcánica, que por su génesis tiende a ser más permeable que una roca cristalina. Por lo tanto, para el caso del grupo BI el valor extremo correspondiente al 100% de RQD se modificó a 3×10^{-8} m/s. Por otro lado, se aplicó el mismo cambio al grupo LAA, resultando en una mejoría del coeficiente de correlación de 0.95 a 0.97. Dado que en la bibliografía no existen referencias de rangos de K específicos para lutitas con alteración CSPC, se adoptó la modificación del rango por ajustarse mejor a las condiciones del acuífero.

Después de realizar varios ciclos con rangos de R_k , se observó que al pasar de un valor mínimo de -1.1×10^{-6} a -1.25×10^{-6} m/s la correlación en el grupo LAA disminuyó notablemente, debido a la introducción del pozo 40, el cual presenta una K_r menor a la estimada. De este modo, se estableció como límite inferior el valor de -1.1×10^{-6} m/s y los pozos con valores de R_k menores, se consideran errores de interpolación (pozos 2, 4, 21 y 40). En cuanto al valor máximo, se dejó el valor de -1.1×10^{-6} m/s para hacer el rango de tolerancia simétrico. De este modo, los pozos ubicados por encima de este valor (pozos 1, 6, 17, 20, 25, 30, 39, 41 y 42) se consideran afectados por una zona de falla que incrementa su valor de K_r . En el caso del pozo DW45, presenta un valor residual que lo sitúa en el dominio de fallamiento regional, pero al tratar de estimar la conductividad hidráulica de la falla, el valor se vuelve negativo, lo cual es inconsistente con el modelo conceptual. Sin embargo, el valor que se obtiene con la ecuación para el grupo LAA al que pertenece es muy similar a su valor real, de modo que este pozo se dejó como perteneciente al dominio de matriz fracturada.

Tabla 3.4 Resultados del proceso de calibración para encontrar el rango adecuado para la clasificación de los pozos en los dos dominios hidroestructurales. Se seleccionó el rango de -1.1×10^{-6} a 1.1×10^{-6} m/s, pues al ampliarlo se empieza a perder la correlación.

Rango de tolerancia de R_k (m/s)		Cantidad de pozos incluidos	Coeficiente de correlación (r)			
Mínimo	Máximo		BI	LAB	LAA	Promedio
-2.50×10^{-7}	2.50×10^{-7}	17	0.99	0.90	0.97	0.95
-5.00×10^{-7}	5.00×10^{-7}	20	0.99	0.90	0.96	0.95
-7.50×10^{-7}	7.50×10^{-7}	21	0.99	0.90	0.95	0.95
-1.00×10^{-6}	1.00×10^{-6}	22	0.99	0.90	0.94	0.94
-1.10×10^{-6}	1.10×10^{-6}	23	0.99	0.90	0.94	0.94
-1.25×10^{-6}	1.25×10^{-6}	24	0.99	0.90	0.81	0.90

Tabla 3.5 Ecuaciones de $K = f(RQD, litología, alteración)$ a utilizar para la definición de la conductividad hidráulica para cada celda el modelo matemático, de acuerdo con el rango de tolerancia de residual seleccionado ($\pm 1.10 \times 10^{-6}$).

Cantidad de pozos incluidos	$K_{matriz} = f(RQD)$		
	BI	LAB	LAA
23	$K_{mBI} = 0.0001e^{-0.075RQD}$	$K_{mLAB} = 0.000001e^{-0.07RQD}$	$K_{mLAA} = 0.00008e^{-0.078RQD}$

Finalmente, el rango de variación de R_k seleccionado es de -1×10^{-6} m/s a 1.1×10^{-6} m/s (Tabla 3.4). Los pozos ubicados dentro de las líneas segmentadas de color azul (Figura 3.4), incluyendo al pozo DW45, son los que fueron definidos como pertenecientes al medio de matriz fracturada y utilizados para definir las ecuaciones de $K_{matriz} = f(RQD)$ para cada grupo de pozos (Tabla 3.5). En total, se incluyeron 24 pozos en este dominio, 9 se clasificaron dentro del dominio de fallamiento regional y 4 se consideran errores de interpolación de los modelos sólidos.

La Figura 3.7 muestra la ubicación de todos los pozos y el dominio al que pertenecen. Los pozos en color rojo son consistentes con los modelos sólidos, mientras los azules corresponden con pozos con K_r mayor de la que los modelos pueden estimar, de modo que se consideran relacionados directamente con las zonas de falla que se incluyen en la figura, las cuales corresponden a la elevación 1700 msnm. La definición de estas fallas fue realizada por Goodman (2012) mediante mediciones directas dentro del tajo, proyectadas como máximo a 500 m fuera del tajo, pues no se pudo verificar su continuidad hacia el exterior. Se incluye su ángulo de inclinación y dirección, lo que se tomará como base en la integración del modelo matemático. Por último, se muestran los cuatro pozos considerados como errores del modelo sólido de RQD en color negro (2, 4, 21 y 40). Estos errores son atribuibles a falta de información o al método de interpolación en sí.

La Figura 3.8 muestra la correlación entre el valor de K_r y K_{matriz} , utilizando la ecuación general para el dominio de matriz fracturada (a) y las ecuaciones particulares definidas con base en la litología y alteración predominantes en cada pozo (b). Sin embargo, no se observa variación en el coeficiente de correlación con la calibración de las ecuaciones. Al comparar las líneas de tendencia entre los valores de K_r y los valores de K_m definidos con base en litología y alteración (Figura 3.9), se observa que al aplicar las ecuaciones para cada grupo las tendencias se vuelven muy similares. El principal beneficio de la calibración se encuentra en el grupo LAB, pues la mayoría de las celdas del modelo se encuentran dentro de este grupo de lutitas con alteración baja o nula, de modo que se le dio prioridad a la correspondencia de esta ecuación con los valores de K_r . En la Tabla 3.6 se observa que al aplicar la ecuación de acuerdo con la litología y alteración, el valor de K_{matriz} se aproxima mejor al de K_r para la mayoría de los pozos pues el porcentaje de variación disminuye.

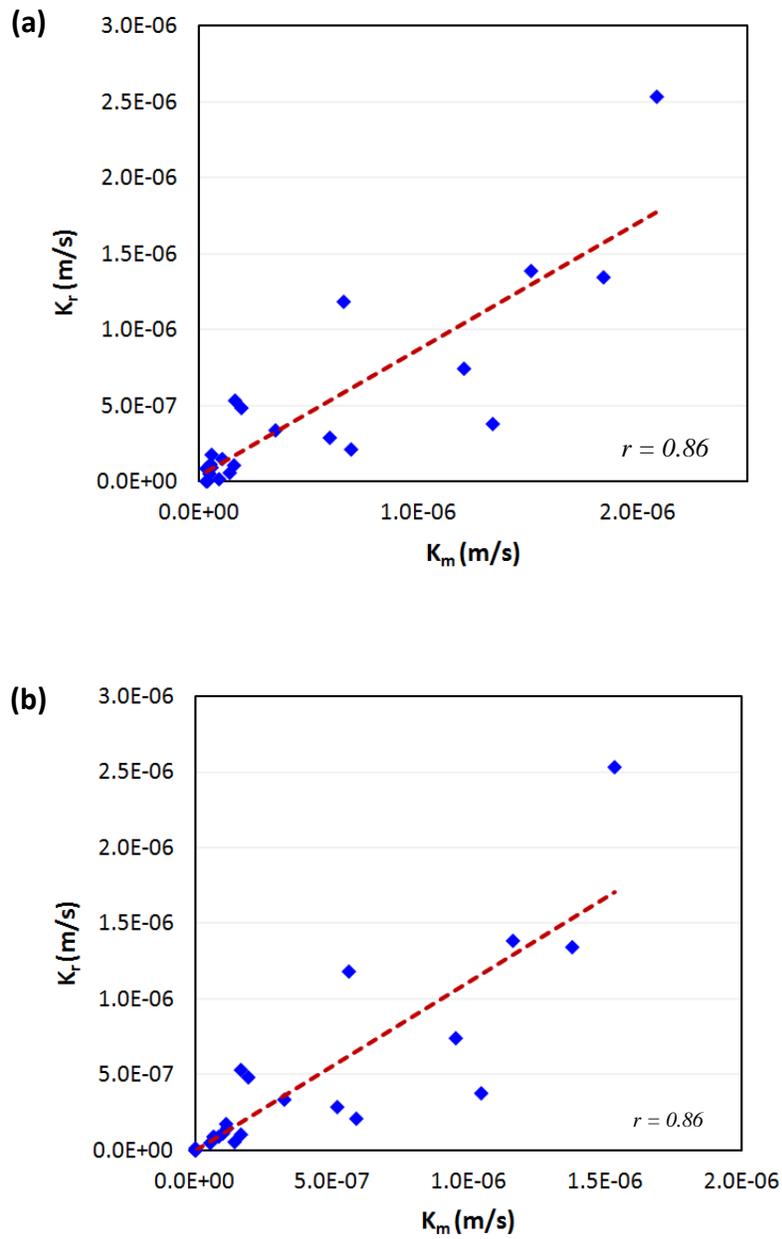


Figura 3.8 Correlación entre K_r y la K_{matriz} obtenida, **a** aplicando la ecuación general para el dominio matriz fracturada y **b** con las ecuaciones definidas en función de los atributos geológicos.

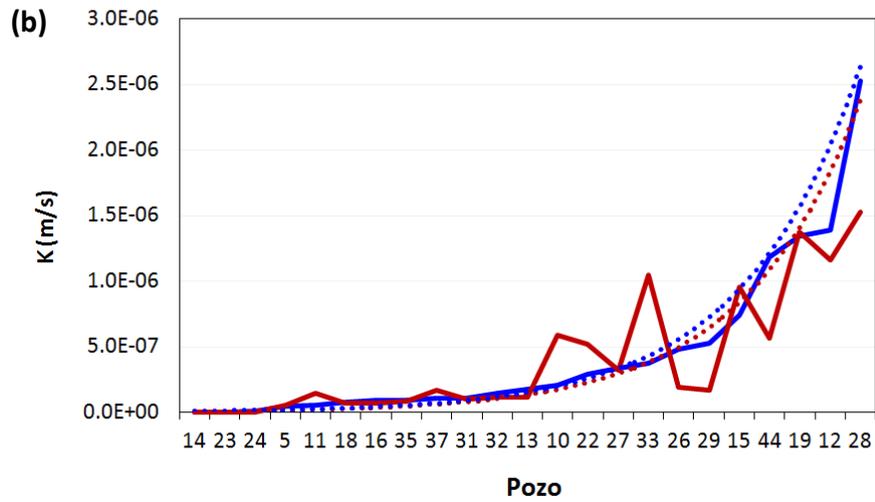
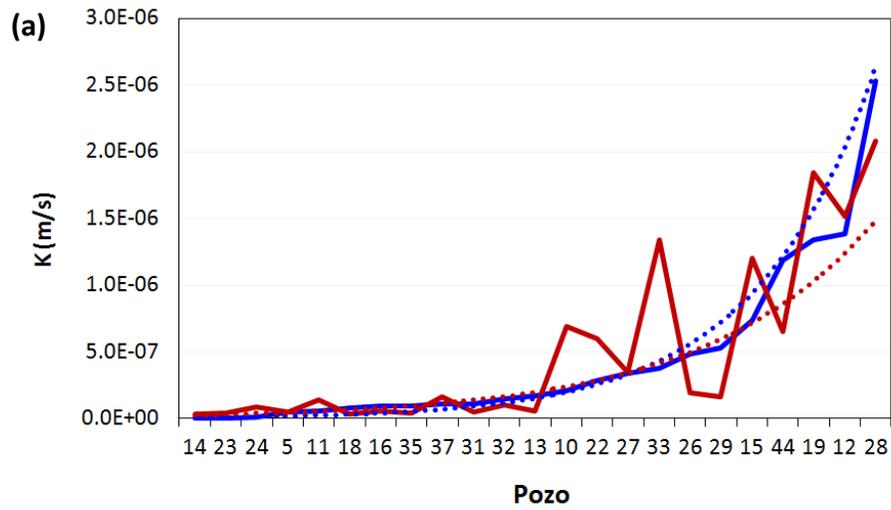


Figura 3.9 Comparación entre los valores de K_r (línea azul continua) y K_{matriz} (línea roja continua) obtenidos: **a** al aplicar la ecuación general para el dominio matriz fracturada y **b** al aplicar las ecuaciones definidas en función de los atributos geológicos. Se observa que las líneas de tendencia (líneas punteadas) se vuelven muy similares al aplicar las ecuaciones para cada grupo a diferencia de las tendencias obtenidas al aplicar la ecuación general.

Tabla 3.6 Comparación entre valores de conductividad hidráulica de los 24 pozos correspondientes con el dominio de matriz fracturada, obtenidos a partir de la ecuación general para este dominio y de cada ecuación definida con base en el resto de atributos geológicos. Se observa que el porcentaje de variación entre el valor de conductividad hidráulica real y calculado disminuye notablemente al definir la ecuación con base en la litología y alteración.

Pozo	Litología y alteración predominante	K_r (m/s)	$K_{matriz} = f(RQD)$		Variación entre valor K_r y K_{matriz} (%)	Variación entre valor K_r y K_{matriz} de acuerdo a litología y alteración (%)
			Ecuación matriz fracturada (m/s)	Ecuación de acuerdo a litología y alteración (m/s)		
DW13	BI	1.7×10^{-7}	5.8×10^{-8}	1.1×10^{-7}	-66	-35
DW18	BI	8.1×10^{-8}	3.2×10^{-8}	6.9×10^{-8}	-60	-15
DW31	BI	1.1×10^{-7}	5.2×10^{-8}	1.0×10^{-7}	-53	-9
DW35	BI	9.3×10^{-8}	4.1×10^{-8}	8.4×10^{-8}	-56	-10
DW14	LAB	1.9×10^{-9}	3.2×10^{-8}	1.1×10^{-9}	+1584	-42
DW23	LAB	2.1×10^{-9}	3.8×10^{-8}	1.3×10^{-9}	+1710	-38
DW24	LAB	1.2×10^{-8}	8.9×10^{-8}	2.5×10^{-9}	+642	-79
DW5	LAA	4.9×10^{-8}	4.6×10^{-8}	5.7×10^{-8}	-6	+16
DW10	LAA	2.1×10^{-7}	6.9×10^{-7}	5.9×10^{-7}	+229	+181
DW11	LAA	5.3×10^{-8}	1.4×10^{-7}	1.5×10^{-7}	+164	+183
DW12	LAA	1.4×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.2×10^{-6}	+7	-14
DW15	LAA	7.4×10^{-7}	1.2×10^{-6}	9.5×10^{-7}	+62	+28
DW16	LAA	9.3×10^{-8}	5.8×10^{-8}	6.9×10^{-8}	-38	-26
DW19	LAA	1.3×10^{-6}	1.8×10^{-6}	1.4×10^{-6}	+38	+8
DW22	LAA	2.9×10^{-7}	6.0×10^{-7}	5.2×10^{-7}	+107	+79
DW26	LAA	4.8×10^{-7}	1.9×10^{-7}	2.0×10^{-7}	-60	-58
DW27	LAA	3.4×10^{-7}	3.5×10^{-7}	3.3×10^{-7}	+3	-3
DW28	LAA	2.5×10^{-6}	2.1×10^{-6}	1.5×10^{-6}	-16	-40
DW29	LAA	5.3×10^{-7}	1.6×10^{-7}	1.7×10^{-7}	-70	-68
DW32	LAA	1.5×10^{-7}	1.1×10^{-7}	1.2×10^{-7}	-27	-20
DW33	LAA	3.8×10^{-7}	1.3×10^{-6}	1.0×10^{-6}	+242	+163
DW37	LAA	1.1×10^{-7}	1.6×10^{-7}	1.7×10^{-7}	+45	+55
DW44	LAA	1.2×10^{-6}	6.6×10^{-7}	5.6×10^{-7}	-45	-53
DW45	LAA	3.0×10^{-6}	1.9×10^{-6}	1.4×10^{-6}	-37	-53

La existencia de sólo tres pozos dentro del grupo LAB con respecto al total de 37 pozos analizados se debe a los objetivos de la perforación. La perforación de pozos por parte de la compañía minera tuvo como objetivo encontrar pozos de alto caudal. Por lo tanto, después de comprobar mediante los pozos DW14, DW23 y DW24 la baja conductividad hidráulica de las lutitas con baja a nula alteración, y por consecuencia su baja productividad, los siguientes pozos fueron planeados para perforarse en zonas con alteración media – alta y con valores bajos de RQD.

3.3.3 Conductividad hidráulica de las zonas de falla

Aplicando la ecuación (4) definida previamente, se obtuvieron los valores de conductividad hidráulica para las fallas en los siete pozos clasificados dentro del dominio de fallamiento regional. La Tabla 3.7 muestra los valores finales de K_{matriz} y K_f para todos los pozos, donde se observa que la zona de falla con mayor conductividad hidráulica es la del pozo DW25 con 2.2×10^{-4} m/s, mientras la que presenta el menor valor es la del pozo DW1 con 1.3×10^{-5} m/s. La conductividad hidráulica de la matriz en estos pozos fue estimada en 1.1×10^{-7} m/s y en 2.9×10^{-6} m/s respectivamente, lo cual muestra un valor de dos a tres órdenes de magnitud mayor para el dominio de fallamiento regional. La media geométrica de conductividad hidráulica para este dominio es de 6.8×10^{-5} m/s.

Tabla 3.7 Conductividad hidráulica real y estimada para cada pozo, de acuerdo con sus atributos geológicos, utilizados para la obtención de las ecuaciones de $K = f(RQD)$. Los valores de K_{matriz} se estimaron a partir de las ecuaciones obtenidas para el rango de valores seleccionado para el modelo matemático, y K_f mediante la aplicación de la ecuación (4).

Pozo	Dominio estructural	K_r (m/s)	K_{matriz} (m/s)	K_f (m/s)
DW1	Fallamiento regional	3.8×10^{-6}	2.9×10^{-6}	1.3×10^{-5}
DW2	<i>Error de interpolación</i>	6.9×10^{-7}	2.2×10^{-6}	-
DW4	<i>Error de interpolación</i>	1.1×10^{-6}	2.8×10^{-6}	-
DW5	Matriz fracturada	4.9×10^{-8}	4.6×10^{-8}	-
DW6	Fallamiento regional	3.7×10^{-6}	6.5×10^{-9}	3.9×10^{-5}
DW10	Matriz fracturada	2.1×10^{-7}	6.9×10^{-7}	-
DW11	Matriz fracturada	5.3×10^{-8}	1.5×10^{-7}	-
DW12	Matriz fracturada	1.4×10^{-6}	1.2×10^{-6}	-
DW13	Matriz fracturada	1.7×10^{-7}	1.1×10^{-7}	-
DW14	Matriz fracturada	1.9×10^{-9}	1.1×10^{-9}	-
DW15	Matriz fracturada	7.4×10^{-7}	9.5×10^{-7}	-
DW16	Matriz fracturada	9.3×10^{-8}	6.9×10^{-8}	-
DW17	Fallamiento regional	6.3×10^{-6}	9.0×10^{-8}	2.0×10^{-4}
DW18	Matriz fracturada	8.1×10^{-8}	6.9×10^{-8}	-
DW19	Matriz fracturada	1.3×10^{-6}	1.4×10^{-6}	-
DW20	Fallamiento regional	2.2×10^{-6}	1.9×10^{-7}	5.1×10^{-5}
DW21	<i>Error de interpolación</i>	8.8×10^{-8}	1.5×10^{-6}	-
DW22	Matriz fracturada	2.9×10^{-7}	5.2×10^{-7}	-
DW23	Matriz fracturada	2.1×10^{-9}	1.3×10^{-9}	-
DW24	Matriz fracturada	1.2×10^{-8}	2.5×10^{-9}	-
DW25	Fallamiento regional	5.9×10^{-6}	1.1×10^{-7}	2.2×10^{-4}
DW26	Matriz fracturada	4.8×10^{-7}	2.0×10^{-7}	-
DW27	Matriz fracturada	3.4×10^{-7}	3.3×10^{-7}	-
DW28	Matriz fracturada	2.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}	-
DW29	Matriz fracturada	5.3×10^{-7}	1.7×10^{-7}	-
DW30	Fallamiento regional	2.4×10^{-6}	2.4×10^{-7}	7.1×10^{-5}
DW31	Matriz fracturada	1.1×10^{-7}	1.0×10^{-7}	-
DW32	Matriz fracturada	1.5×10^{-7}	1.2×10^{-7}	-
DW33	Matriz fracturada	3.8×10^{-7}	1.0×10^{-6}	-
DW35	Matriz fracturada	9.3×10^{-8}	8.4×10^{-8}	-
DW37	Matriz fracturada	1.1×10^{-7}	1.7×10^{-7}	-
DW39	Fallamiento regional	2.6×10^{-6}	1.1×10^{-6}	4.5×10^{-5}
DW40	<i>Error de interpolación</i>	1.3×10^{-8}	1.1×10^{-6}	-
DW41	Fallamiento regional	3.3×10^{-6}	6.3×10^{-7}	1.3×10^{-4}
DW42	Fallamiento regional	2.9×10^{-6}	8.6×10^{-7}	6.4×10^{-5}
DW44	Matriz fracturada	1.2×10^{-6}	5.6×10^{-7}	-
DW45	Matriz fracturada	3.0×10^{-6}	1.4×10^{-6}	-

3.4 Discusión

3.4.1 Valores extremos de RQD

Dado que los pozos que se utilizaron para la calibración de las ecuaciones no presentaron valores de RQD suficientes para cubrir el rango de 0 – 100%, se observó que la aplicación de las ecuaciones resultaba en valores inconsistentes con el modelo conceptual para celdas con valores de RQD en los extremos. Para resolver este inconveniente, se utilizaron valores de bibliografía para aproximar los probables valores de conductividad hidráulica en los valores extremos. De este modo se lograron resultados congruentes para todos los valores de RQD para todos los grupos hidrogeológicos. No obstante, la ecuación para el grupo de brecha e intrusivos produjo valores bajos de conductividad hidráulica. Para definir una ecuación con la capacidad de aproximar mejor los valores reales, se aumentó diez veces el valor de la conductividad hidráulica para rocas cristalinas con 100% de RQD. El resultado fueron mejores aproximaciones a los datos reales. Dado que se utilizaron los mismos límites para el grupo de lutitas con alteración media a fuerte, también se modificó el valor extremo de RQD al 100%, resultando también en mejores aproximaciones con los datos reales.

3.4.2 Confiabilidad de los modelos sólidos

La clasificación de los pozos en cada grupo se realizó por medio de sus atributos geológicos predominantes de acuerdo con los resultados de los modelos sólidos. Sin embargo, tres pozos que fueron clasificados en el grupo de lutitas con alteración nula a baja, presentaron características reales propias del grupo de lutitas con alteración media a fuerte. Al reubicarlos, los valores de conductividad hidráulica estimada correspondieron mejor con los valores reales. Por otro lado, hubo cuatro pozos definidos como errores de los modelos sólidos, pues sus valores de conductividad hidráulica estimada resultaron mucho menores a los valores reales. Estos ajustes en la clasificación se consideran apropiados si se tiene un buen conocimiento de la información geológica e hidráulica, así como de las limitaciones del método de interpolación, con el fin de lograr una mejor representación del acuífero.

Por otro lado, no se descarta la probabilidad de que el modelo sólido de RQD haya arrojado valores muy altos en algunos pozos del dominio de fallamiento regional principalmente donde la información es escasa (pozos DW6, DW30, DW41), lo cual produce una disminución en el valor de conductividad hidráulica estimada que resulta muy baja con respecto al valor real. La existencia de estas fallas del modelo de RQD no pudo ser comprobada. En este sentido, de forma global se desprende que los modelos sólidos fueron consistentes con al menos el 62% de los pozos, pues el 27% de ellos se asignaron al dominio de fallamiento regional y el 11% se descartaron por considerarse errores de interpolación.

Estas deficiencias en los modelos sólidos pueden deberse en parte a falta de información en algunas zonas y en parte al método de interpolación de ponderación inversa a la distancia. Dado que el software utilizado para la interpolación y generación de los modelos sólidos no presenta la opción de un método más avanzado como Krigging, se recomienda que trabajos posteriores prueben con otros programas de interpolación que incluyan métodos más robustos, disminuyendo así los errores.

3.5 Conclusiones

Para encontrar las ecuaciones apropiadas para la estimación de la conductividad hidráulica en cada celda del dominio de matriz fracturada, fue necesario tomar información bibliográfica y ajustarla para lograr mejor congruencia con el modelo conceptual y con los valores reales de conductividad hidráulica. Este ajuste se deriva en gran medida a la falta de una referencia de conductividad hidráulica para lutitas con alteración CSPEC.

Los modelos sólidos de interpolación presentaron inconsistencias con algunos pozos, de manera que fueron reubicados a un grupo más apropiado. Este tipo de ajustes son necesarios para lograr una mejor representación del acuífero, siempre y cuando se cuente con el conocimiento hidrogeológico adecuado del área, la distribución espacial de la información y las limitaciones del método de interpolación.

Al final, las ecuaciones aplicadas lograron coeficientes de correlación mayores a 0.90. En el caso del dominio de fallamiento regional, el valor de conductividad hidráulica de la zona de falla se determinó haciendo una analogía del modelo con un acuífero estratificado, aplicando el concepto de transmisividad. Los valores obtenidos de las fallas resultaron mayores a los del resto de capas logrando la congruencia con el modelo conceptual.

A pesar de los errores de interpolación derivados de falta de información y del método utilizado para crear los modelos sólidos, se considera que la metodología utilizada para convertir la información cuantitativa obtenida en el modelo conceptual en conductividades hidráulicas en función de los atributos geológicos del área es apropiada para definir estos valores en el modelo matemático cuya construcción se detalla en el siguiente capítulo.

3.6 Referencias

- de Marsily G, Delay F, Gonçalves J, Renard P, Teles V, Violette S (2005) Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeol J* 13:161-183
- Galloway D (2010) The complex future of hydrogeology. *Hydrogeol J* 18:807-810
- Goodman S (2012) Structural model of the Peñasquito mine, Zacatecas State, Mexico. CAE Mining unpublished report for Goldcorp Inc.
- Herrera E, Garfias J (2013) Characterizing a fractured aquifer in Mexico using geological attributes related to open-pit groundwater. *Hydrogeol J* 21:1323-1338
- Roscoe Moss Company (1990) *Handbook of Ground Water Development*.
- Scesi L, Gattinoni P (2009) *Water circulation in rocks*. Springer, 165 p
- Shingal B, Gupta R (1999) *Applied hydrogeology of fractured rocks*. Kluwer academic publishers, 400 p
- Tiab D, Donaldson E (2004) *Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*: Elsevier, second ed., Chap. 8.

CAPÍTULO IV

Modelo matemático de un acuífero fracturado utilizando diferentes enfoques de modelación, aplicado al desagüe de una mina a cielo abierto

4.1 Introducción

4.1.1 Descripción general del área de modelación

El área de aplicación del modelo matemático incluye el área operativa de una mina a cielo abierto, ubicada al centro del Valle de Mazapil, al norte del Estado de Zacatecas. La mina produce oro y plata por procesos de lixiviación, y plomo y zinc mediante flotación. Desde el punto de vista hídrico, el primer proceso incluye un patio de lixiviación y el segundo una presa de jales, ambos aislados hidráulicamente mediante capas de arcilla y membranas impermeables, evitando la percolación de fluidos al subsuelo (Figura 4.1).

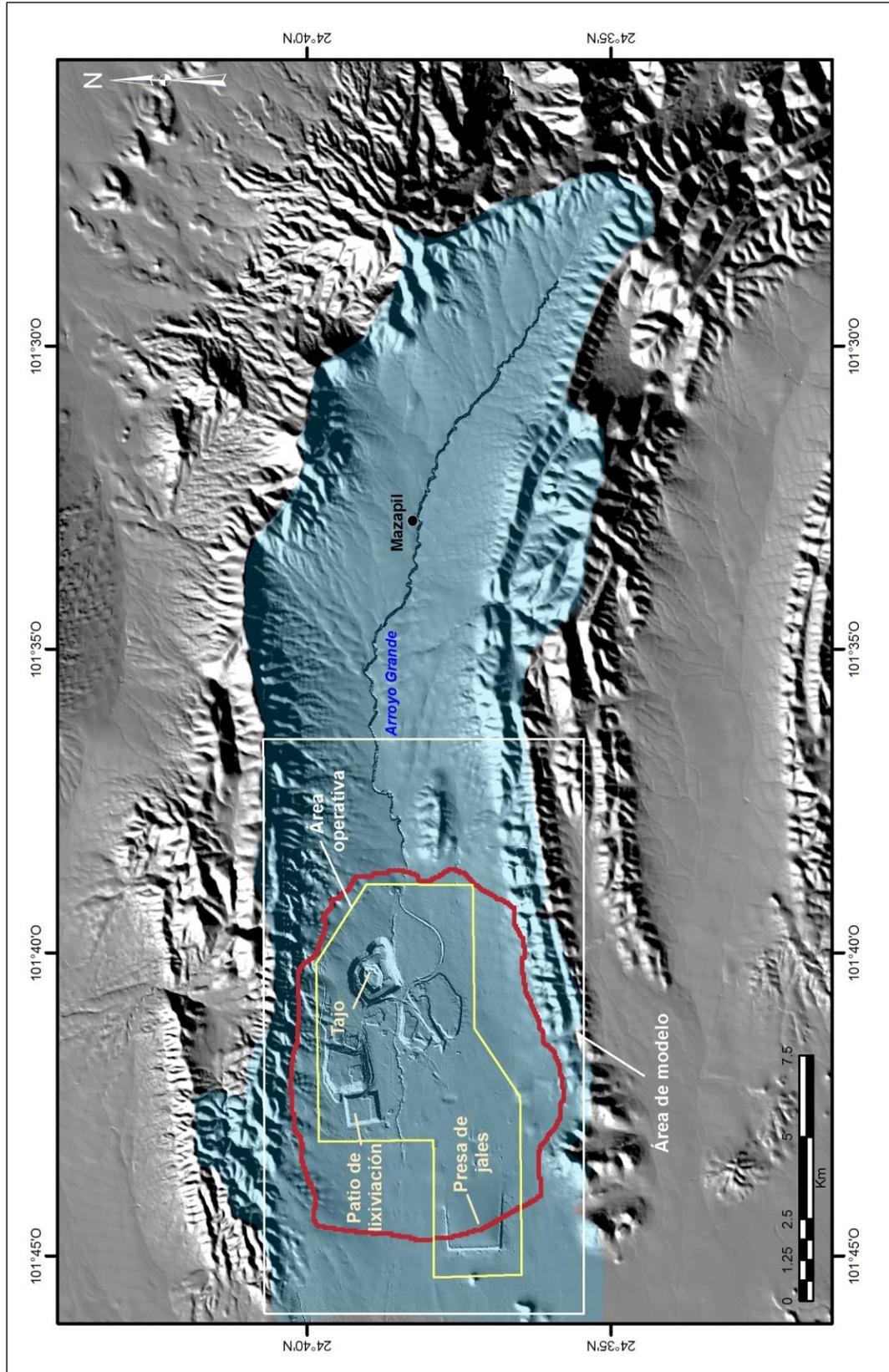


Figura 4.1 Valle de Mazapil (sombreado en color azul) y área del modelo. Se incluyen el área operativa de la mina y las celdas activas, las cuales están delimitadas por el polígono en color rojo.

4.1.2 Funcionamiento hidrogeológico del área del modelo

Hidrogeología

El flujo de agua subterránea en el área de estudio está fuertemente influenciado por el complejo marco geológico asociado con el emplazamiento del cuerpo mineralizado. Geológicamente, en el valle se presentan depósitos aluviales recientes en la superficie y rocas sedimentarias (lutitas) a poca profundidad (~50 m). Las sierras que delimitan el valle de Mazapil están formadas principalmente por calizas y calizas arcillosas. Por otro lado, el yacimiento mineral emplazado en las lutitas consiste en una diatrema que incluye rocas intrusivas y brechas de diferentes composiciones. Adicionalmente, el emplazamiento de la diatrema ha generado alteración en las lutitas, de modo que las lutitas alteradas presentan diferentes propiedades hidráulicas con respecto a las lutitas sanas (Herrera y Garfias 2013) que a su vez también varían en función del grado de fracturamiento.

Desde el punto de vista estructural, existe evidencia de que algunas estructuras se encuentran hidráulicamente activas, lo cual aumenta la heterogeneidad hidrogeológica del medio. Por lo tanto, la modelación numérica del sistema de flujo de agua subterránea incorporó la distribución 3D de las principales unidades hidrogeológicas, así como de las principales estructuras geológicas que pueden afectar el flujo.

Discretización temporal con respecto al bombeo

Condiciones pre-mina: Octubre de 2004

Los primeros datos de piezometría disponibles corresponden con octubre de 2004 y fueron tomados por la Universidad de Sonora (2004) a solicitud de la empresa M3 mexicana, como parte de los estudios previos a la construcción de la mina. Esta información se utilizó para definir las condiciones iniciales del acuífero y el área del modelo matemático. De este modo, se realizó la configuración de las isopiezas a partir de nueve puntos de observación distribuidos en toda el área del modelo (Figura 4.2). Los puntos de medición ubicados en los extremos este y oeste se utilizaron como apoyo para la definición de las condiciones de frontera del acuífero. Durante este periodo, el bombeo se considera insignificante, pues la mayoría de las captaciones eran de poca profundidad y el agua extraída se utilizaba para

labores domésticas y ganadería en pequeña escala. Esto es claramente visible en la configuración de las curvas de isovalores de elevación del nivel estático, pues el flujo subterráneo es de este a oeste y se infiere de las zonas de piedemonte hacia el centro del valle a través de la capa aluvial, principalmente en los arroyos, obedeciendo a la topografía.

Preparación para excavación del tajo: Noviembre 2004 a Diciembre de 2007

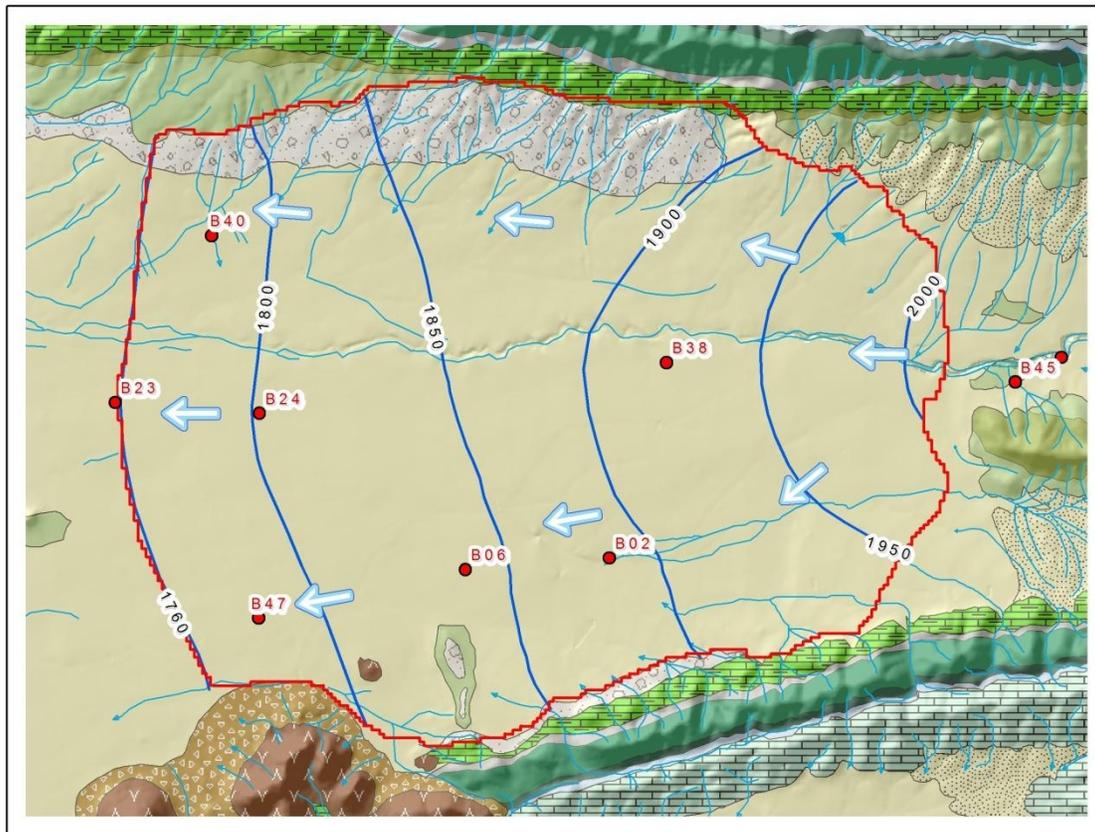
A mediados del 2007 entran en operación los primeros cuatro pozos de desagüe perforados a una profundidad total de 200 m, de modo que se genera el primer periodo de estrés en el acuífero. Asimismo, el número de puntos de observación aumentó a 19, de los cuales 16 se encuentran dentro del área de celdas activas y se utilizaron como base para la calibración del modelo durante este periodo de estrés del acuífero. El efecto del bombeo se empieza a notar claramente en la curva con valor de 1950 msnn (Figura 4.3), pues las isopiezas empiezan a separarse en el área del tajo para empezar a formar el cono de abatimiento.

Inicio de excavación del tajo: Enero 2008 a Diciembre 2010

En el 2008 inicia la excavación del tajo, de modo que entre este año y el 2010 entran en operación ocho pozos más para desaguar y permitir el avance de la excavación del tajo. El incremento de bombeo provoca un descenso notable en el nivel estático, de modo que el cono de abatimiento se manifiesta claramente en las isopiezas (Figura 4.4). No obstante, hacia los extremos del área del modelo no se producen cambios significativos en las curvas. El número de puntos de observación se incrementó a 25, de los cuales 18 se encuentran dentro del área de celdas activas, y fueron utilizados para la calibración del modelo en estrado transitorio para el periodo de estrés 2007 – 2010.

Excavación del tajo: Enero 2009 a Marzo 2013

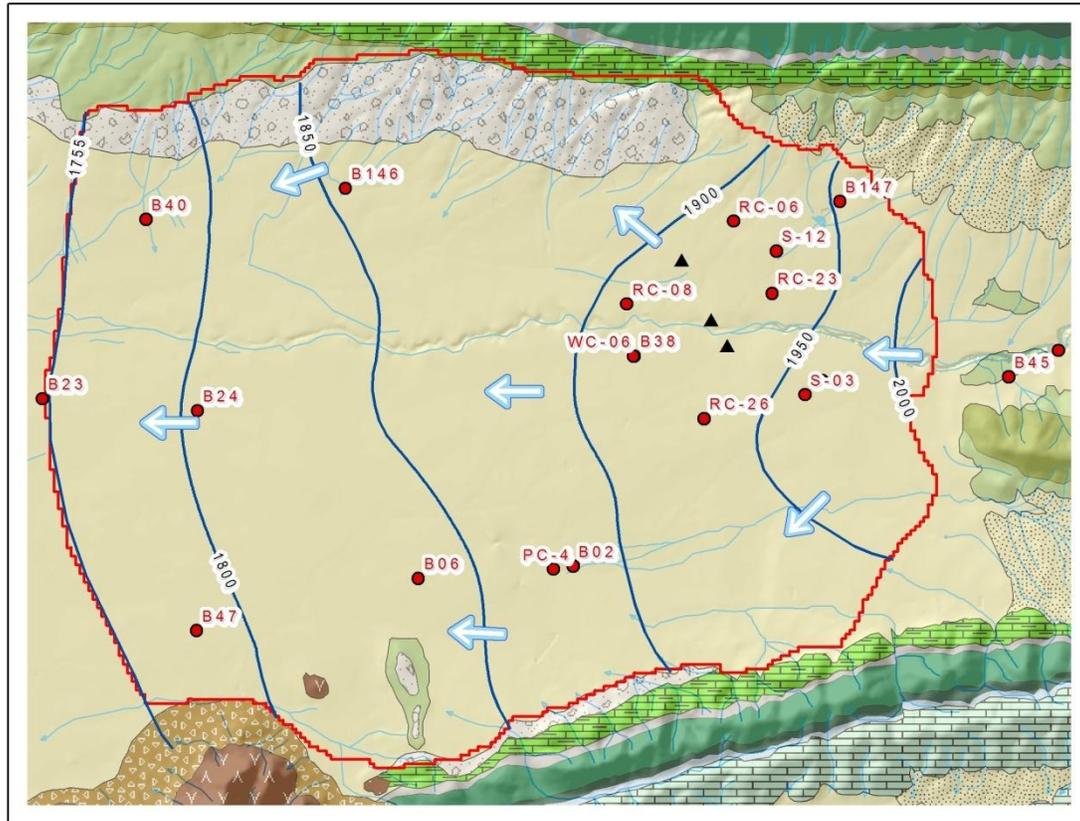
Finalmente, durante el periodo 2010–2013 se realiza una intensa campaña de perforación en el área de estudio, resultando en la adición de 27 pozos de desagüe y de 30 puntos de observación además de 6 previamente construidos. Para este periodo, que fue el de mayor estrés para el acuífero, se tuvieron 35 puntos de calibración para el modelo matemático (Figura 4.5). Las curvas de igual elevación del nivel estático muestran la forma del cono de abatimiento con una tendencia predominante NW-SE que coincide con la dirección de las principales estructuras definidas en el tajo y en menor medida, NE-SE.



LEYENDA



Figura 4.2 Configuración de elevación del nivel estático en Octubre de 2004. Este periodo incluye nueve puntos de observación con los cuales se estimaron las curvas de isovalores de elevación del nivel estático que muestra que el flujo durante el periodo es claramente de este a oeste. En las zonas de piedemonte se infiere un flujo paralelo a los arroyos, moviéndose a través de la capa aluvial.



LEYENDA

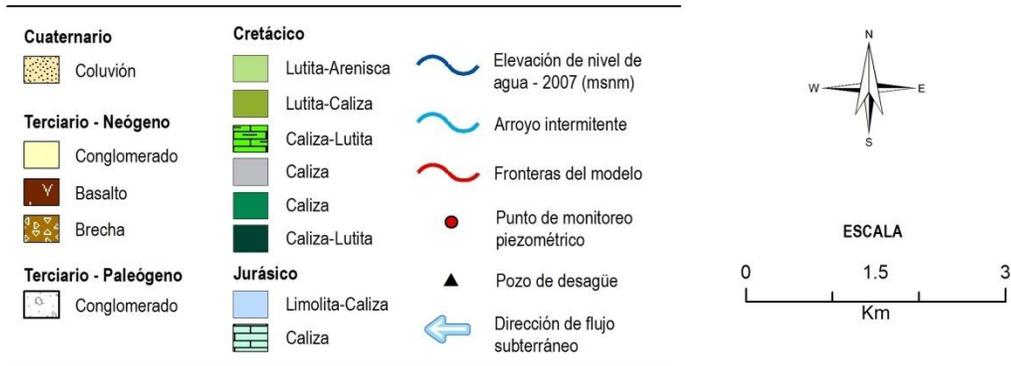
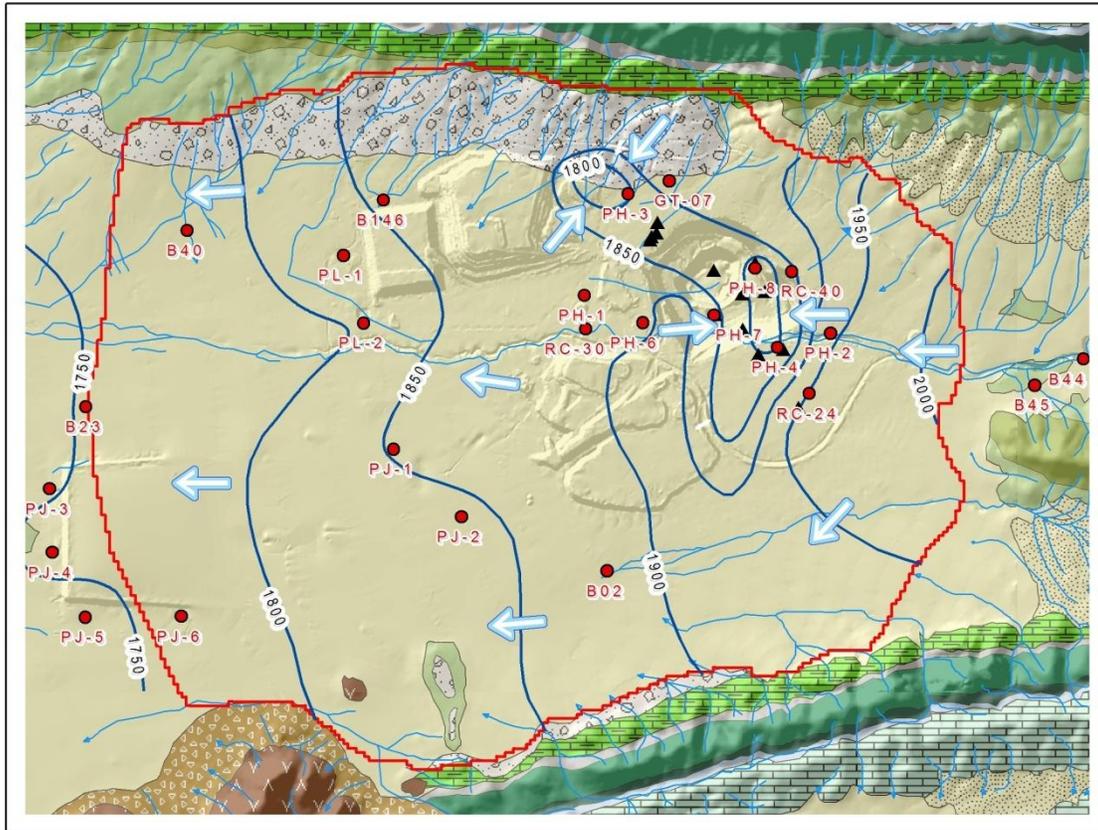


Figura 4.3 Configuración del nivel estático en Diciembre 2007. A finales de este periodo inician operación los primeros tres pozos de desagüe ubicados en el área donde se planea excavar el tajo. Se observa el efecto que estos pozos tuvieron en la capa aluvial mediante la distorsión de la curva 1950 msnm. No obstante, la dirección de flujo se mantiene este – oeste. La piezometría fue trazada con 19 puntos de referencia, de modo que fue inferida en zonas sin información como al sureste el área del modelo.



LEYENDA

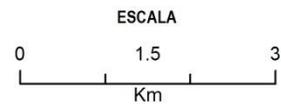
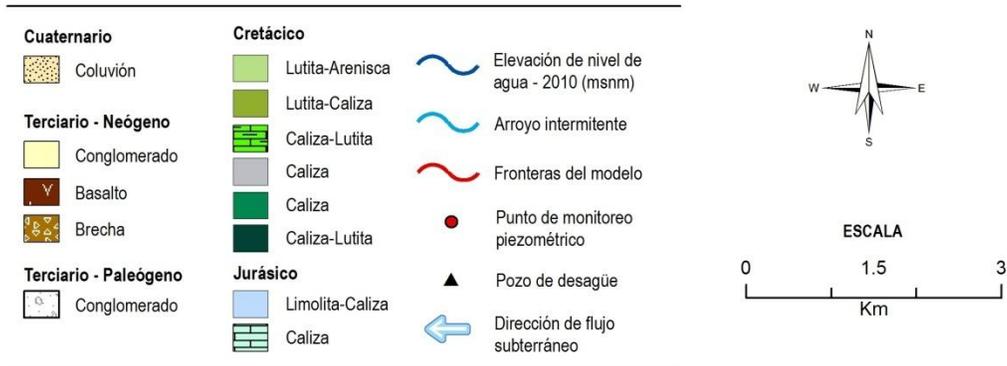


Figura 4.4 Configuración de la elevación del nivel estático en diciembre de 2010. Durante este periodo se perforan varios puntos de monitoreo, incluyendo tres en la presa de jales y tres en el patio de lixiviación llegando a 25 puntos para configurar las curvas piezométricas. Se observa la formación del cono de abatimiento en el área del tajo, derivado de la operación de 13 pozos de desagüe.

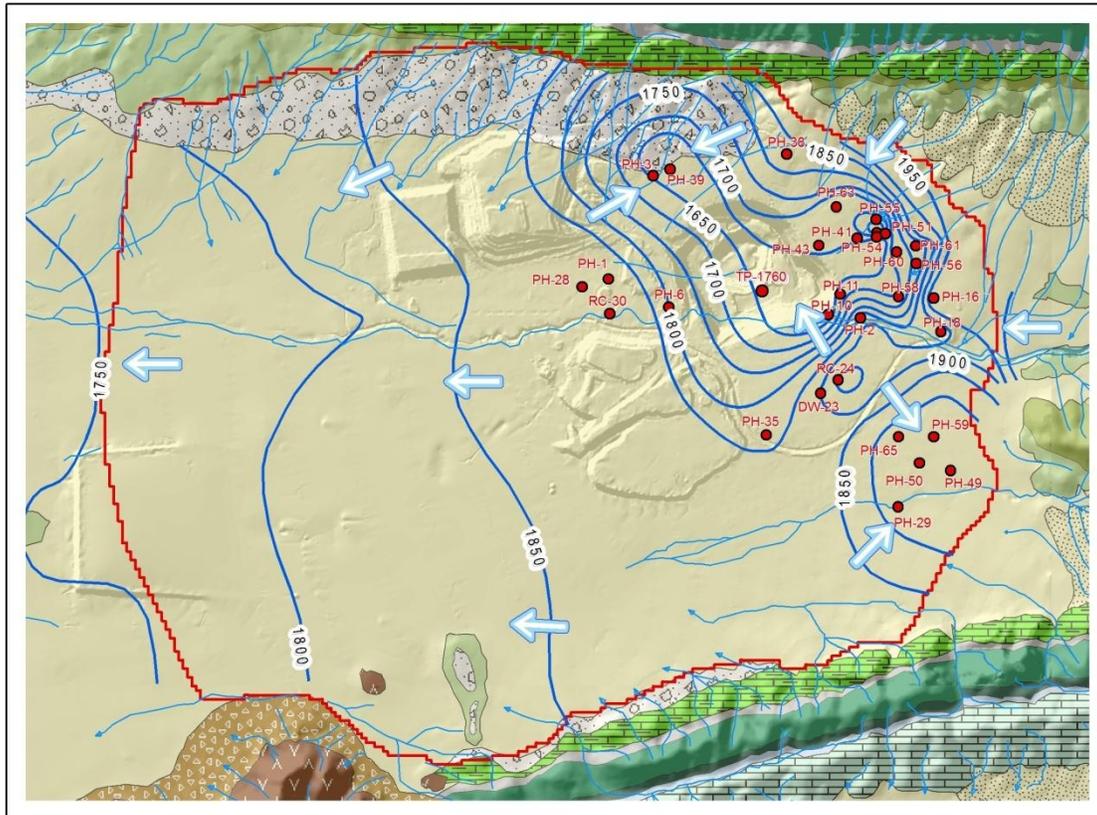


Figura 4.5 Configuración de la elevación del nivel estático en marzo de 2013. Durante este periodo se intensificó el bombeo principalmente en los alrededores del tajo, mediante la operación de 34 pozos de desagüe. Asimismo, se incrementó el número de pozos de observación llegando a 36. El cono de abatimiento resultante muestra la forma general de la dirección de la mayor conductividad hidráulica, que coincide con la dirección principal de fallamiento.

Pozos de desagüe

Dado que el mineral de mena se encuentra en la zona saturada del acuífero fracturado, ha sido necesario perforar pozos de desagüe dentro y alrededor del tajo, para permitir las operaciones de minado y reducir costos de acarreo y en explosivos, así como para evitar la generación de drenaje ácido. El agua que se extrae del desagüe se utiliza para control de polvos mediante el riego de caminos y en parte para abastecer a las plantas de lixiviación y flotación. Otros usos menores son barrenación y suministro de agua a oficinas.

Dado que el objetivo principal de los pozos de desagüe es mantener el nivel del agua por debajo del fondo del tajo, la disminución en la columna de agua en cada pozo disminuye paulatinamente con el tiempo, lo que se deriva en una pérdida gradual del caudal. Por lo tanto, se han perforado pozos cada vez más profundos (700 – 800 m) para reemplazar a los de menor profundidad que han salido de operación porque su bajo caudal eleva los costos de operación. Por otro lado, algunos pozos fueron perforados al interior del tajo, de modo tuvieron que ser removidos para permitir el avance del mismo.

4.1.3 Enfoques de modelación

La modelación de los acuíferos fracturados es muy complicada debido a la diferencia de las propiedades hidráulicas entre las familias de fracturas y la matriz, de modo que la principal dificultad es la representación de esta heterogeneidad. Para esto, comúnmente se utilizan tres enfoques de modelación para cuantificar flujo y transporte en medios fracturados, los cuales se pueden clasificar en orden de complejidad matemática y requerimiento de información como (Rausch et al. 2005):

- Modelos de dominio único, como el enfoque de Medio Poroso Equivalente,
- Modelos multi-dominios, que incluye doble porosidad y doble permeabilidad
- Modelos de fracturas discretas

En el primero, el acuífero fracturado se modela como un acuífero granular equivalente, de modo que se consideran a las fracturas y la matriz como un dominio único, compartiendo un mismo esquema de propiedades hidráulicas. El enfoque multi-dominio considera la interacción de más de un dominio, que pueden ser la matriz y las fracturas. En el caso en que se consideran dos dominios, el enfoque usualmente se denomina como dual-continuo, el cual es aplicable en el caso que una formación rocosa contenga fracturas a múltiples escalas, de modo que las fracturas más grandes pueden representarse como un dominio fracturado, mientras la matriz que contiene fracturas a menor escala no se considera impermeable, de modo que puede conformar el segundo dominio. El caso en que se considera que la matriz es impermeable, de modo que no participa activamente en el flujo y transporte pero es porosa y puede almacenar soluto que se difunde desde la fractura hacia los poros de la matriz, se define como doble porosidad. El tercer enfoque de modelación en acuíferos fracturados es el de fracturas discretas, donde las fracturas se representan de forma individual en el modelo de acuerdo con su localización, orientación, longitud y apertura con una matriz que puede o no ser impermeable (Rausch et al. 2005). En el presente estudio la información disponible permite aplicar los enfoques de medio poroso equivalente y dual-continuo. El tercer enfoque se considera inapropiado por la escala y por falta de información precisa de las propiedades hidráulicas y de la apertura de las fallas.

4.2 Metodología

4.2.1 Análisis de datos de entrada

Datos para calibración

El área de estudio cuenta con una gran cantidad de información piezométrica obtenida en 64 puntos de observación. Los datos inician con mediciones trimestrales desde el año 2004 y con información semanal a partir del 2010. Esto permitió la elaboración de hidrógrafos para detectar gráficamente los datos anómalos y descartarlos de la base de datos. De este modo, para la calibración de los modelos se utilizaron datos confiables para cada periodo de estrés. Adicionalmente, los puntos de observación que se encontraban a pocos metros de

un pozo de bombeo fueron descartados para la calibración por presentar niveles estáticos afectados por el pozo.

Por otro lado, la información del bombeo inicialmente fue determinada de acuerdo con reportes semanales generados desde el inicio del bombeo del primer pozo de desagüe. A partir de marzo del 2011, se cuenta con información del volumen diario de extracción por pozo. De este modo, al igual que con los datos de calibración se realizaron gráficos de evolución de caudal para descartar y en su caso reparar los datos anómalos, sustituyendo el dato incongruente con el promedio de volumen de bombeo de los días cercanos.

4.2.2 Enfoques de modelación

Enfoque 1: Medio poroso equivalente

Este enfoque se realizó mediante la forma tradicional de la modelación consistente en la definición de unidades hidrogeológicas con parámetros hidráulicos propios. Dado que el modelo corresponde con la hidrogeología de un acuífero fracturado asociado con una diatrema, las capas del modelo no representan unidades estratificadas, si no que se utilizaron como apoyo para definir la geometría de esta formación. Por lo tanto, se consideraron nueve unidades hidrogeológicas (Tabla 4.1 y Figura 4.6), cuya delimitación se realizó con base en los tres modelos sólidos interpolados. Para esto, se delimitaron las unidades en cada capa en el programa ArcMap 10.0 y se exportaron las polilíneas a formato dxf para poderlas visualizar en ModFlow. La asignación de conductividad hidráulica se realizó con base en los resultados de las pruebas de bombeo, considerando una relación entre conductividad hidráulica vertical y horizontal $K_h / K_v = 10$ en todas las capas. Debido a la tendencia del fallamiento a ser vertical, se realizaron pruebas considerando una relación $K_h / K_v = 5$ para las celdas de intrusivo, brecha y lutita con alteración moderada a fuerte. No obstante, no se observaron cambios significativos en la calibración, de modo que se decidió volver a la relación inicial.

Tabla 4.1 Unidades hidrogeológicas para el primer enfoque de modelación.

Unidad hidrogeológica	Capas en las que se encuentra
Aluvión	1
Zona de transición aluvión – roca	2 y 3
Roca intemperizada en el área del tajo	3 y 4
Lutitas sin alteración	3 - 17
Calizas	1 - 17
Zona de transición entre lutitas sanas y lutitas alteradas	5 - 17
Lutitas alteradas	5 - 17
Zona de bajo RQD	5 - 17
Intrusivo – Brecha	5 - 17

Enfoque 2: Medio poroso equivalente parametrizado

El presente enfoque de modelación se realizó utilizando la información hidráulica para cada celda obtenida en el capítulo anterior en función de las ecuaciones exponenciales correspondientes con cada grupo hidrogeológico. De este modo, la transición modelo conceptual–modelo matemático se realizó de forma cuantitativa, fijando la conductividad hidráulica en cada celda. Los valores de las tres variables para cada celda se exportaron a una base de datos, incluyendo sus coordenadas. En esta base de datos se introdujeron las ecuaciones definidas en el capítulo anterior en función de las tres variables, para obtener la conductividad hidráulica K_{xx} , K_{yy} .

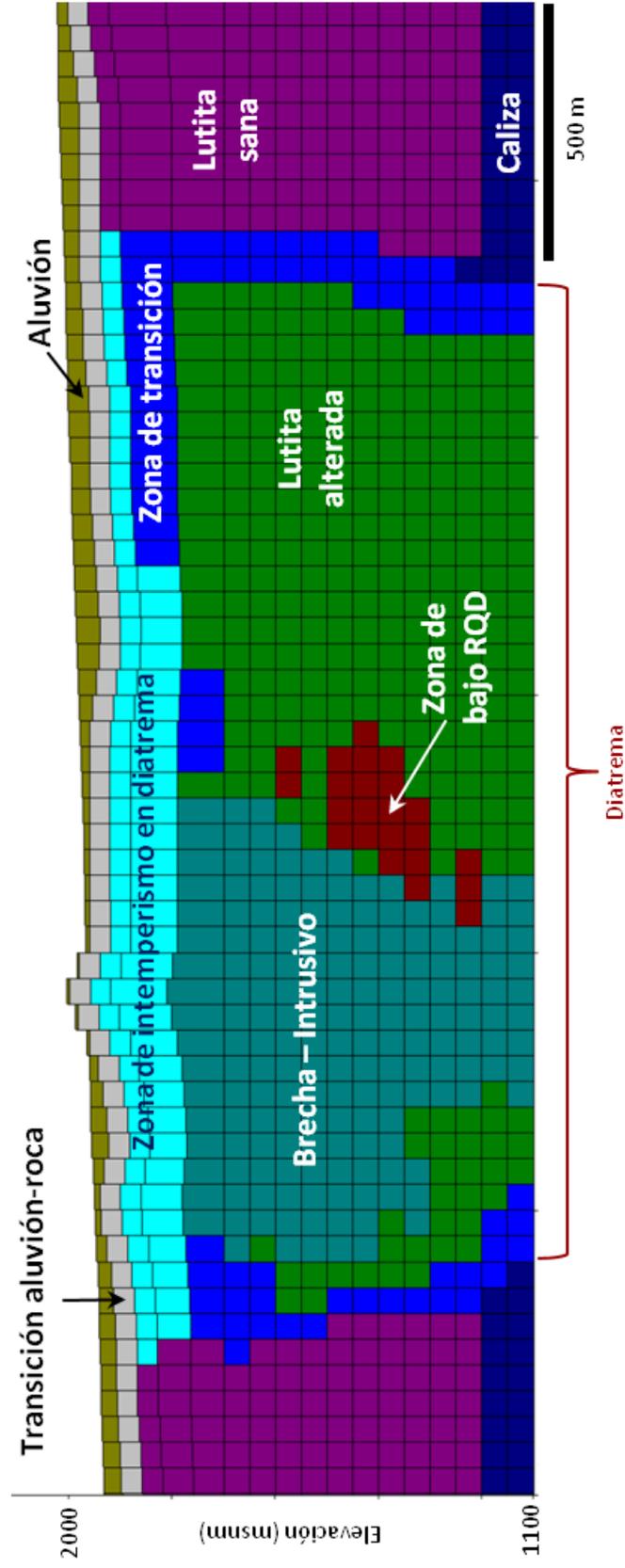


Figura 4.6 Unidades hidrogeológicas modeladas en el enfoque 1, con base en los modelos sólidos de RQD, alteración y litología. La sección es Oeste – Este y muestra la forma de la diatrema, así como la distribución de las unidades hidrogeológicas.

Para convertir el valor de K_x y K_y mediante las ecuaciones exponenciales, se utilizó la siguiente función lógica en Excel:

$$=SI(En=1,SI(Fn=0,0.000001*EXP(-0.07*Dn),SI(Fn=1,0.000001*EXP(-0.07*Dn),SI(Fn=2,0.000001*EXP(-0.07*Dn),SI(Fn=3,0.00008*EXP(-0.078*Dn),SI(Fn=4,0.00008*EXP(-0.078*Dn),0.00008*EXP(-0.078*Dn))))),SI(En=2,SI(Fn=0,0.000001*EXP(-0.07*Dn),SI(Fn=1,0.000001*EXP(-0.07*Dn),SI(Fn=2,0.000001*EXP(-0.07*Dn),SI(Fn=3,0.00008*EXP(-0.078*Dn),SI(Fn=4,0.00008*EXP(-0.078*Dn),0.00008*EXP(-0.078*Dn))))),0.0001*EXP(-0.075*Dn)))$$

donde D corresponde con el valor de RQD que puede variar de 0 a 100; E representa la litología predominante en cada celda, variando de 1 a 4; F define el grado de alteración y n es el número del reglón que contiene los datos de la celda evaluada. Para obtener la conductividad hidráulica vertical, sólo se consideró $K_v = 0.1K_h$, para lograr la relación $K_h / K_v = 10$.

Algunos autores (p. ej. de Marsily 2005) consideran que el uso de modelos simples ya no está justificado en hidrogeología pues actualmente el tiempo computacional en la actualidad no es una limitante. No obstante, existen autores que se manifiestan en contra de la alta parametrización en los modelos pues no ha mostrado ser de gran utilidad (p. ej. Voss 2011). Por lo tanto, el objetivo de este enfoque es analizar la utilidad de la alta parametrización, pues en este modelo cada celda tiene un valor de conductividad hidráulica único de acuerdo con la expresión $K_n = f(RQD, Litología, alteración)$, donde K_n es la conductividad hidráulica en la celda n (Figura 4.7).

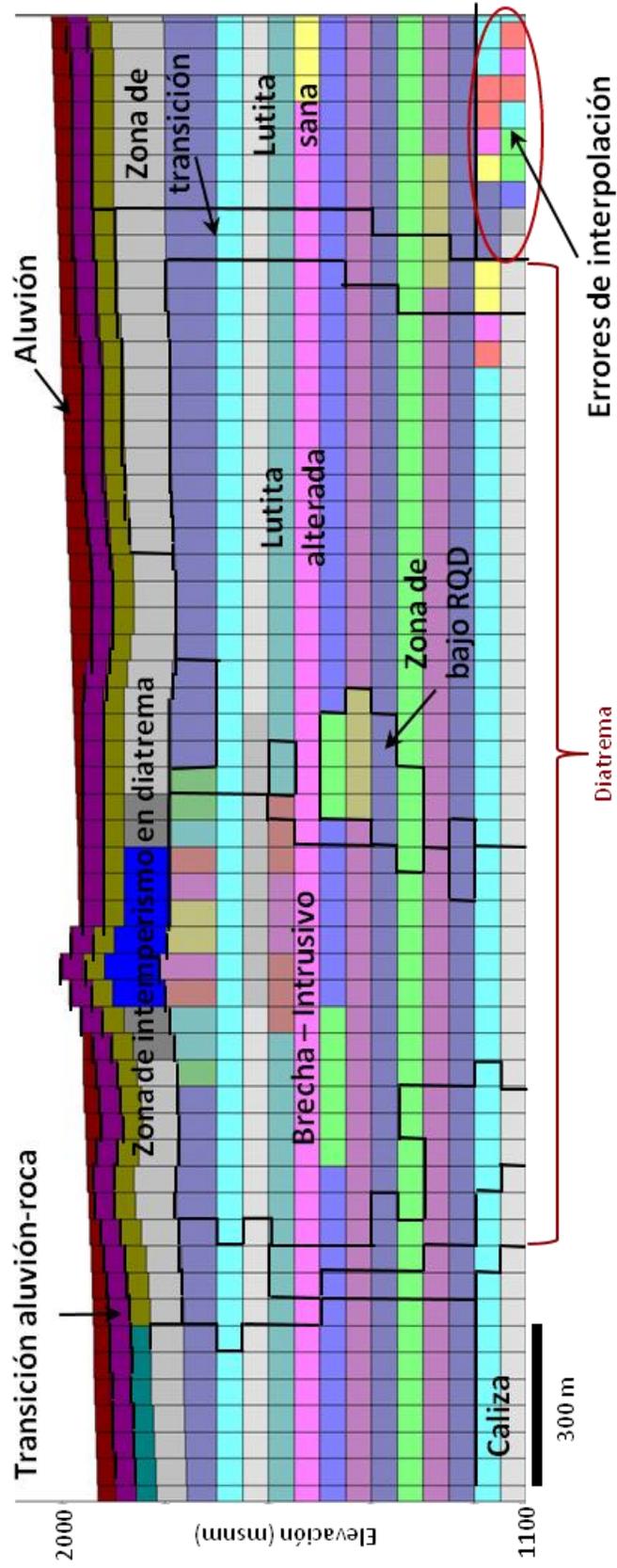


Figura 4.7 Distribución de conductividad hidráulica en el enfoque 2, obtenida mediante ecuaciones que relacionan los valores cuantitativos de RQD, alteración y litología obtenidos a partir de los modelos sólidos, de modo que cada celda presenta un valor único. La sección es Oeste - Este.

Enfoque 3: Medio dual-continuo

La simulación del flujo a través de la heterogeneidad del medio geológico requiere que los modelos numéricos incluyan los aspectos importantes de las estructuras que dominan flujo y que sean representadas de forma precisa (Giambastiani 2012). Por lo tanto, la modelación en el presente enfoque incluye la coexistencia de los dos dominios hidroestructurales que se manifiestan en el área del modelo utilizando un enfoque de modelación híbrido entre Red de Fracturas Discretas y Medio Poroso Equivalente (RFD-MPE) de forma similar al trabajo realizado por Surrete et al. (2008), (Figura 4.8).

La geometría de las estructuras principales fue definida por Goodman (2012), de las cuales se seleccionaron seis para ser introducidas al modelo por ser asociables con los pozos que fueron incluidos dentro del dominio de fallamiento regional. El principal criterio de selección fue el de incluir a las fallas más jóvenes, pues son las que tienden a presentar mayor permeabilidad que las más antiguas, pues éstas últimas tienden a encontrarse rellenas por minerales. En este sentido, se incluyó la falla que presenta un rumbo NE 6° (Figura 3.7, capítulo III) debido a que es la más joven, pues trunca a todas las demás y se consideró de mucha importancia su inclusión en el modelo aunque no afecte directamente a ningún pozo. Todas las fallas fueron proyectadas desde la capa tres hasta la capa 31, considerando que estas no se prolongan en la capa aluvial ni en la interfase aluvión – roca. Asimismo, todos los pozos clasificados dentro del dominio de fallamiento regional fueron modelados incluyendo una falla asociada, a excepción del pozo DW6 cuya asociación es incongruente con el modelo conceptual. Dado que este pozo fue perforado a poca profundidad (200 m), se considera que su alta conductividad hidráulica se derivó de las primeras capas, de modo que sus valores fueron de utilidad para ajustar los valores en las primeras capas del modelo.

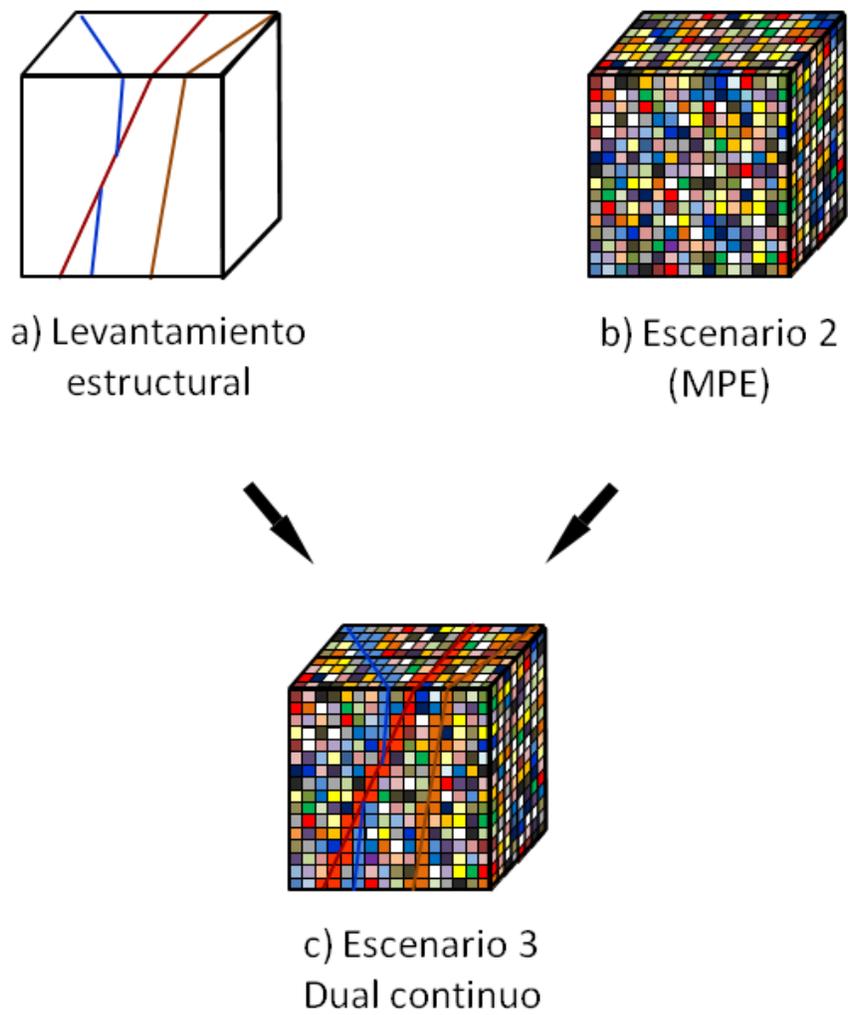


Figura 4.8 Procedimiento para incluir la geometría del dominio de fallamiento regional en el modelo matemático. A partir de la información estructural y de la distribución de conductividades hidráulicas del enfoque 2, se modeló el enfoque dual-continuo, incluyendo las estructuras de acuerdo con su geometría y con su conductividad hidráulica estimada.

El modelo estructural de Goodman (2012) se realizó sólo para el área del tajo, de modo que en el área donde se encuentra el pozo DW41, incluido dentro del dominio de fallamiento regional, no se cuenta con información estructural. Por lo tanto, fue necesario definir una estructura hipotética con base en el rumbo de un lineamiento observado en imagen de satélite asociable con la zona del pozo (Figura 4.9). La facilidad para identificar estructuras es una de las ventajas principales de las imágenes de satélite, lo cual es de gran valor en la evaluación de acuíferos fracturados (p. ej. NRC 1996). La dirección y ángulo de inclinación fue aproximado a la vertical (84°), pues se observa que el lineamiento es recto y corta varias curvas de nivel (Ragan 1987). El ángulo fue definido considerando la profundidad teórica a la que el pozo debió cortar la estructura.

4.2.3 Modelo matemático

Software

El código de simulación utilizado fue el modelo de flujo subterráneo modular MODFLOW-2005 (Harbaugh 2005), que es una versión mejorada del modelo de agua subterránea en diferencias finitas comúnmente llamado MODFLOW. Mediante este código se simuló condiciones transitorias a partir de 2004 al 2013 para calibración y del 2013 al 2022 en predicción, así como una distribución de cargas hidráulicas iniciales en estado estacionario para el 2004, representando las condiciones previas al bombeo. El periodo de predicción consideró nueve años a partir de los últimos datos utilizados para la calibración, siguiendo la regla general en modelación que establece que las predicciones más allá de un periodo igual al periodo de ajuste histórico no son confiables (Bredehoeft 2005).

El método numérico para la resolución de las ecuaciones utilizado fue el método algebraico multi-malla (SAMG) pues Thum y Stüben (2012) demostraron que este método es muy adecuado para el código MODFLOW-2005 en los modelos en estado estacionario y modelos transitorios con pasos de tiempo grandes como los que se aplicaron en el presente estudio, pues reduce significativamente el tiempo de cada simulación.



Figura 4.9 Imagen de satélite del valle de Mazapil que muestra el lineamiento asociable con la falla que afecta al pozo DW41. Se observa que la misma dirección del lineamiento se repite en el valle.

Área de modelación

El área de modelación fue definida con base en la cantidad de información geológica e hidráulica disponible, abarcando la totalidad del área operativa de la mina, donde se tiene la información de los barrenos de exploración con los que se elaboró el modelo conceptual. El área del modelo es de 160 km^2 ($10 \times 16 \text{ km}$) con celdas de $50 \times 50 \text{ m}$ en un arreglo de 200 reglones y 320 columnas. La mínima elevación a la que se estima que el tajo será excavado es de 1250 msnm, de modo que se definió como elevación mínima del modelo 1100 msnm con el fin de quedar 150 m por debajo de la elevación mínima del tajo. La máxima elevación es de 2020 msnm de acuerdo con la topografía. Se incluyeron 17 capas, donde las primeras 7 son de espesor variable ($\sim 50 \text{ m}$) en función de la topografía y el resto presentan 50 m de espesor (Figura 4.6), con el fin de variar las características hidráulicas a intervalos máximos de 50 m dada la heterogeneidad del medio.

Para el caso de la modelación del enfoque dual-continuo, se refinó la malla principalmente en el área del tajo, abarcando 9.8 km² con el fin de permitir la adición de las fallas que conforman el dominio de fallamiento estructural. Este refinamiento consistió en dividir cada celda de 50 m x 50 m en nueve partes de 16.3 x 16.3 m. Un refinamiento mayor no fue posible dado que la carga computacional se incrementó notablemente. El modelo conceptual del presente estudio considera al medio de fallamiento regional como un conjunto de zonas de falla de espesor variable, el cual no pudo ser determinado con precisión, sin embargo varios pozos que claramente pertenecen al dominio de fallamiento regional (RQD promedio >90%), mostraron zonas con bajo RQD asociables a zonas de falla entre 10 y 20 de espesor (pozos DW17 y 25), de modo que se considera que 16.3 m es un ancho aceptable. Como comparación, Surrete et al. (2008) consideran en su modelo conceptual que el espesor de la zona de falla varía entre 1 y 100 m.

Celdas activas

De acuerdo con la información piezométrica, se inactivaron las celdas que se encuentran en las sierras al norte y sur del área de modelación, pues se consideran de muy baja conductividad hidráulica. Por otro lado, al este y oeste la delimitación de las celdas activas estuvo en función de la ubicación de los puntos de observación, pues con ellos se definieron las celdas de carga constante. Esto es, se seleccionaron los puntos con información que muestra una evolución mínima del nivel estático durante los periodos de estrés.

Calibración

En la modelación se ejecutaron dos pasos básicos: el desarrollo de un modelo en estado estacionario para determinar la distribución espacial de las cargas hidráulicas iniciales y de la conductividad hidráulica en las primeras capas. Posteriormente, se modeló en estado transitorio durante un periodo de 9 años (2004 – 2013), dividido en tres periodos de estrés, considerando una recarga media anual constante y un caudal de bombeo variable de acuerdo con la información operativa diaria con que se cuenta.

El objetivo de la modelación en estado estacionario fue calibrar la conductividad hidráulica de las primeras capas, que incluye la zona de depósitos aluviales y la zona de intemperismo en el contacto aluvión-roca, hasta lograr la distribución de las cargas hidráulicas coincidentes con las cargas medidas en el 2004 en función de las celdas de carga constante definidas. La ventaja es que esta calibración es independiente de los parámetros de almacenamiento, de modo que el valor de conductividad hidráulica calibrada se tomó como base para el modelo transitorio.

Durante la modelación en estado transitorio se utilizó el procedimiento de prueba y error, pues se consideró que el método automatizado (PEST) no respondería consistentemente con el modelo conceptual. El procedimiento de calibración fue diferente para cada enfoque. Para el primer enfoque, se variaron las conductividades hidráulicas y parámetros de almacenamiento de las zonas, buscando la mejor correspondencia entre cargas simuladas y cargas reales de forma congruente con el modelo conceptual. Para el segundo enfoque, la conductividad hidráulica fue estimada en cada celda con ecuaciones en función de los atributos geológicos, de modo que la calibración consistió principalmente en el ajuste de los parámetros de almacenamiento. Eventualmente, se colocaron zonas para corregir errores de interpolación de los modelos sólidos que dieron origen a las ecuaciones utilizadas, derivados de zonas con poca información geológica. Por último, en el tercer enfoque la calibración estuvo centrada en el ajuste de la conductividad hidráulica de las zonas de falla y en los parámetros de almacenamiento.

Finalmente, se realizó una calibración enfocada en el tajo utilizando la información mensual obtenida del piezómetro TP-1760 para el periodo marzo 2013-enero 2014. Esta calibración consistió primordialmente en el ajuste de los parámetros de almacenamiento y se realizó con el fin de dar mayor confiabilidad a las predicciones para el desarrollo del plan de desagüe.

Predicciones

Se modelaron las condiciones de bombeo en periodos anuales de estrés de enero de 2014 a enero de 2022, con el mismo número de pozos y manteniendo la tendencia del bombeo (Tabla 4.2). Por otro lado, para el plan de desagüe a largo plazo se utilizó el modelo dual-continuo, modelando las condiciones anteriores en los pozos pre-existentes y colocando diez pozos más dentro del tajo.

Operativamente, la mina pone fuera de operación los pozos cuyo caudal es menor que 259 m³/día (3 l/s), pues el consumo de energía y mantenimiento es muy alto con respecto al beneficio que el pozo proporciona. Esto se debe a que los pozos pierden caudal paulatinamente en la medida que su columna de agua disminuye, lo cual es normal en los pozos de desagüe de las minas pues su objetivo es hacer descender el nivel de agua para permitir el avance de la excavación. Por lo tanto, para realizar las predicciones se realizó la proyección de la tendencia del caudal por pozo, estimando el caudal para hasta enero del 2022 con base en la ecuación con mejor ajuste con los datos de bombeo.

En el segundo caso, además de incluir los volúmenes de bombeo estimados para los pozos existentes, se incluyeron diez pozos ubicados dentro del tajo para lograr mantener el nivel de agua por debajo del fondo del tajo de acuerdo con el plan de minado a largo plazo. El bombeo de los diez pozos fue distribuido en dos etapas principales. En la primera, los primeros cinco pozos inician bombeo en abril del 2014, y en la segunda inician en enero del 2018. A todos los pozos se les asignó un caudal de 3024 m³/día (35 l/s), pues es el promedio aproximado del caudal a largo plazo estimado para los pozos DW39 y DW42 que se encuentran dentro del tajo. Por otro lado, desde el punto de vista operativo, los pozos dentro del tajo generan condiciones riesgosas durante su perforación y operación de modo que usualmente se trata de tener el menor número de pozos posible dentro del mismo. Es por esto que en el plan no se contempló la colocación de los 10 pozos desde el 2014.

Tabla 4.2 Bombeo simulado para los años del 2014 al 2022, en metros cúbicos por día (m³/día). Los volúmenes corresponden con el mes de enero de cada año. Los pozos del DW49 al DW58 integran el plan de desagüe a largo plazo, entrando cinco en operación en el 2014 y cinco en el 2018.

Pozo	Año								
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
13	-642	-531	-493	-436	-229	0	0	0	0
26	-563	-431	-404	-365	-194	0	0	0	0
27	-435	0	0	0	0	0	0	0	0
28	-2236	-2263	-2263	-2263	-2263	-2263	-2263	-2263	-2263
30	-13	0	0	0	0	0	0	0	0
32	-287	0	0	0	0	0	0	0	0
33	-1776	-1776	-1776	-1776	-1776	-1776	-1776	-1776	-1776
39	-3486	-3568	-3568	-3568	-3568	-3568	-3568	-3568	-3568
41	-4631	-4631	-4631	-4631	-4631	-4631	-4631	-4631	-4631
42	-3621	-3367	-3249	-3034	-2817	-2601	-2385	-2170	-1953
44	-898	-464	-252	0	0	0	0	0	0
45	-2985	-1735	-1049	0	0	0	0	0	0
46	-1834	-1235	-882	0	0	0	0	0	0
MW01	-299	0	0	0	0	0	0	0	0
49	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
50	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
51	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
52	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
53	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
54	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
55	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
56	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
57	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
58	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024

4.3 Propiedades hidráulicas del acuífero

4.3.1 Balance hidrometeorológico

Recarga

Existen varios factores que afectan la recarga a los acuíferos. En una cuenca natural, la conductividad hidráulica y porosidad del suelo, la precipitación, la pendiente y el contenido de humedad del suelo se encuentran entre los factores más relevantes (Alaoui y Eugster 2004). Sin embargo, la tasa de recarga a un acuífero es uno de los factores más difíciles de medir al evaluar recursos de agua subterránea. Esta no puede ser medida directamente, de modo que su cuantificación con frecuencia está propensa a errores, requiriendo validación mediante varios métodos (Lerner et al. 1990).

La recarga media anual en el área de estudio se estimó utilizando la siguiente ecuación propuesta por Alwathaf y Mansouri (2012), que relaciona precipitación (P), escurrimiento superficial (Q), evapotranspiración (ET), recarga al acuífero (R) y cambio en el almacenamiento (∂S):

$$P = Q + ET + R \pm \partial S \quad (1)$$

Para el escurrimiento, IDEAS (2007) realizó un estudio donde se estima que el escurrimiento medio anual en la subcuenca del valle de Mazapil varía de 5.08 a 5.10 hm³/año, estimados por el método de Langbein (1949) y por el método de coeficiente de escurrimiento (CNA 2002). Dado que el área de la subcuenca es de ~270 km², la lámina de escurrimiento estimada es de ~19 mm/año.

Previamente se estableció que la precipitación media anual es de 400 mm y la temperatura media anual (T) es de 12.5 °C. De acuerdo con la ecuación empírica de Turc (1954),

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}, L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (2)$$

y la ecuación empírica de Coutagne (1954),

$$ET = P - xP^2, \quad x = (0.8 - 0.14T)^{-1} \quad (3)$$

el valor de evapotranspiración puede variar entre 363 y 337 mm, de modo que al aplicar (1), la lámina de recarga media anual (R) puede considerarse entre 19 y 44 mm, lo cual corresponde con una recarga entre 5 y 11% de la precipitación media anual. Esto es consistente con los resultados de Alwathaf y Mansouri (2012) quienes estimaron que la recarga por precipitación al acuífero corresponde con el 8% de precipitación en una cuenca donde la precipitación media anual varía de 150 a 250 mm, con eventos hasta de 350 mm, condiciones similares a la del valle de Mazapil. Por otro lado, los resultados son ligeramente más altos a los obtenidos por Scanlon et al. (2006) quienes establecieron que en zonas áridas y semi-áridas como la del presente estudio con áreas entre 40-374,000 km², la recarga varía de 0.2 a 35 mm por año, representando del 0.1 al 5% de la precipitación media anual en largo plazo.

Para definir el valor de recarga a utilizarse en todos los enfoques de modelación, se modelaron varias condiciones tomando como base el enfoque del medio poroso equivalente parametrizado, porque este comparte características con los otros dos modelos. Dado que la recarga varía entre 19 y 44 mm, se modelaron condiciones para estos dos valores y para su valor promedio (31.5 mm) con una sola zona para toda el área de modelación. Por otro lado, ya que los piedemonte de las sierras del área presentan mayor pendiente que el valle y que la roca que aflora es un conglomerado de baja conductividad hidráulica al norte y una caliza arcillosa al sur, se realizó una delimitación del área de piedemontes al norte y sur, y se asumió una recarga menor en esa zona. La lámina de recarga en cada zona se definió en función de su área, de modo que la suma de la recarga en las tres zonas fuera consistente con los valores promedio anuales obtenidos. Adicionalmente, se modeló una condición de recarga nula en toda el área para observar su efecto, así como una condición inversa a la definida anteriormente, considerando una recarga mayor en los piedemonte que en el valle. De este modo, se modelaron ocho tipos de recarga, variando en cantidad y distribución espacial.

En el área no se presentan corrientes superficiales perennes ni depósitos de agua. Únicamente se tiene la presencia de la presa de jales y el patio de lixiviación los cuales fueron cubiertos con capas impermeables para impedir la infiltración hacia el acuífero, de modo que estas entradas se consideran nulas.

Descarga

Las tensiones transitorias impuestas al sistema de flujo subterráneo en el área del modelo incluyeron solo el bombeo del agua subterránea mediante 41 pozos de desagüe que han funcionado durante diferentes periodos desde mediados del 2007. Los pozos funcionan las 24 horas del día, los 365 días del año y afortunadamente para el presente estudio se cuenta con registros de bombeo desde el primer pozo perforado, con lecturas de totalizadores semanales y a partir del 2011 con lecturas diarias.

Al inicio de las operaciones, durante el primer periodo de estrés sólo hubo cuatro pozos en operación, los cuales estuvieron ubicados principalmente en el área del tajo, por lo que en este periodo el volumen de bombeo fue mayor en el interior del tajo que en sus alrededores (Tabla 4.3). Durante el segundo periodo se perforaron varios pozos en los alrededores del tajo de modo que el bombeo se duplicó al exterior con respecto al volumen extraído en el interior. En el tercer periodo se realizó una intensa campaña de perforación de manera que la cantidad de pozos en operación aumentó significativamente de 13 a 34, pero el volumen de bombeo aumento sólo un 58% con respecto al periodo anterior. Esto fue debido a que varios de los pozos que resultaron con bajo caudal operaron por cortos periodos de tiempo, mientras que otros más antiguos disminuyeron su caudal hasta el punto en que fueron deshabilitados por su alto costo de bombeo y mantenimiento.

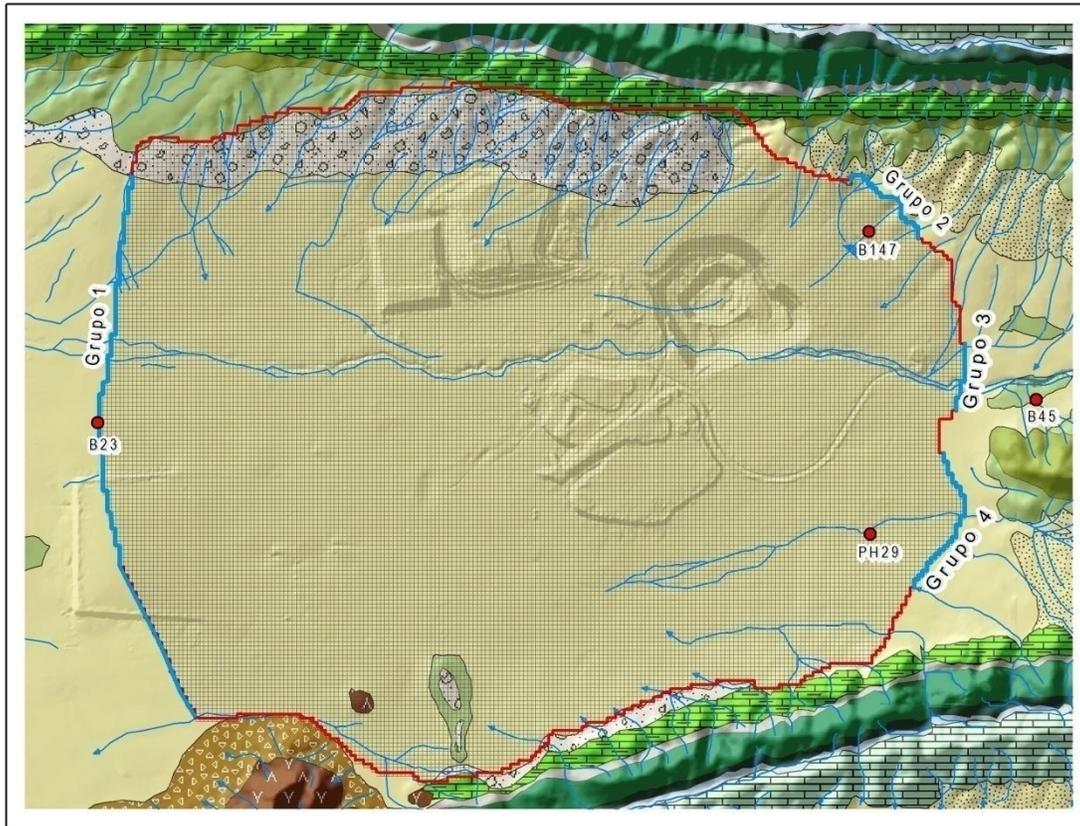
Tabla 4.3 Volumen de bombeo para los tres periodos de estrés modelados. Durante el primer periodo el bombeo fue enfocado hacia el tajo, mientras que en los siguientes el bombeo fue más intenso en sus alrededores.

Periodo de estrés	Pozos en operación	Volumen de bombeo (m ³)		
		Dentro del tajo	Fuera del tajo	TOTAL
Noviembre 2004 – Diciembre 2007	4	735,523	296,870	1,032,394
Enero 2008 – Diciembre 2010	13	3,199,390	6,226,613	9,426,004
Enero 20011 – Marzo 2013	34	6,530,767	9,849,435	16,348,503

4.3.2 Condiciones de frontera

El área de modelación fue delimitada con base en la piezometría y en la geología. Los límites norte y sur fueron delimitados con respecto a los afloramientos de las rocas cretácicas y las volcánicas del Terciario, por considerarse de conductividad hidráulica baja. Por otro lado, la frontera oeste fue definida con base en la isopieza 1600 msnm (Figura 4.2). Por último, la frontera este fue delimitada con base en la geología y en la piezometría.

Se definieron cuatro grupos de celdas de carga constante, tres ubicados al este y uno al oeste (Figura 4.10). El grupo 1 fue definido principalmente con base en los datos de evolución del pozo B23, el grupo 2 utilizando la información del pozo B147 y el grupo 3 con datos del pozo B45. Estos pozos presentan poca variación piezométrica durante el periodo de modelación (Tabla 4.4). Con respecto al grupo 4, no se tienen datos históricos, pues solo se cuenta con información del pozo de observación PH29, cuyo primer valor de carga hidráulica fue tomado en junio de 2012 (1820.2 msnm). Dado que en la zona en que se encuentra no hubo bombeo significativo, se consideró este valor como base para la carga inicial del grupo 4. Posteriormente, el monitoreo del pozo PH29 mostró un abatimiento de 33.69 m en seis meses sin bombeo en la zona, de modo que con esta información y con la calibración de los modelos se estimó que la frontera del grupo 4 presenta una carga menor que 1820 msnm y que se abate rápidamente. Los valores de carga hidráulica inicial y final se muestran en la Tabla 4.5.



LEYENDA

Cuaternario	Cretácico	Celdas de carga constante
Coluvión	Lutita-Arenisca	Arroyo intermitente
Terciario - Neógeno	Lutita-Caliza	Frontera del modelo
Conglomerado	Caliza-Lutita	Punto de monitoreo piezométrico
Basalto	Caliza	Malla (50 x 50 m)
Brecha	Caliza	
Terciario - Paleógeno	Caliza-Lutita	
Conglomerado	Jurásico	
	Limolita-Caliza	
	Caliza	

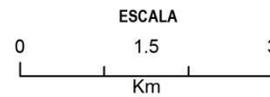
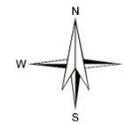


Figura 4.10 Distribución de las celdas de carga constante y malla utilizadas como base para la modelación. Para definir el valor de las celdas de carga constante se utilizaron los datos principalmente de los puntos de observación B147, B45 y PH29 al este y B23 al oeste.

Tabla 4.4 Evolución anual de los pozos de observación utilizados para la definición de la carga hidráulica en las celdas de carga constante.

Pozo	Carga hidráulica inicial (m)	Fecha de medición	Profundidad nivel estático final (m)	Fecha de medición	Evolución anual (m)
B23	1759.0	Octubre 2004	1753.2	Diciembre 2010	-0.97 m
B147	1954.7	Diciembre 2007	1941.8	Marzo 2013	-3.04 m
B45	2038.1	Octubre 2004	2033.7	Diciembre 2010	-0.73 m

Tabla 4.5 Valores iniciales utilizados en los grupos de celdas de carga constante.

Grupo	Carga inicial 2004 (msnm)	Carga 2013 (msnm)
1	1760	1751
2	1960	1933
3	2010	2003
4	1800	1733

Se consideró que no existe flujo subterráneo en los límites norte y sur del área de modelación, pues la piezometría no muestra claramente una recarga de esas zonas las cuales están formadas por un conglomerado consolidado de baja conductividad hidráulica subyacente por la Formación Caracol norte y por depósitos de conglomerado poco consolidado y poco espesor (< 50 m) subyacente por calizas arcillosas de baja conductividad hidráulica (Figura 4.10).

En el área no existen ríos perennes, lagos, drenes, ni zonas de evapotranspiración por medio de freatofitas. Los únicos depósitos de agua son los que corresponden con la operación de la mina (presa de jales, patio de lixiviación y pila de agua fresca), los cuales están aislados del subsuelo por capas de arcillas y materiales impermeables.

4.3.3 Simulaciones de flujo subterráneo

Enfoque 1: Medio Poroso Equivalente

En este enfoque la conductividad hidráulica se calibró tratando de quedar dentro del rango de valores obtenidos a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo en los pozos definidos dentro del dominio de matriz fracturada. La Tabla 4.6 muestra los rangos de valores y el valor final calibrado. Para el caso de la zona de transición entre lutitas sanas y lutitas alteradas no se identificó ningún pozo asociable, de modo que su valor se estimó tratando de que estuviera entre el valor de máximo de las lutitas sanas y el mínimo de las alteradas. No obstante, el valor calibrado fue muy similar al de las lutitas alteradas, de modo que el efecto de esta zona en la calibración del modelo es muy bajo.

Tabla 4.6 Rangos de conductividad hidráulica utilizados para la calibración del modelo en cada unidad hidrogeológica y valores de conductividad calibrada.

Unidad hidrogeológica	Conductividad hidráulica (m/s)		
	Pruebas de bombeo (K_h)	Calibración	
		K_h	K_v
Aluvión	3.7×10^{-6}	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-7}
Zona de transición aluvión – roca	3.7×10^{-6}	4.0×10^{-6}	4.0×10^{-7}
Roca intemperizada en el área del tajo	6.9×10^{-7} a 3.8×10^{-6}	7.0×10^{-7}	7.0×10^{-8}
Lutitas sin alteración	1.0×10^{-9} a 1.0×10^{-8}	2.0×10^{-9}	2.0×10^{-10}
Zona de transición entre lutitas sanas y lutitas alteradas	-	4.0×10^{-7}	4.0×10^{-8}
Lutitas alteradas	7.5×10^{-8} a 5.3×10^{-7}	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-8}
Calizas	3.1×10^{-8} a 1.1×10^{-7}	8.0×10^{-8}	8.0×10^{-9}
Zona de bajo RQD	3.4×10^{-7} a 2.5×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}
Intrusivo – Brecha	7.4×10^{-8} a 8.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-8}

La Figura 4.11 muestra la distribución de valores calibrados con respecto a los rangos de valores obtenidos en las pruebas de bombeo. Se observa que la mayoría se encuentran dentro de los rangos reales. En el caso de las primeras dos capas, el valor de referencia que se utilizó fue el correspondiente con la conductividad hidráulica del pozo DW6 pues se considera que su conductividad hidráulica se deriva principalmente de las primeras capas (aluvial y transición aluvión-roca). Adicionalmente, la figura muestra que todos los rangos que se obtuvieron en el presente estudio se encuentran dentro de los definidos por Shingal y Gupta (1999), los cuales son más amplios. Probablemente esto se deriva de que los rangos definidos por estos autores son de índole general, pues varían hasta por cinco órdenes de magnitud.

Con respecto a los parámetros de almacenamiento, en MODFLOW se hace una distinción entre las capas confinadas en las cuales los términos del almacenamiento se mantienen constantes durante la simulación y aquellas capas en las cuales el almacenamiento se puede “convertir” de un valor confinado a un valor de acuífero libre o viceversa dependiendo de si el nivel de agua queda por debajo o por encima de una celda (Harbaugh 2005). Por lo tanto, en condiciones de confinamiento MODFLOW aplicará el valor de coeficiente de almacenamiento (S_s), pero en las celdas donde fluctúa el nivel del agua aplicará el valor de rendimiento específico (S_y) en caso de que el nivel se encuentre por debajo del techo de la celda. Por lo tanto, para cada unidad hidrogeológica se definieron valores para ambos parámetros (Tabla 4.7). Shingal y Gupta citan valores de 1–5% para arcillas y de 5–20% para limos, lo cual se considera congruente con los valores asignados pues los sedimentos aluviales consisten principalmente arcillas y limos. Con respecto a la roca densa, Shingal y Gupta (1999) citan un rango de almacenamiento específico de 1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5} 1/m y de rendimiento específico de 0 a 3%, de modo que a las unidades de roca con alto RQD (lutita sana, lutita alterada y brecha-intrusivo) se les asignó un valor de 1.0×10^{-6} 1/m y 3%, respectivamente. Por último, para las zonas de bajo RQD, el valor de coeficiente de almacenamiento asignado fue de 4.9×10^{-5} 1/m, pues en la bibliografía el rango de valores para roca fisurada es de 1.0×10^{-5} a 1.0×10^{-4} 1/m, mientras que para el rendimiento específico el valor calibrado fue de 5% considerando que este es el valor máximo definido por Shingal y Gupta (1999) para roca cristalina fracturada.

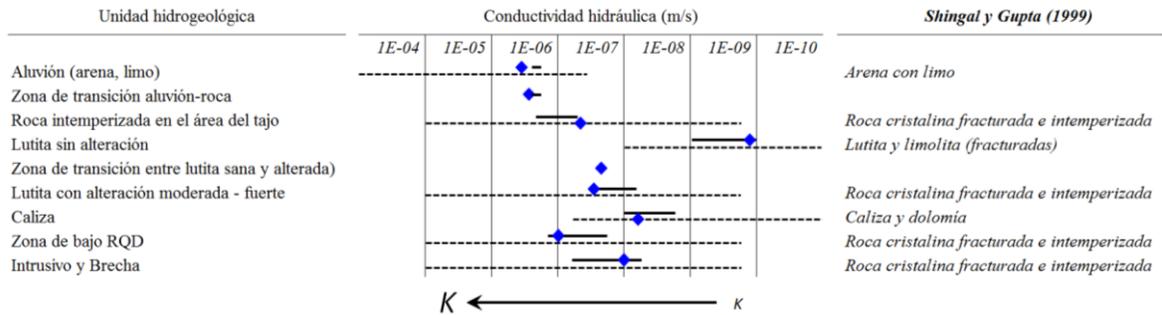


Figura 4.11 Distribuci3n de los valores de conductividad hidr1ulica calibrada (puntos en color azul) con respecto a los rangos obtenidos en las pruebas de bombeo (lnea continua). Como referencia se incluyen los rangos de valores definidos por Shingal y Gupta mediante una lnea segmentada (1999).

Tabla 4.7 Valores de par1metros de almacenamiento calibrados en el modelo en cada unidad hidrogeol3gica y valores obtenidos de bibliograf1a.

Unidad hidrogeol3gica	Par1metros de almacenamiento			
	Calibraci3n		Shingal y Gupta (1999)	
	Rendimiento espec1fico (%)	Almacenamiento espec1fico (1/m)	Rendimiento espec1fico (%)	Almacenamiento espec1fico (1/m)
Aluvi3n	6	1.0×10^{-4}	5 - 20	1.0×10^{-4} a 1.0×10^{-2}
Zona de transici3n aluvi3n – roca	5	1.0×10^{-4}	-	-
Roca intemperizada en el 1rea del tajo	5	1.0×10^{-4}	2 - 5	1.0×10^{-5} a 1.0×10^{-4}
Lutitas sin alteraci3n	1	4.0×10^{-6}	0.5 - 5	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Zona de transici3n entre lutitas sanas y lutitas alteradas	3	1.0×10^{-6}	0 - 3	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Lutitas alteradas	3	1.0×10^{-6}	0 - 3	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Calizas	2	2.0×10^{-6}	0.5 – 10, 1 ¹	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Zona de bajo RQD	5	4.9×10^{-5}	2 - 5	1.0×10^{-5} a 1.0×10^{-4}
Intrusivo – Brecha	3	1.0×10^{-6}	0 - 3	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}

¹ Slade et al (1985)

Enfoque 2: Medio poroso equivalente parametrizado

En este enfoque la conductividad hidráulica fue definida con base en las ecuaciones definidas en el capítulo anterior en función del RQD, litología y alteración obtenidos en los modelos sólidos de interpolación. Por lo tanto, este valor quedó fijo de tal manera que la calibración se realizó ajustando principalmente los parámetros de almacenamiento. No obstante, fue necesario ajustar la conductividad hidráulica a una zona al sur del tajo debido a que se generaba un gradiente hidráulico suavizado que no correspondía con el gradiente real producto del contacto de la lutita sana con lutita alterada. De este modo, la zona de ajuste mostrada en la Figura 4.12 se colocó para incrementar el gradiente hidráulico en la zona, haciéndolo más congruente con el modelo conceptual y con los datos de piezometría medidos lo cual se observó al mejorarse sustancialmente la correlación para los piezómetros PH-2, RC-24 y DW23.

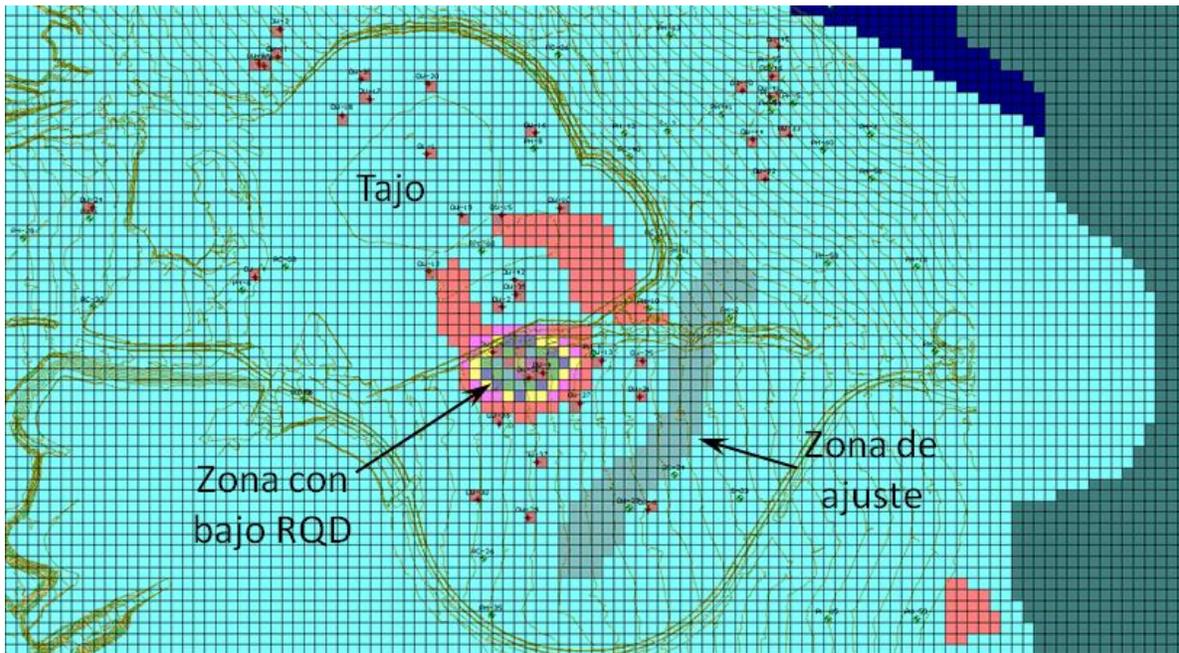


Figura 4.12 Zona de ajuste colocada para corregir el efecto de la interpolación. Esta zona se colocó debido a que el gradiente hidráulico es muy alto producto del contraste litológico. No obstante, esta condición no fue interpolada de forma consistente con la geología en los modelos sólidos.

Con respecto a los parámetros de almacenamiento, se mantuvo la misma distribución de zonas utilizada en el enfoque anterior. En general, la variación principal con respecto al enfoque anterior fue en las zonas de alto RQD (zonas de transición entre lutitas sanas y alteradas, lutitas alteradas e intrusivo–brecha) pues el almacenamiento específico en las rocas cristalinas cambió de 1.0×10^{-6} a 3.0×10^{-6} 1/m, y el rendimiento específico de 3 a 4%. En la zona de bajo RQD el coeficiente de almacenamiento cambió de 4.9×10^{-5} a 2.5×10^{-5} 1/m, así como las lutitas sanas que variaron de 4.0×10^{-6} a 3.0×10^{-6} 1/m. Por último, el almacenamiento específico de la roca intemperizada bajó de 1.0×10^{-4} a 2.5×10^{-5} 1/m (Tabla 4.8).

Tabla 4.8 Valores de parámetros de almacenamiento calibrados en el modelo en cada unidad hidrogeológica y valores obtenidos de bibliografía para el enfoque de modelación 2.

Unidad hidrogeológica	Parámetros de almacenamiento			
	Calibración		Shingal y Gupta (1999)	
	Rendimiento específico (%)	Almacenamiento específico (1/m)	Rendimiento específico (%)	Almacenamiento específico (1/m)
Aluvión	6	1.0×10^{-4}	5 - 20	1.0×10^{-4} a 1.0×10^{-2}
Zona de transición aluvión – roca	5	1.0×10^{-4}	-	-
Roca intemperizada en el área del tajo	5	2.5×10^{-5}	2 - 5	1.0×10^{-5} a 1.0×10^{-4}
Lutitas sin alteración	1	3.0×10^{-6}	0.5 - 5	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Zona de transición entre lutitas sanas y lutitas alteradas	4	3.0×10^{-6}	0 - 3	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Lutitas alteradas	4	3.0×10^{-6}	0 - 3	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Calizas	2	2.0×10^{-6}	0.5 – 10, 1 ¹	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Zona de bajo RQD	5	2.5×10^{-5}	2 - 5	1.0×10^{-5} a 1.0×10^{-4}
Intrusivo – Brecha	4	3.0×10^{-6}	0 - 3	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}

¹ Slade et al (1985)

Enfoque 3: Medio dual-continuo

Para este enfoque se tomó como base la distribución de conductividades hidráulicas del enfoque anterior, incluyendo la zona de ajuste al sureste del tajo. De este modo, los valores de conductividad hidráulica del dominio de matriz fracturada quedaron fijos, y los valores del dominio de fallamiento regional estuvieron sujetos a calibración. En general, en la calibración los valores de K_h disminuyeron levemente, mientras los de K_v fueron reducidos diez veces su valor debido a que se observó una leve mejoría en la calibración en el área del tajo reducirlos. La Tabla 4.9 muestra los valores iniciales para cada zona de falla modelada y los valores calibrados.

Tabla 4.9 Zonas de falla modeladas asociadas a cada pozo perteneciente al dominio de fallamiento regional. Se incluye el valor de conductividad hidráulica inicial y el valor final después de la calibración.

Zona de falla		Pozos afectados	K_h inicial (m/s)	K_h calibrada (m/s)	K_v inicial (m/s)	K_v calibrada (m/s)
Rumbo	Echado					
NW 42°	75° NE	DW39 y DW42	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	9.0×10^{-5}	9.0×10^{-6}
NW 39°	80° NE	DW20	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}	4.0×10^{-6}
NW 45°	84° NE	DW1	1.3×10^{-5}	3.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-6}
NW 82°	81° NE	DW17	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-5}
NW 15°	77° NE	DW30	7.0×10^{-5}	7.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}	6.0×10^{-6}
NE 6°	74° NW	-	5.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}
NE 32°	84° NW	DW41	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-6}

Con respecto a los parámetros de almacenamiento, se mantuvo la misma distribución de zonas utilizada en los dos enfoques anteriores. Se tuvo poca variación con respecto al enfoque anterior, afectando el almacenamiento específico en las rocas cristalinas de 3.5×10^{-6} a 1.0×10^{-6} 1/m y su rendimiento específico de 4 a 3%. En la zona de bajo RQD se disminuyó su almacenamiento específico de 2.5×10^{-5} a 1.0×10^{-5} 1/m, pero se aumentó su rendimiento específico de 5 a 6%. En las lutitas sanas se redujo su valor de almacenamiento específico de 3.0×10^{-6} a 2.0×10^{-6} 1/m, mientras que en la roca intemperizada en el área del tajo se cambió de 2.5×10^{-5} a 1.0×10^{-5} . Por último, se redujo el rendimiento específico de la zona de transición aluvión-roca de 5 a 4% (Tabla 4.10).

Tabla 4.10 Valores de parámetros de almacenamiento calibrados en el modelo en cada unidad hidrogeológica y valores obtenidos de bibliografía para el enfoque de modelación 3.

Unidad hidrogeológica	Parámetros de almacenamiento			
	Calibración		Shingal y Gupta (1999)	
	Rendimiento específico (%)	Almacenamiento específico (1/m)	Rendimiento específico (%)	Almacenamiento específico (1/m)
Aluvión	6	1.0×10^{-4}	5 - 20	1.0×10^{-4} a 1.0×10^{-2}
Zona de transición aluvión – roca	4	1.0×10^{-4}	-	-
Roca intemperizada en el área del tajo	6	1.0×10^{-5}	2 - 5	1.0×10^{-5} a 1.0×10^{-4}
Lutitas sin alteración	1	2.0×10^{-6}	0.5 - 5	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Zona de transición entre lutitas sanas y lutitas alteradas	3	1.0×10^{-6}	0 - 3	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Lutitas alteradas	3	1.0×10^{-6}	0 - 3	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Calizas	2	2.0×10^{-6}	0.5 – 10, 1 ¹	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}
Zona de bajo RQD	6	1.0×10^{-5}	2 - 5	1.0×10^{-5} a 1.0×10^{-4}
Intrusivo – Brecha	3	1.0×10^{-6}	0 - 3	1.0×10^{-7} a 1.0×10^{-5}

¹ Slade et al (1985)

4.4 Resultados

4.4.1 Sensibilidad de la recarga

Se modelaron ocho diferentes condiciones de recarga para el área de estudio, variando este valor de cero hasta 44 mm anuales, aplicados en el modelo correspondiente con el Medio Poroso Equivalente Parametrizado. Los resultados se muestran en la tabla 4.11, donde se observa que el *RMS* Normalizado (Valor Cuadrático Medio, *Root Mean Square* por sus siglas en inglés) es menor cuando la recarga es nula. También se observa que la distribución espacial y cantidad de recarga no tiene un efecto notable en la calibración, pues sólo el segundo periodo de estrés muestra variaciones. Esto muestra la influencia poco significativa de la recarga en los modelos, de modo que la mayoría del agua del desagüe debe originarse del almacenamiento del acuífero principalmente. Dado que no se considera apropiado utilizar la recarga mínima, se utilizó el segundo arreglo con mejor correlación, consistente en una lámina de recarga de 19 mm anuales recibida mayormente en la zona aluvial del valle.

Tabla 4.11 Sensibilidad del acuífero a la recarga, tomando como base el enfoque de modelación 2 (Medio Poroso Equivalente Parametrizado). Los resultados corresponden al valor del *RMS* Normalizado (%).

Periodo	0 mm		19 mm		31.5 mm		44 mm	
	Una zona	Una zona	P: 5 mm V: 31 mm	Una zona	P: 7 mm V: 57 mm	Una zona	P: 10 mm V: 74 mm	P: 60 mm V: 30 mm
2007	5.3	5.7	5.9	6.2	7.3	7.0	8.6	6.6
2010	16.4	22.0	21.7	24.6	23.6	28.0	24.7	31.4
2013	14.6	14.9	14.6	15.3	14.7	15.9	14.7	16.4
Promedio	12.1	14.2	14.1	15.4	15.2	17.0	16.0	18.1

P: Piedemonte, V: Valle

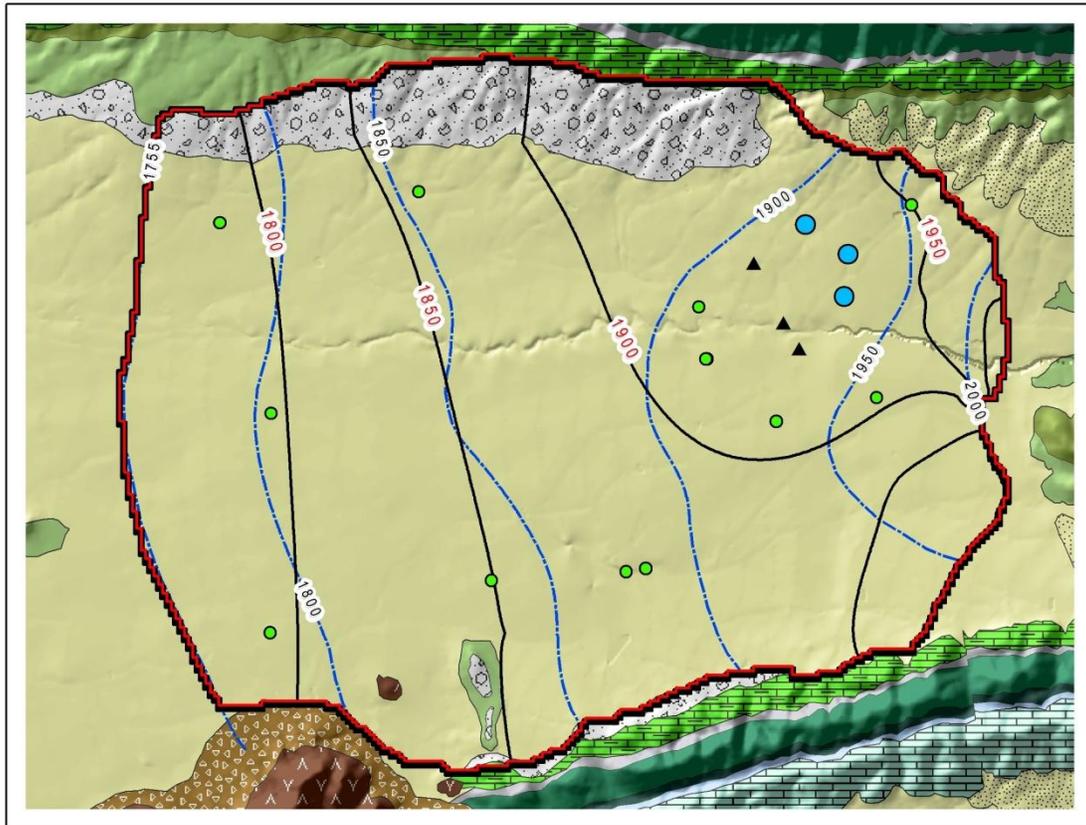
4.4.2 Enfoque 1: Medio Poroso Equivalente

Primer periodo de estrés (2004 - 2007)

La Figura 4.13 muestra las curvas de isovalores de elevación del nivel estático del modelo en estado estacionario para diciembre de 2007, así como las curvas elaboradas con los datos observados. En general se observa buena congruencia entre las curvas modeladas y las equipotenciales trazadas con base en las mediciones de diciembre de 2007. Sin embargo, en la porción sureste del área existe una deficiencia de información piezométrica para este periodo, pues las curvas de piezometría fueron extrapoladas y no coinciden con las simuladas. Además, la correlación de valores observados y simuladas es consistente, presentando un valor de *RMS* de 15.7 m (Figura 4.14a). Como se puede observar, la calibración es muy buena pues el valor del *RMS* Normalizado es de 7.7%. El *RMS* escalado o normalizado es menor al 10%, que es usualmente aceptado como una calibración razonable. El error NRMS se calcula como se indica a continuación:

$$\text{RMS Escalado (Normalizado)} = \frac{\text{RMS}}{\text{Cambio máximo de carga a través del dominio del modelo}}$$

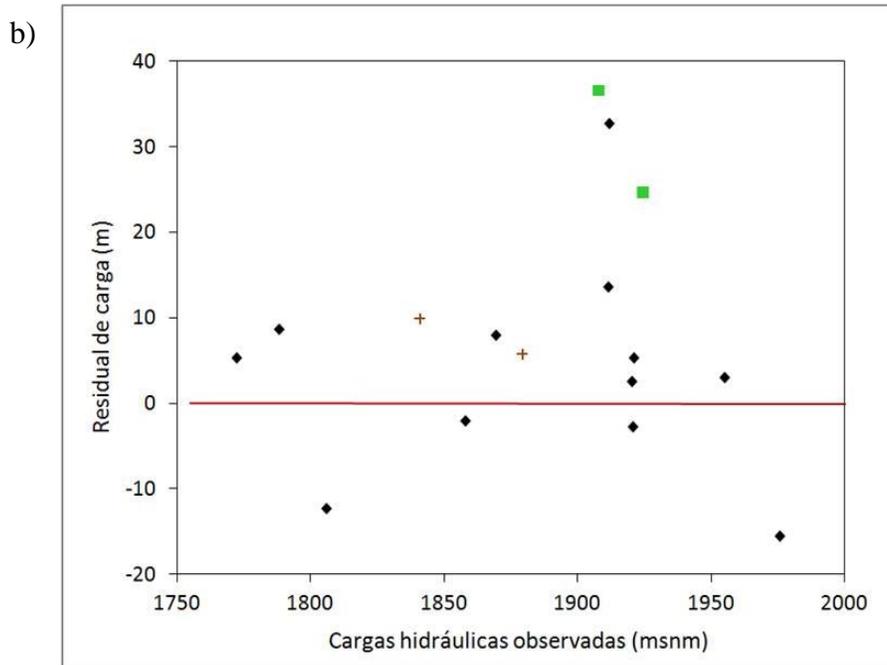
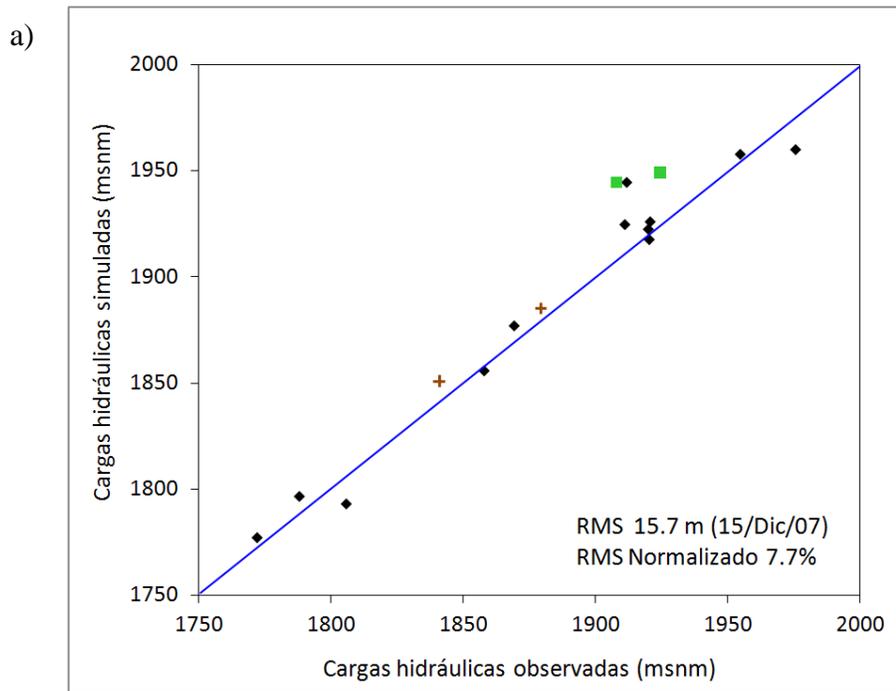
Los residuales varían entre 36.6 y -15.5 m, predominando los valores positivos (Figura 4.14b). La mayor diferencia se encuentra en el piezómetro RC-23, ubicado en la parte este del tajo.



LEYENDA

Cuaternario Coluviación Terciario - Neógeno Conglomerado Basalto Brecha Terciario - Paleógeno Conglomerado	Cretácico Lutita-Arenisca Lutita-Caliza Caliza-Lutita Caliza Caliza-Lutita Jurásico Limolita-Caliza Caliza	Nivel estático observado (Diciembre 2007) Nivel estático simulado Límite de celdas activas Pozo de desagüe	Residuales (m) < - 100 - 100 a - 20 - 20 a 20 20 a 100 > 100	 ESCALA 0 1 2 Km
--	--	---	--	--------------------------------------

Figura 4.13 Resultados de la simulación para el primer periodo de estrés (2004-2007) en el enfoque 1. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona.



- + Aluvial
- ◆ Lutita sana
- Lutita alterada
- ▲ Caliza
- Zona con bajo RQD

Figura 4.14 Resultados de la calibración del enfoque 1 para el primer periodo de estrés (2004 – 2007). **a** relación entre valores de cargas simuladas y observadas; **b** relación entre los residuales y cargas observadas.

Segundo periodo de estrés (2007 - 2010)

Los resultados del modelo para diciembre de 2010 muestran variaciones importantes entre curvas reales y simuladas en el área del tajo (Figura 4.15). No obstante la forma de las equipotenciales es similar, se presentan piezómetros con grandes diferencias de carga al noroeste y sureste del tajo. Estos provocan que el *RMS* aumente a 39.6 m (Figura 4.16a) y que los residuales varíen de 84.9 a -36.7 m (Figura 4.16b). A su vez, el valor de *RMS* Normalizado se eleva hasta 22%. Esta falta de calibración es provocada por los piezómetros PH-3, PH-4 y RC-40. La figura muestra 4.15a muestra que la falta de correlación no está asociada con algún atributo geológico como litología, alteración o RQD pues los tres pozos con los residuales más altos corresponden con lutitas sanas, lutitas alteradas y la zona de bajo RQD.

Tercer periodo de estrés (2010 - 2013)

La configuración del nivel estático real y simulada son similares para marzo de 2013 (Figura 4.17). No obstante, quedan residuales altos al norte y noroeste del tajo, así como al este y sureste. Estos residuales elevan el *RMS* a 44.2 m (Figura 4.18a), y varían de -94.1 a 74.6 m (Figura 4.18b). Sin embargo, el valor de *RMS* Normalizado es de 11%, ligeramente por encima del mínimo aceptable (10%). Es necesario indicar que la zona de alteración se extendió un poco al noroeste y sureste del tajo pues al parecer en esas zonas el modelo de alteración muestra zonas de roca poco alterada, pero la hidrodinámica no responde de forma consistente con el modelo sólido de alteración, es decir, se muestran zonas en las que los modelos sólidos generados tienden a homogeneizar por falta de información. En este sentido, existen zonas en el modelo matemático que no son consistentes con el modelo conceptual, lo cual se observa claramente en áreas con pozos con una diferencia notable en su carga hidráulica que fueron clasificados dentro de la misma unidad hidrogeológica.

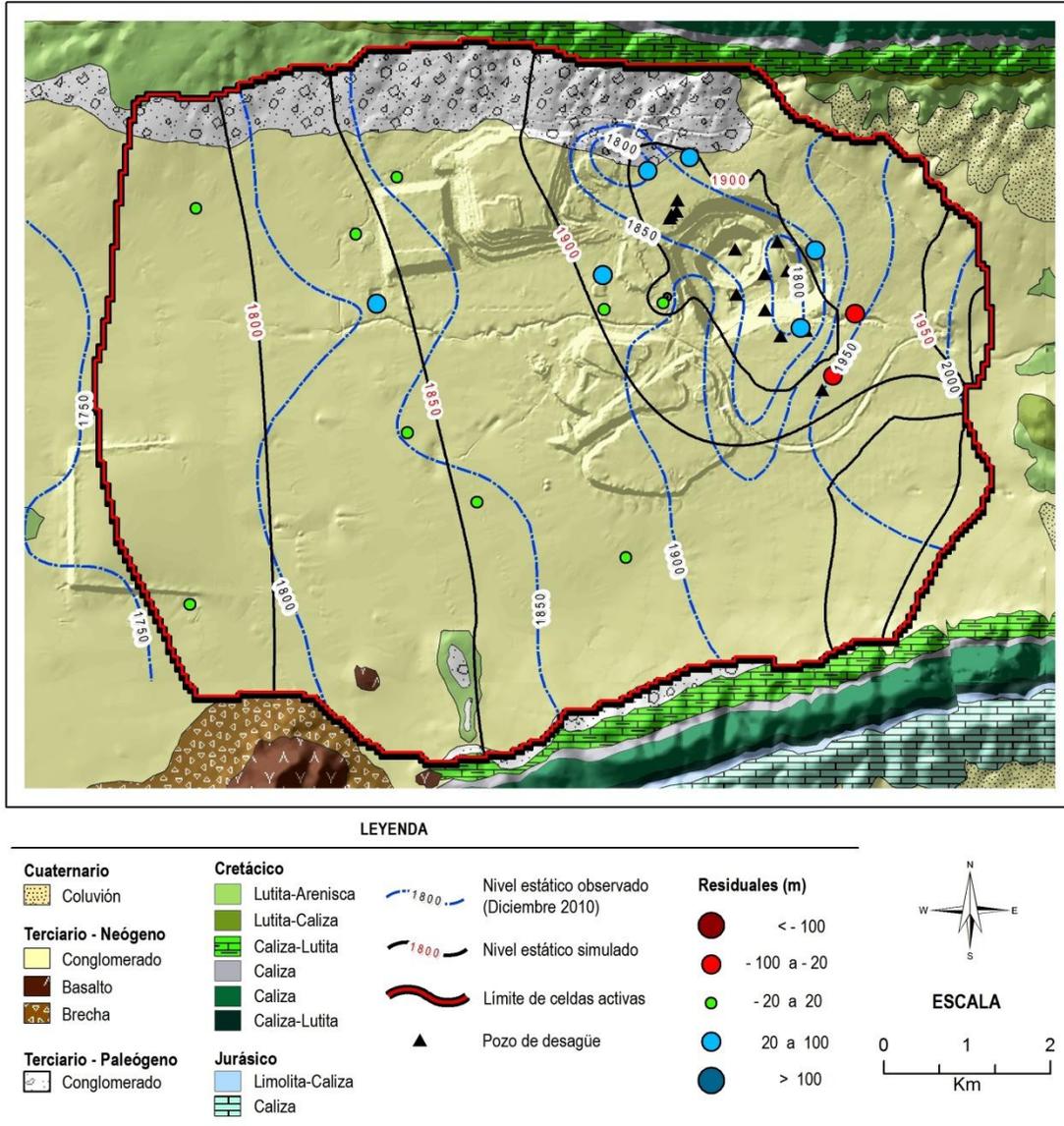
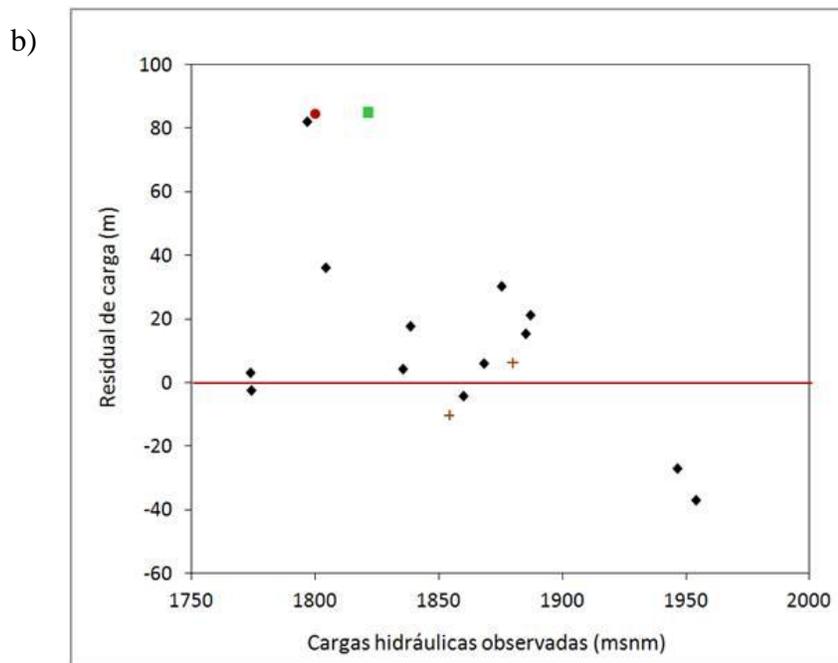
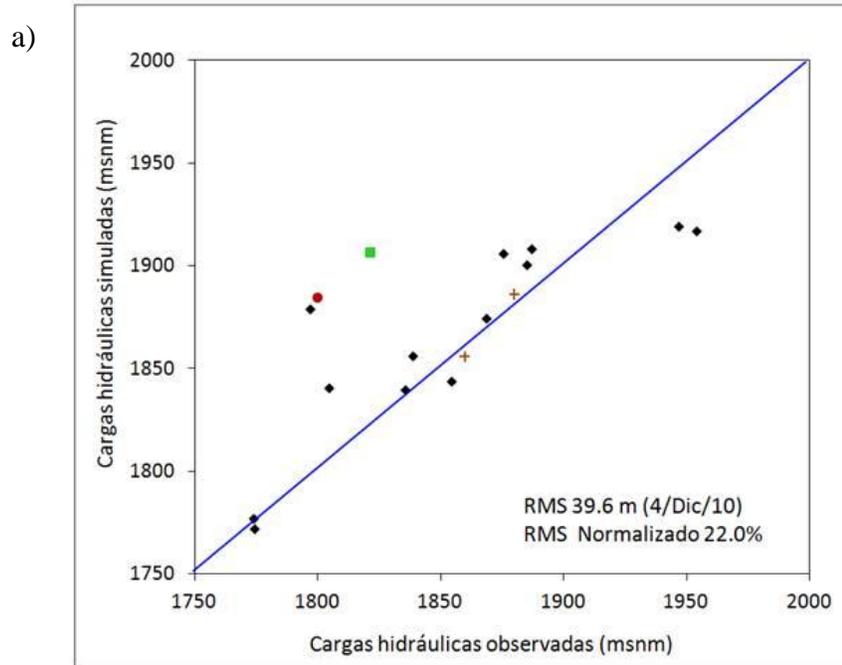
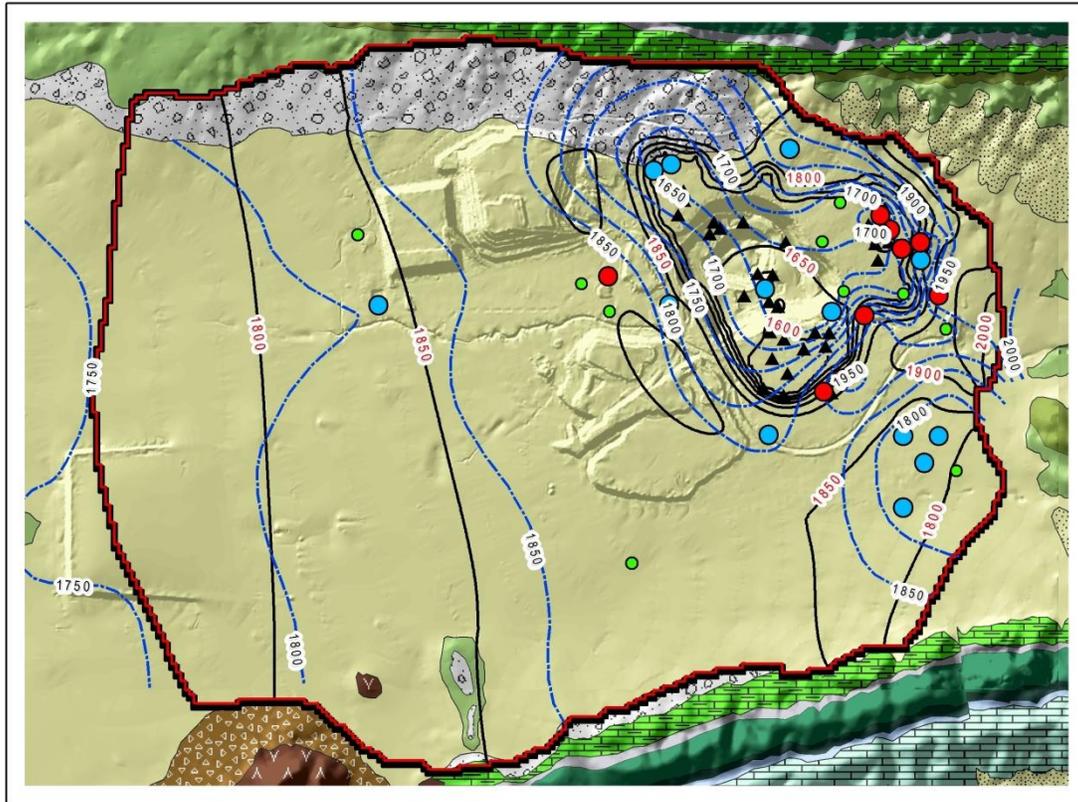


Figura 4.15 Resultados de la simulación para el segundo periodo de estrés (2007-2010) en el enfoque 1. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona. Durante este periodo el modelo falla en reproducir la curva 1800 msnm dentro del tajo.



+ Aluvial ◆ Lutita sana ■ Lutita alterada
▲ Caliza ● Zona con bajo RQD

Figura 4.16 Resultados de la calibración del enfoque 1 para el segundo periodo de estrés (2007 – 2010). **a** relación entre valores de cargas simuladas y observadas; **b** relación entre los residuales y cargas observadas.



LEYENDA

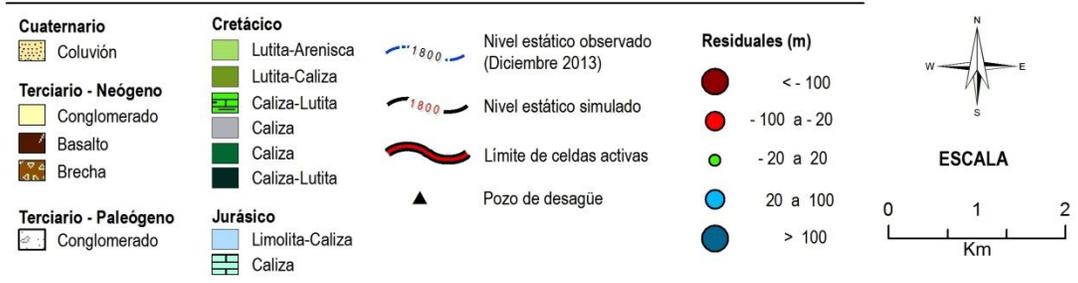


Figura 4.17 Resultados de la simulación para el tercer periodo de estrés (2010-2013) en el enfoque 1. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. En general se observa una buena correspondencia entre curvas observadas y simuladas, aunque el modelo no alcanza a reproducir apropiadamente las curvas al noroeste del tajo.

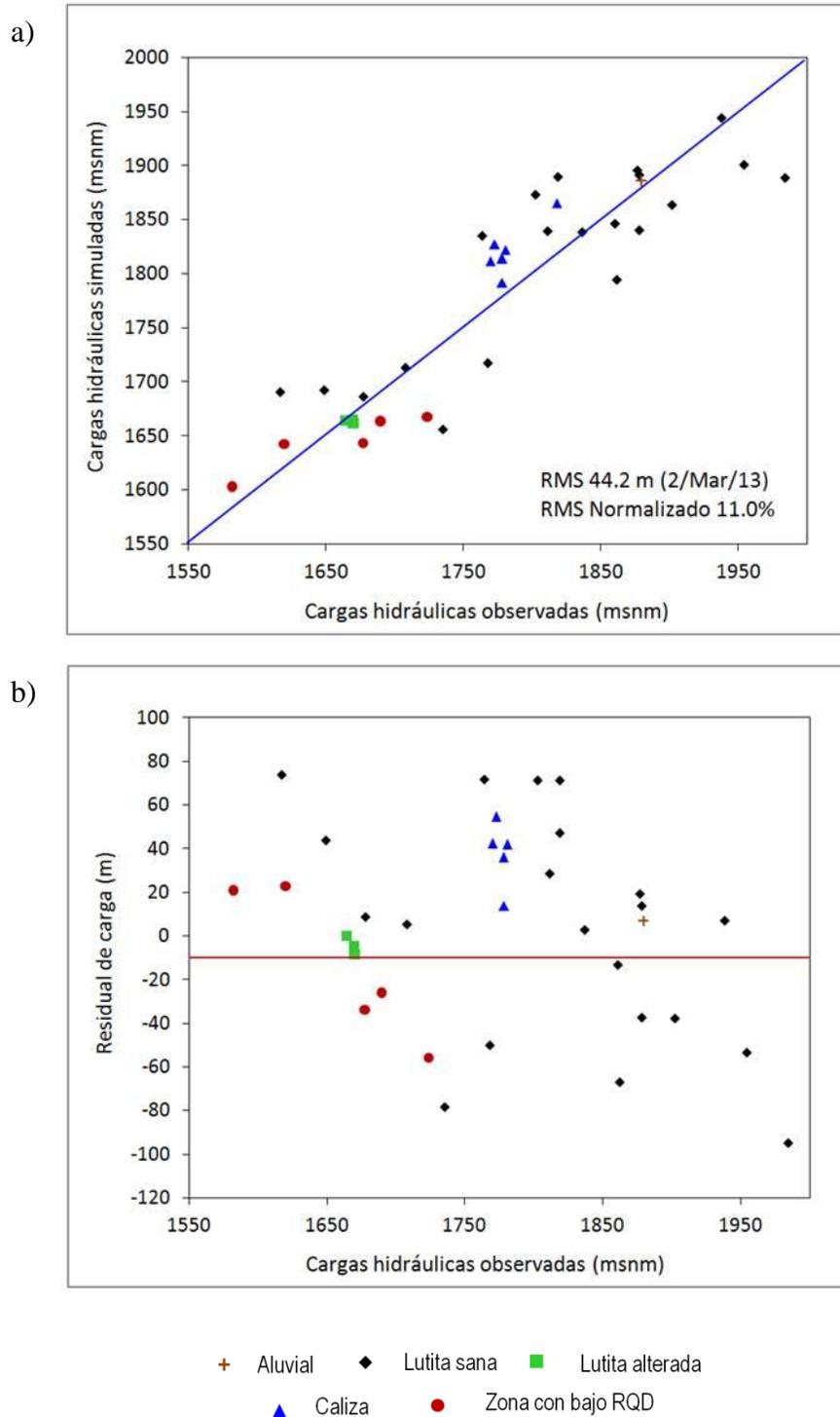


Figura 4.18 Resultados de la calibración del enfoque 1 para el tercer periodo de estrés (2010 – 2013). **a** relación entre valores de cargas simuladas y observadas; **b** relación entre los residuales y cargas observadas.

Evolución del nivel de agua en el tajo

Con respecto al nivel de agua en el tajo, se observa que el bombeo del 2004 al 2010 tuvo un efecto poco significativo (Figura 4.19a y b), mientras el último periodo de estrés ha generado la mayoría del abatimiento actual (Figura 4.19c y d). Con respecto al piezómetro TP-1760, que se encuentra muy cercano al centro del tajo, la modelación arroja un residual de 21.0 m, de modo que el modelo reproduce una carga hidráulica ligeramente mayor a la real. La forma del abatimiento muestra el gran contraste en las conductividades hidráulicas, generando un gradiente hidráulico muy pronunciado entre las lutitas sanas y las alteradas y fracturadas.

Modelo predictivo

La Figura 4.20 muestra la evolución de las equipotenciales simuladas para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2022, sin añadir pozos adicionales a los existentes. Como es de esperarse, se observa poca variación en las equipotenciales cercanas a las celdas de carga constante. Asimismo, se observa que al centro del tajo el nivel de agua se mantiene estable desde el 2014, pues en los años siguientes la curva 1500 msnm no se expande. Por lo tanto, este modelo indica que será necesario incrementar el bombeo para hacer descender el nivel de agua por lo menos a la elevación 1265 msnm para permitir el minado.

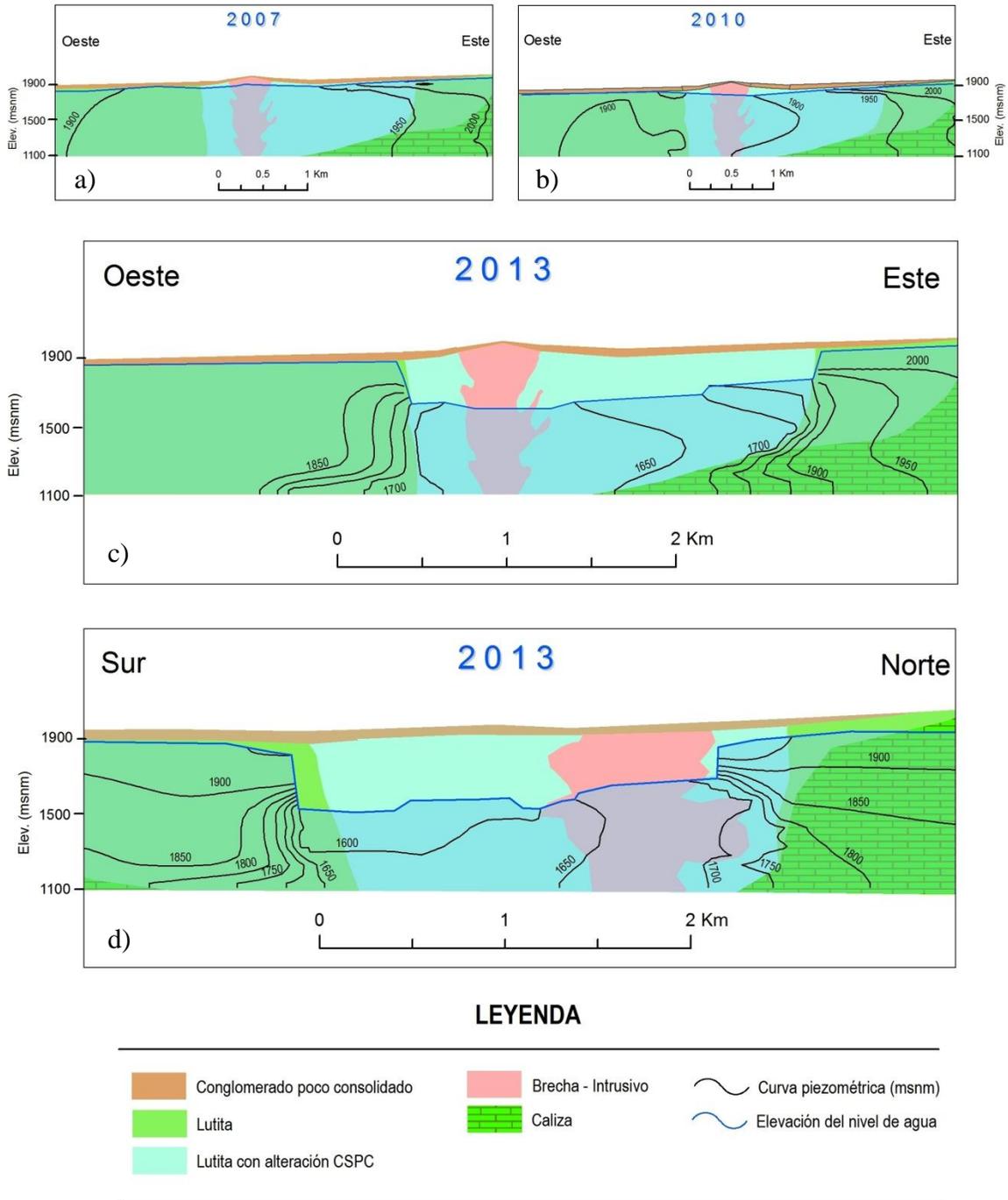


Figura 4.19 Evolución del nivel estático en el área del tajo, enfoque 1. **a** diciembre de 2007; **b** diciembre de 2010; **c** marzo de 2013 en sección Oeste – Este; **d** marzo de 2013 en sección Sur – Norte. El nivel observado en el piezómetro TP-1760 en marzo de 2013 es de 1582.0 msnm y el nivel simulado es de 1627.8 msnm.

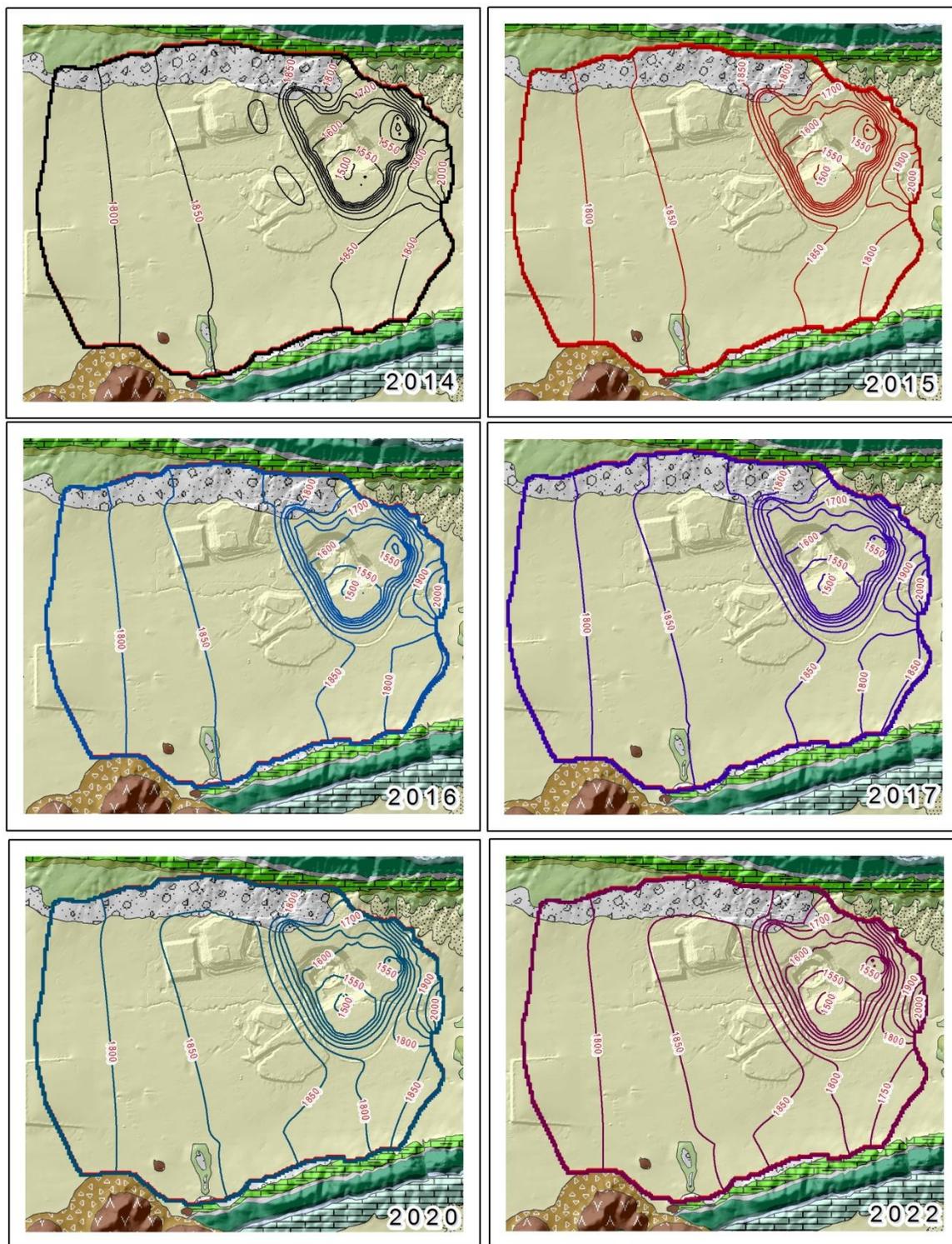


Figura 4.20 Evolución del nivel estático en el área del modelo para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2022, para el enfoque 1. Se observa que bajo las condiciones de bombeo modeladas el nivel en el área del tajo se estabiliza a desde el 2014. Sólo se observan abatimientos en la parte sureste del área del modelo por efecto de las celdas de carga constante colocadas en esa zona.

4.4.3 Enfoque 2: Medio poroso equivalente parametrizado

Primer periodo de estrés (2004 - 2007)

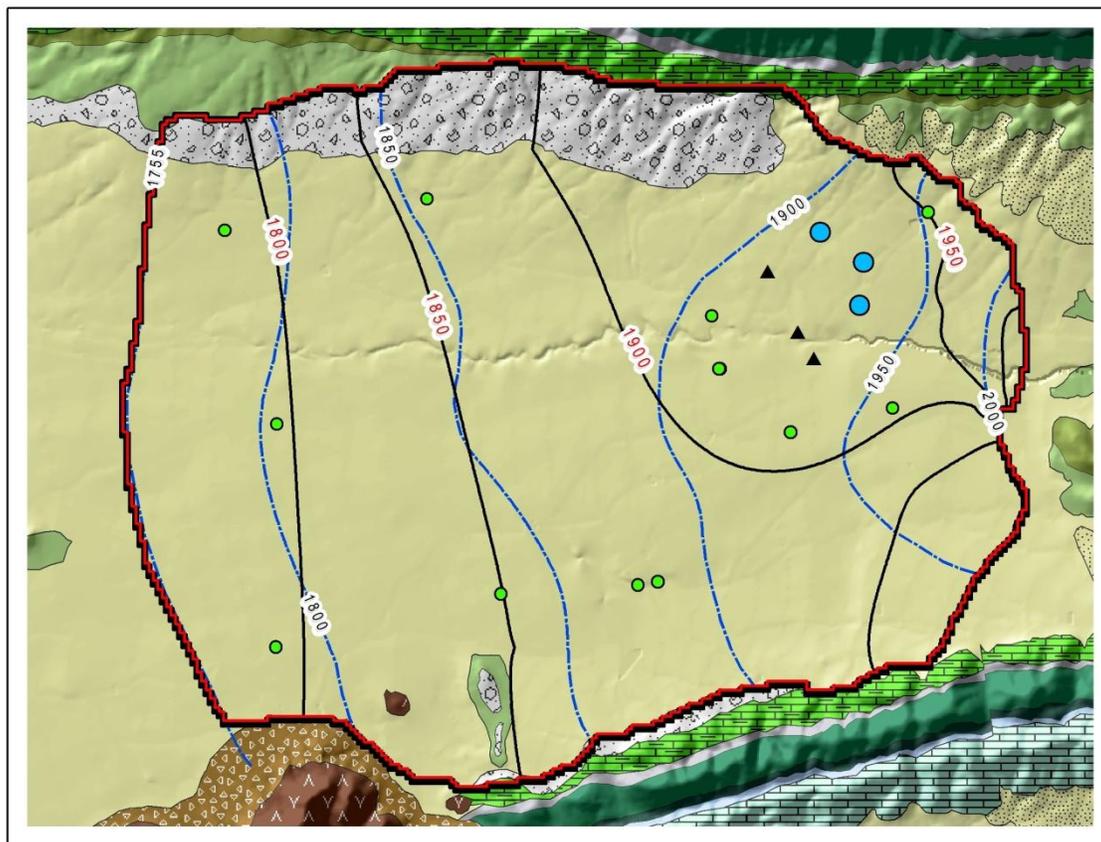
La Figura 4.21 muestra consistencia entre las curvas equipotenciales simuladas y las observadas para diciembre de 2007. Sin embargo se presenta el mismo inconveniente que en el enfoque 1, donde la falta de observación al sureste del área del modelo genera inconsistencias. No obstante, el *RMS* es de 12.1 m (Figura 4.22a) y el *RMS* Normalizado es bastante bueno, con 5.9%. Los residuales varían de -21.1 a 24 m (Figura 4.22b).

Segundo periodo de estrés (2007 – 2010)

En el segundo periodo de estrés (diciembre 2010) predomina el problema de los altos residuales al noroeste y sureste del área del tajo (Figura 4.23), de modo que este no es asociable con la distribución de la conductividad hidráulica. Los piezómetros ubicados en esas zonas provocan la falta de congruencia en las equipotenciales, con residuales que varían de -76.5 a 93.9 m (Figura 4.24b), con un *RMS* de 39.1 m (Figura 4.24a) y un *RMS* Normalizado de 21.7%. Los piezómetros con los mayores residuales son los mismos que los del enfoque anterior, PH-3, PH-4, y RC-40.

Tercer periodo de estrés (2010 - 2013)

Para el tercer periodo de estrés (marzo 2013) el modelo presenta una distribución de residuales similar al enfoque anterior, al noroeste y este del área del tajo, y suroeste del área del modelo (Figura 4.25). El *RMS* se incrementó a 58.3 m (Figura 4.26a), con un valor Normalizado de 14.6%. Los residuales que varían entre -54.4 y 196.9 m (Figura 4.26b), donde los mayores residuales se encuentran al noroeste del tajo, en los piezómetros PH-3 y PH-39. Cabe señalar que a diferencia del modelo anterior, en este caso la zona de alteración no se ajustó para incluir estos piezómetros y disminuir el error con el objetivo de mostrar el impacto de los modelos sólidos sobre el modelo matemático.



LEYENDA

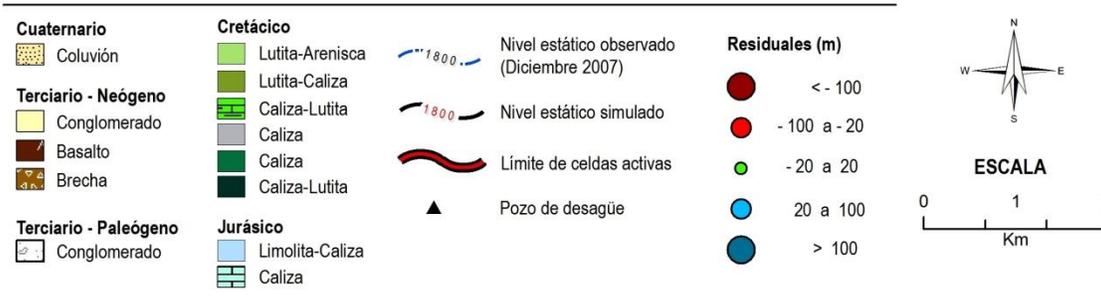
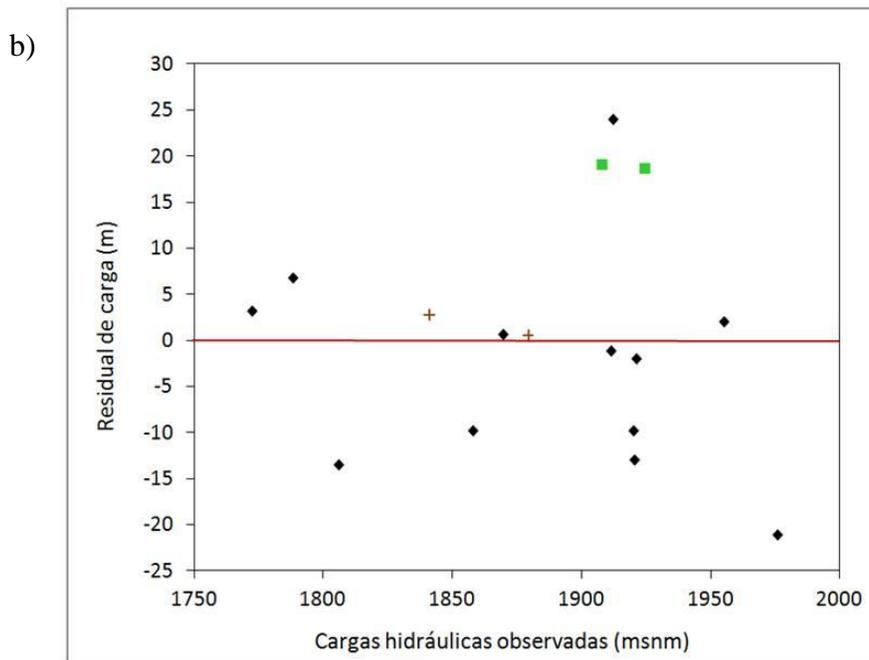
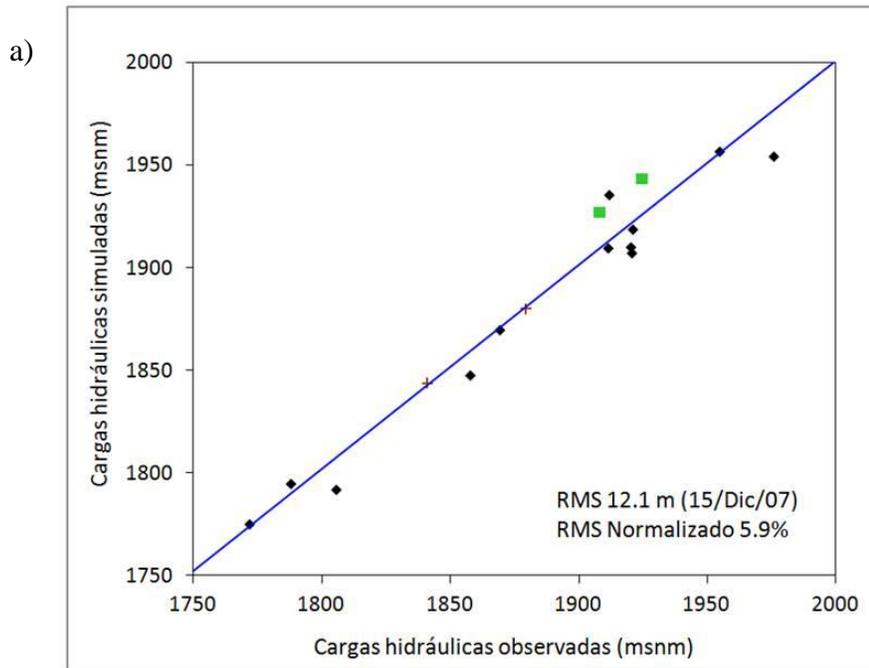
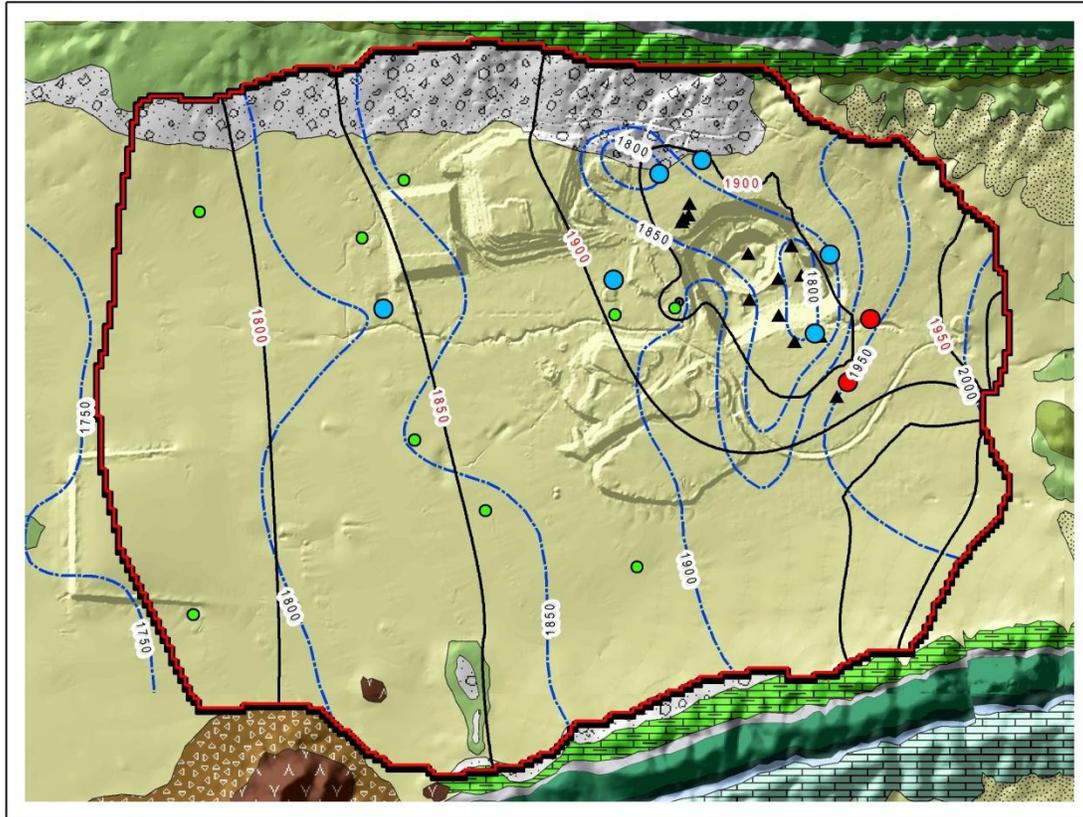


Figura 4.21 Resultados de la simulación para el primer periodo de estrés (2004-2007) en el enfoque 2. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona.



+ Aluvial ♦ Lutita sana ■ Lutita alterada
▲ Caliza ● Zona con bajo RQD

Figura 4.22 Resultados de la calibración del enfoque 2 para el primer periodo de estrés (2004 – 2007). **a** relación entre valores de cargas simuladas y observadas; **b** relación entre los residuales y cargas observadas.



LEYENDA

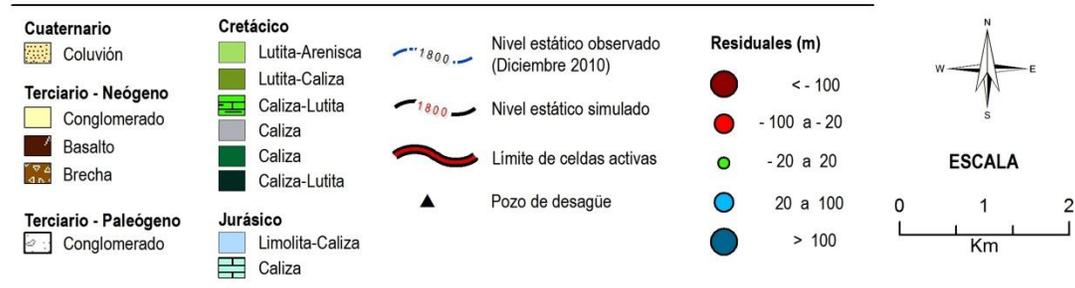


Figura 4.23 Resultados de la simulación para el segundo periodo de estrés (2007-2010) en el enfoque 2. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona. Asimismo, en este enfoque también falla la simulación de la curva 1850 msnm que denota el abatimiento en el tajo.

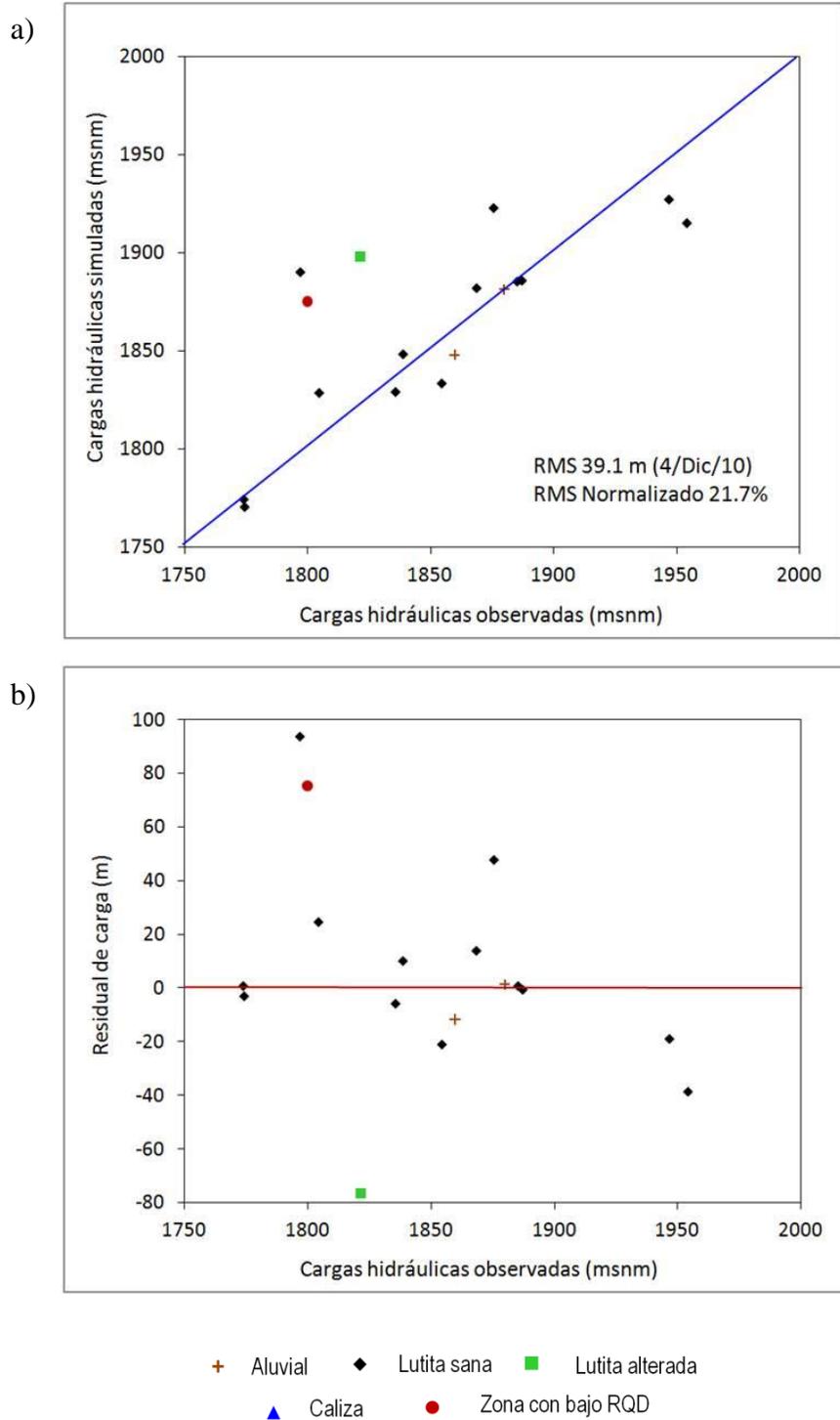
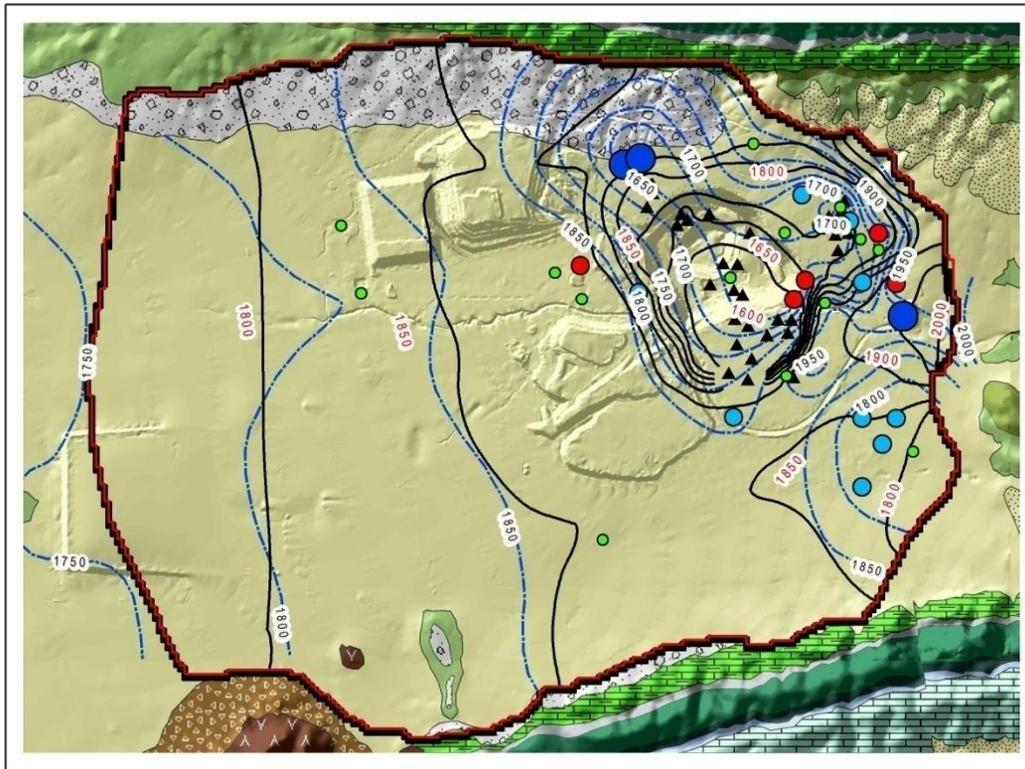


Figura 4.24 Resultados de la calibración del enfoque 2 para el segundo periodo de estrés (2007 – 2010). **a** relación entre valores de cargas simuladas y observadas; **b** relación entre los residuales y cargas observadas.



LEYENDA

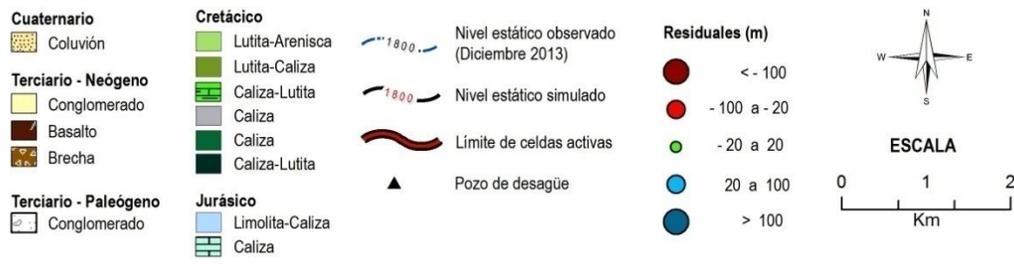


Figura 4.25 Resultados de la simulación para el tercer periodo de estrés (2010-2013) en el enfoque 2. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. En general se observa una buena correspondencia entre curvas observadas y simuladas, aunque al igual que en el enfoque 1, el modelo no alcanza a reproducir apropiadamente las curvas al noroeste del tajo.

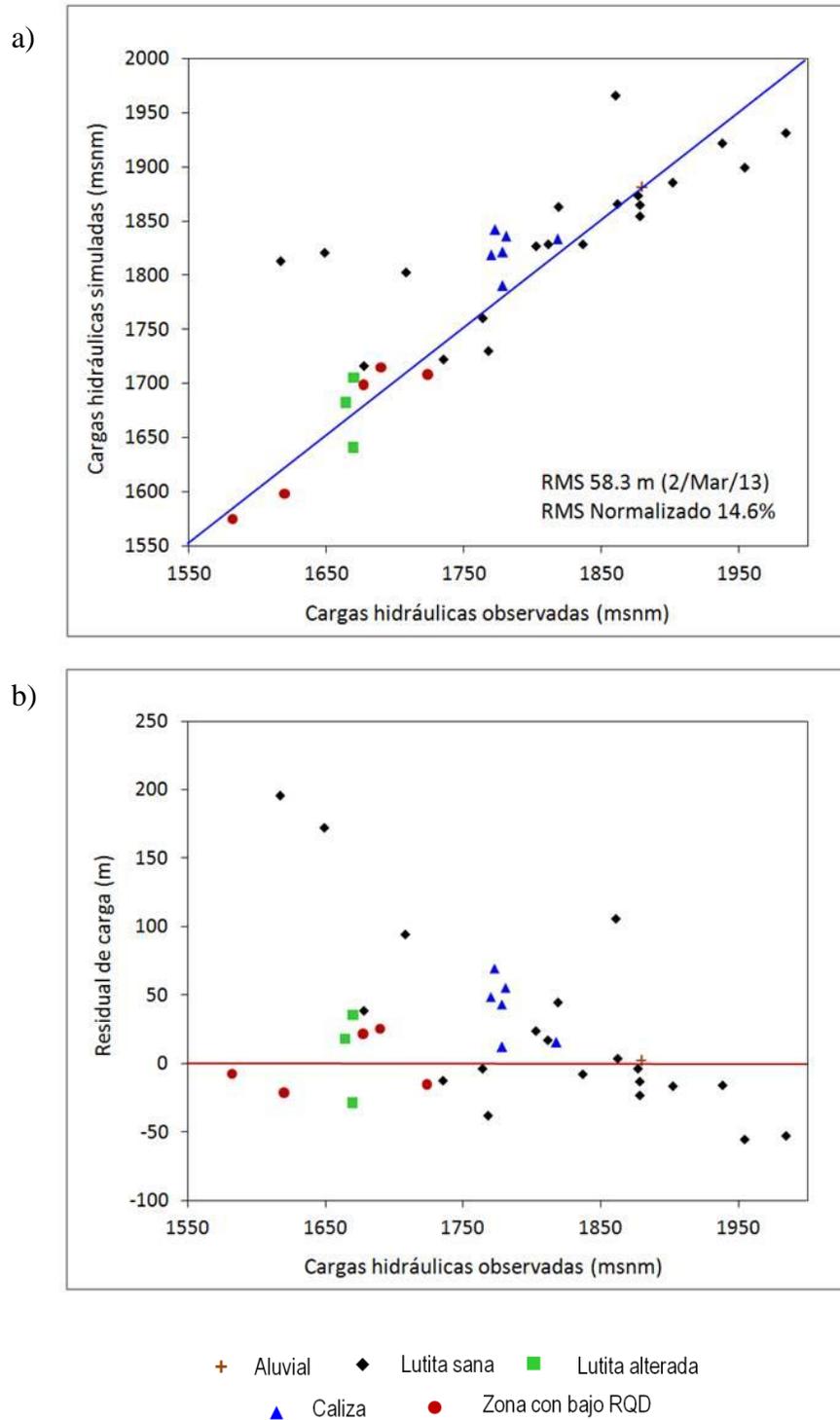


Figura 4.26 Resultados de la calibración del enfoque 2 para el tercer periodo de estrés (2010 – 2013). **a** relación entre valores de cargas simuladas y observadas; **b** relación entre los residuales y cargas observadas.

Evolución del nivel de agua en el tajo

Con respecto al nivel de agua en el tajo, al igual que en el enfoque anterior, en los primeros dos periodos de estrés no se observan impactos importantes derivados de los pozos de desagüe (Figura 4.27a y b). Hasta el tercer periodo se observan cambios notables, de modo que el piezómetro TP-1760 presenta una carga hidráulica simulada de 1574.6 msnm con respecto al valor observado de 1582.0 msnm, quedando 7.4 m por debajo del nivel real, lo que se considera una aproximación muy buena. Al igual que en el enfoque anterior, se presentan fuertes gradientes hidráulicos producto de los contrastes litológicos (Figura 4.27c y d).

Modelo predictivo

La Figura 4.28 muestra la evolución de la configuración de las isopiezas simuladas para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2022 en el enfoque 2. Se observa que al centro del tajo empieza a crearse la curva 1500 msnm y ésta crece en los años siguientes. No obstante, el ritmo de abatimiento es demasiado lento, pues el 2022 el tajo alcanzará la cota 1265 msnm. Esto implica que será necesario incrementar el bombeo para hacer descender el nivel de agua por lo menos a la elevación 1250 msnm para permitir el minado. Por otro lado, en general se observa poca variación en las equipotenciales cercanas a las celdas de carga constante.

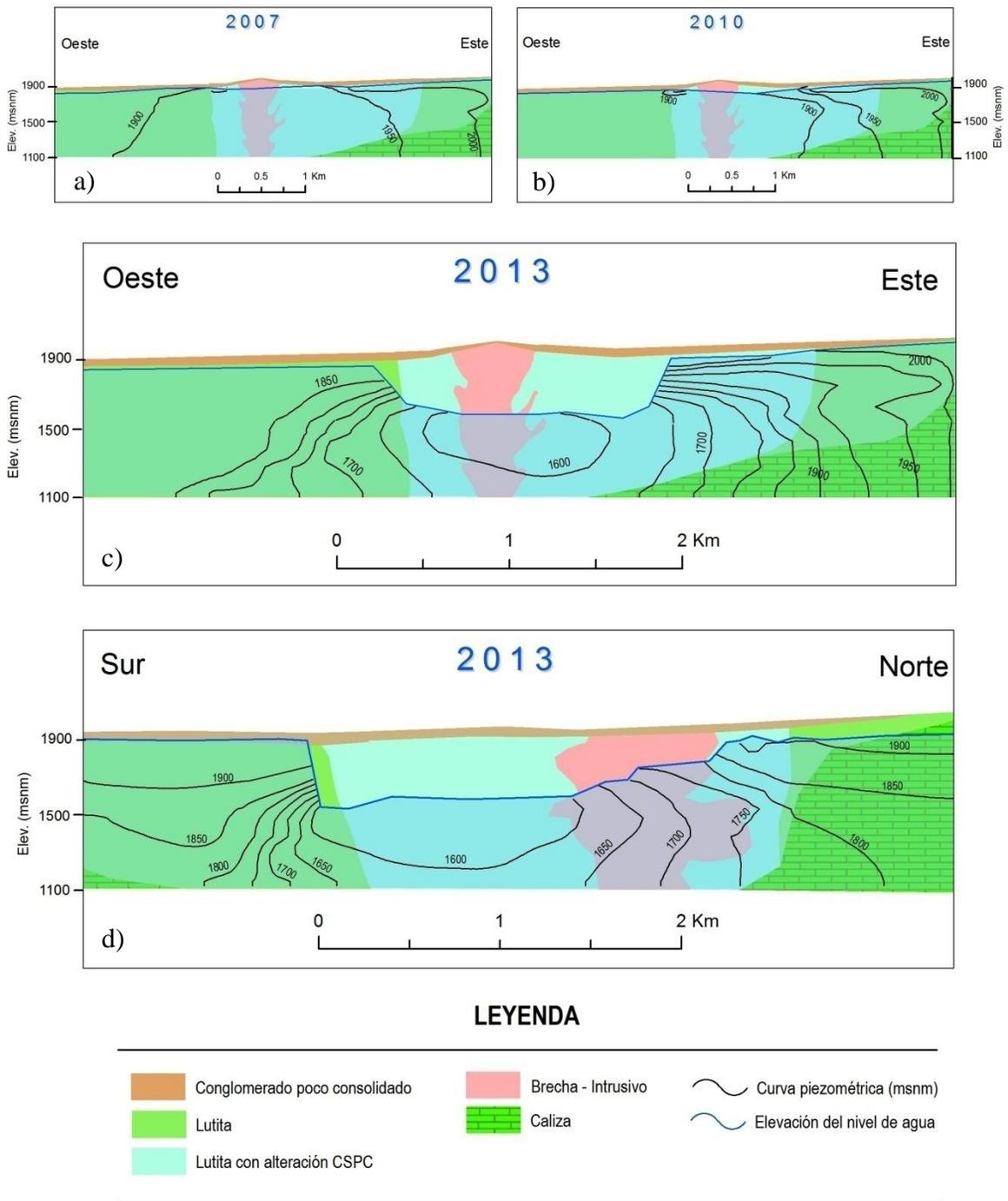


Figura 4.27 Evolución del nivel estático en el área del tajo, enfoque 2. **a** diciembre de 2007; **b** diciembre de 2010; **c** marzo de 2013 en sección Oeste – Este; **d** marzo de 2013 en sección Sur – Norte. El nivel observado en el piezómetro TP-1760 en marzo de 2013 es de 1582.0 msnm y el nivel simulado es de 1627.8 msnm.

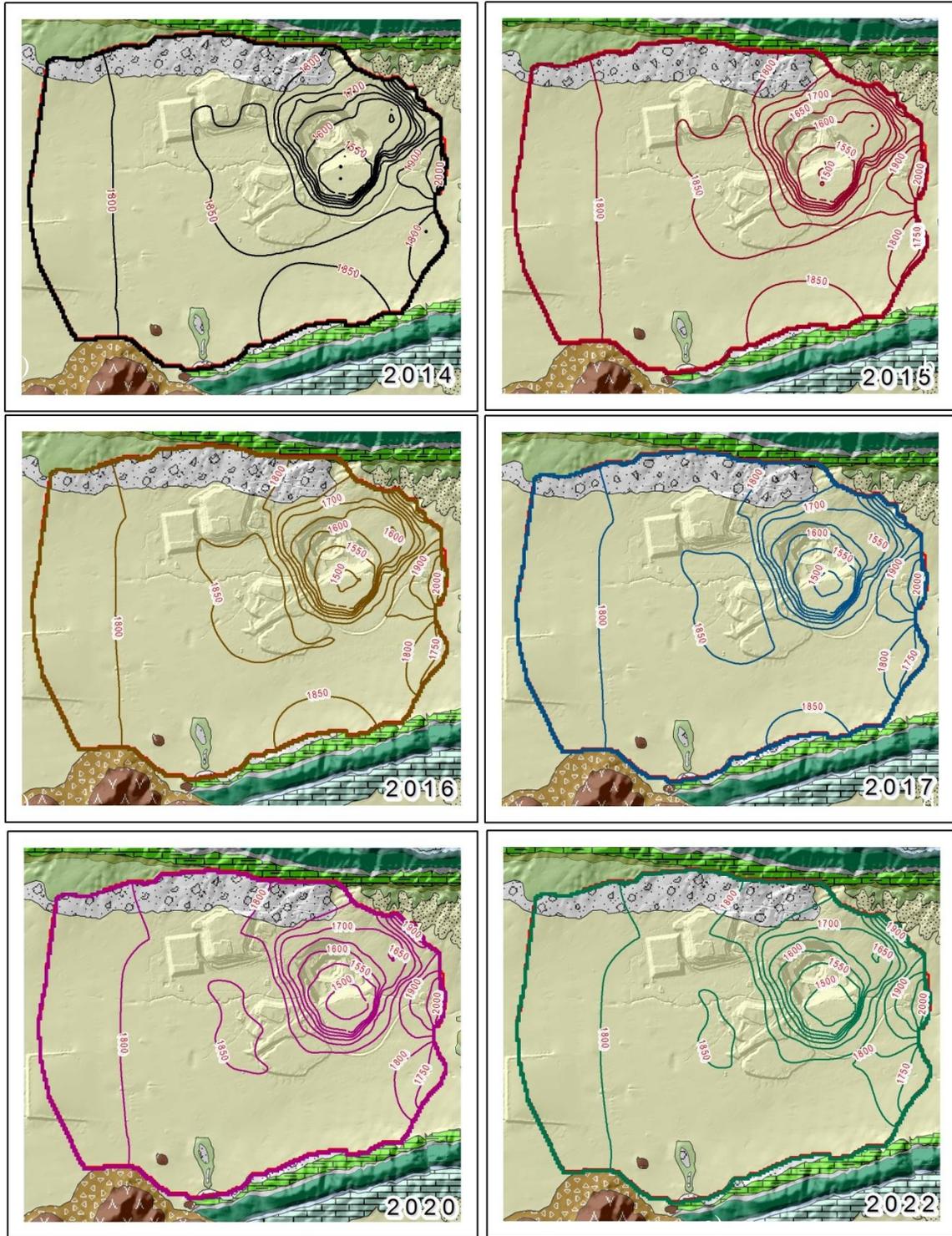


Figura 4.28 Evolución del nivel estático en el área del modelo para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2022, para el enfoque 2. Se observa que bajo las condiciones de bombeo actuales, el nivel tiende a estabilizarse desde el 2014. Aunque se presenta un abatimiento en el centro del tajo, este no es suficiente para soportar el plan de minado, pues para el 2022 el fondo del tajo se encontrará en la cota 1265 msnm.

4.4.4 Enfoque 3: Medio dual-continuo

Primer periodo de estrés (2004 - 2007)

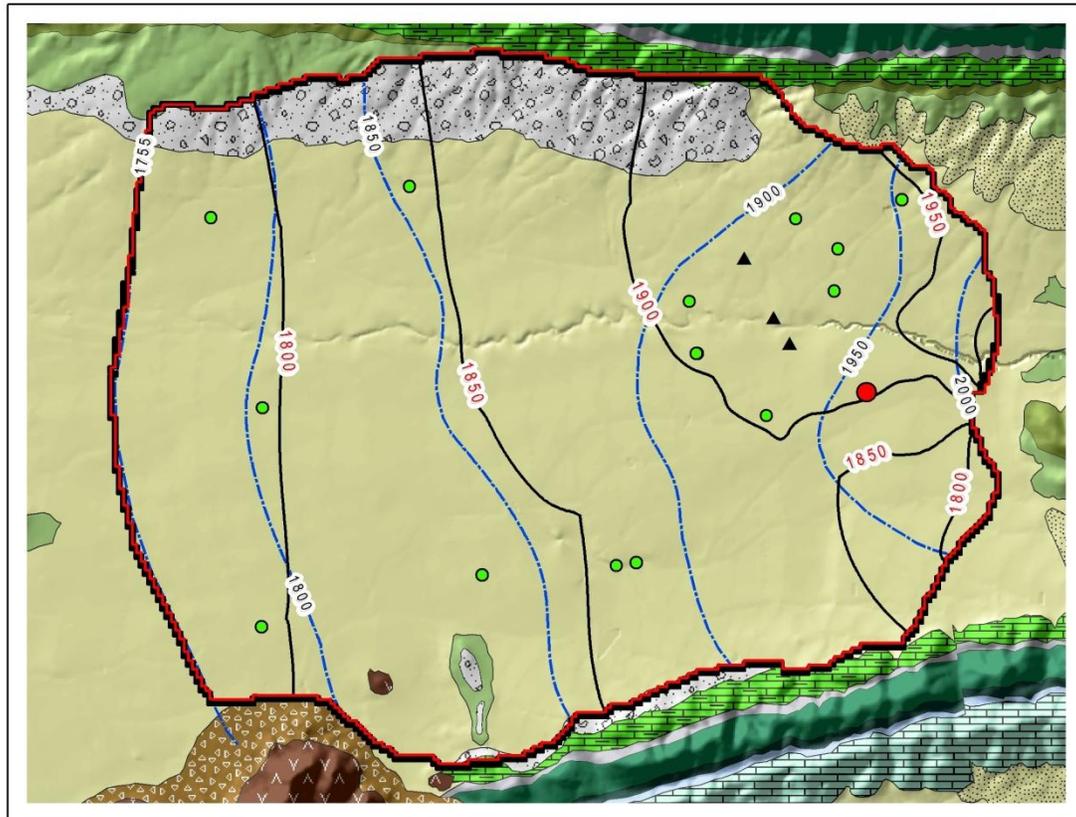
El primer periodo de modelación muestra resultados consistentes con los datos observados, presentando la incongruencia derivada de la falta de información en la zona sureste del área del modelo, tal como en los dos enfoques anteriores (Figura 4.29). El *RMS* para la simulación de diciembre 2007 es de 10.5 m (Figura 4.30a), con un valor Normalizado de 5.1%. Los residuales varían en un rango de -24.9 a 17.1 m (Figura 4.30b).

Segundo periodo de estrés (2007 - 2010)

En el segundo periodo de estrés, de nuevo se presentan las mismas inconsistencias en los piezómetros al noroeste y sureste del tajo, aunque en esta ocasión el residual disminuyó notablemente en el piezómetro GT-07 como producto de la adición de una zona de falla (Figura 4.31). El piezómetro PH-3 que se encuentra afectado por una falla disminuyó su residual a 75.8 m con respecto a los 93.9 m y 82.2 m obtenidos en los enfoques anteriores. Sin embargo, el residual aún es muy alto. Del mismo modo ocurrió en los piezómetros PH-4 y RC-40, los cuales disminuyeron su residual con respecto a los enfoques anteriores pero siguen presentando valores altos. El *RMS* resultante es de 19.2 m (Figura 4.32a), con un valor Normalizado de 19.2%, y con residuales que varían de -42.8 a 75.8 m (Figura 4.32b).

Tercer periodo de estrés (2010 - 2013)

En el tercer periodo de estrés se mejora notablemente la representación en los piezómetros al noroeste del tajo con respecto a los enfoques anteriores, y por ende, mejoró la correspondencia entre las curvas simuladas y las observadas. No obstante, al este cambiaron algunas condiciones de modo que en el presente enfoque se manifiestan cargas hidráulicas simuladas menores a las observadas (Figura 4.33). El *RMS* resultante es de 39.8m (Figura 4.34a) pero en este caso los residuales son menores en comparación con los dos enfoques anteriores, variando de -95.3 a 75.5 m (Figura 4.34b). Adicionalmente, es el único enfoque que satisfizo el requerimiento de presentar un *RMS* Normalizado <10%.



LEYENDA



Figura 4.29 Resultados de la simulación para el primer periodo de estrés (2004-2007) en el enfoque 3. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona.

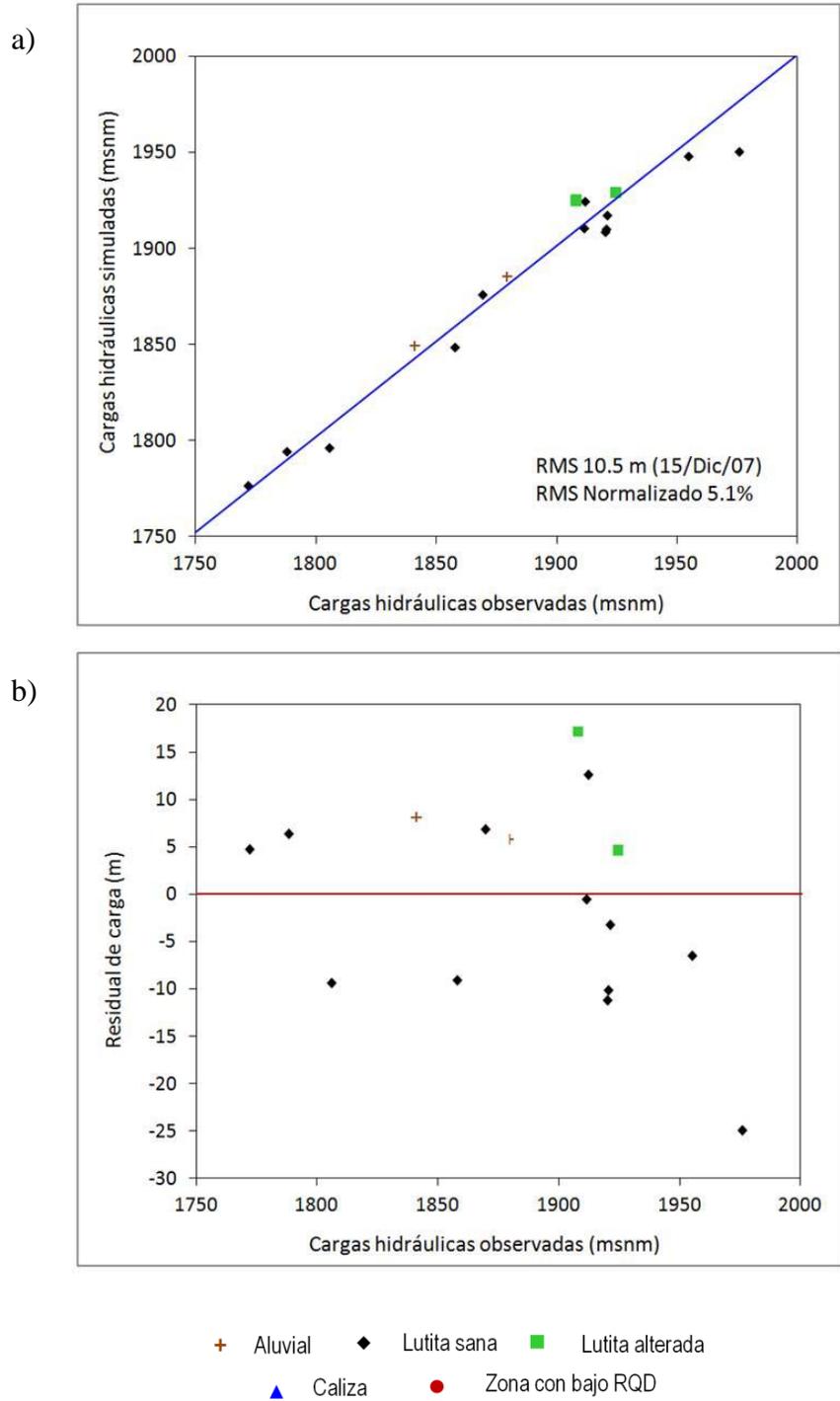
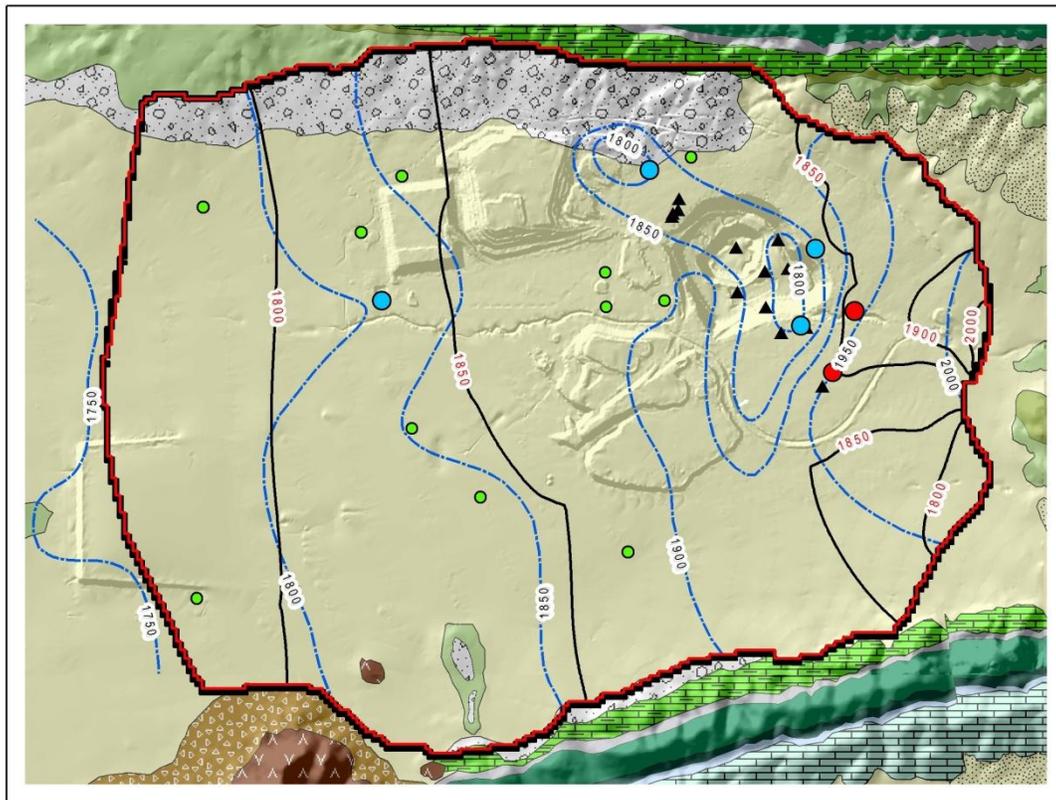


Figura 4.30 Resultados de la calibración del enfoque 3 para el primer periodo de estrés (2004 – 2007). **a** relación entre valores de cargas simuladas y observadas; **b** relación entre los residuales y cargas observadas.



LEYENDA

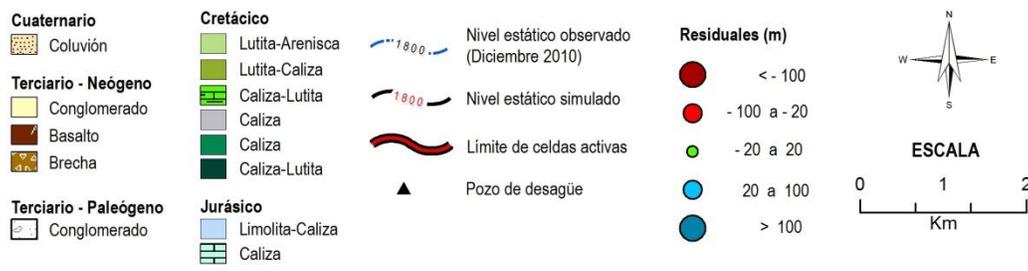


Figura 4.31 Resultados de la simulación para el segundo periodo de estrés (2007-2010) en el enfoque 3. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. La zona sureste del modelo difiere de las curvas modeladas probablemente debido a que las curvas observadas fueron inferidas por falta de información en esa zona. En este enfoque la simulación de la curva 1850 msnm empieza a generarse, a diferencia de los dos enfoques anteriores.

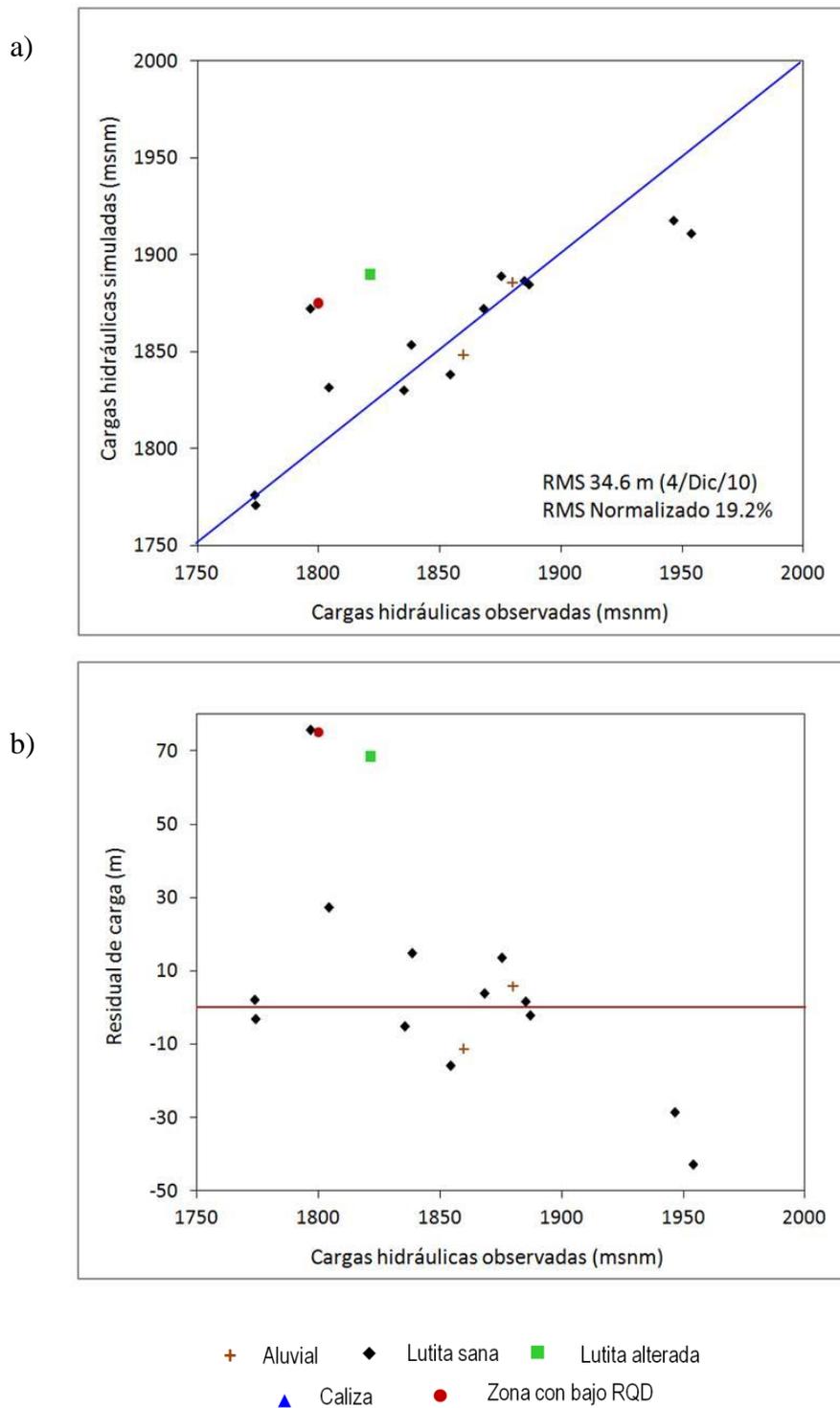
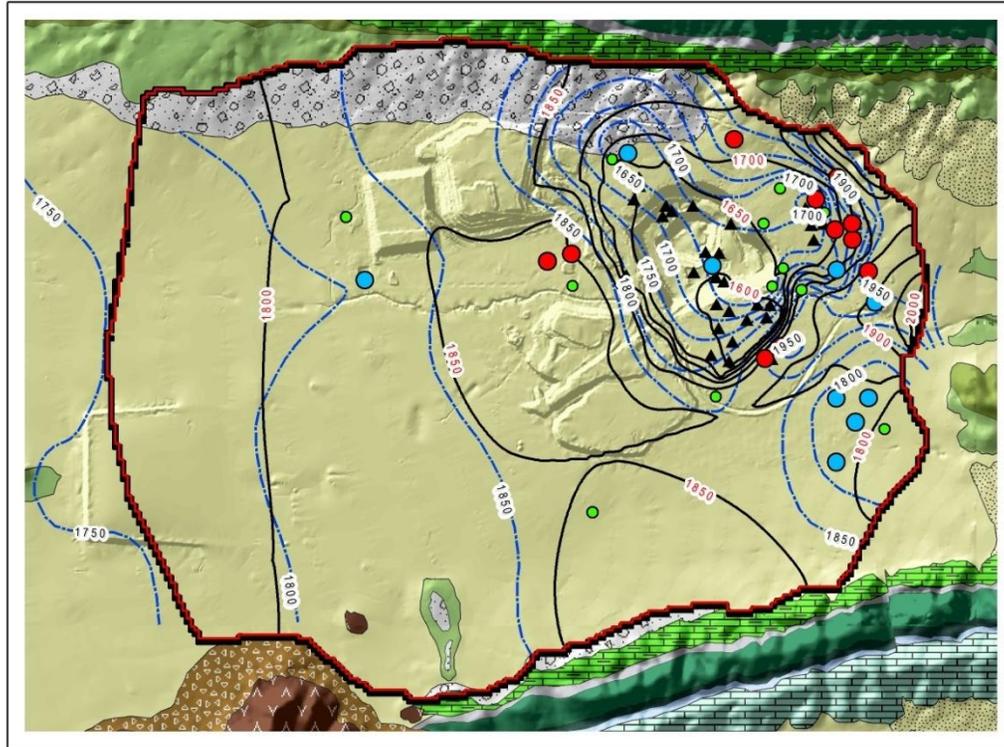


Figura 4.32 Resultados de la calibración del enfoque 3 para el segundo periodo de estrés (2007 – 2010). **a** relación entre valores de cargas simuladas y observadas; **b** relación entre los residuales y cargas observadas.



LEYENDA

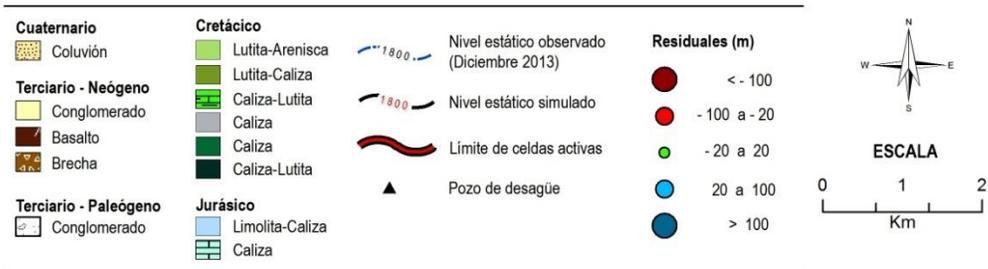


Figura 4.33 Resultados de la simulación para el tercer periodo de estrés (2010-2013) en el enfoque 3. Se muestra una comparación entre curvas equipotenciales simuladas y observadas. En general se observa una buena correspondencia entre curvas observadas y simuladas y en este caso sí se logró una mejor correspondencia entre curvas al noroeste del tajo, aunque el modelo falla en la zona sureste.

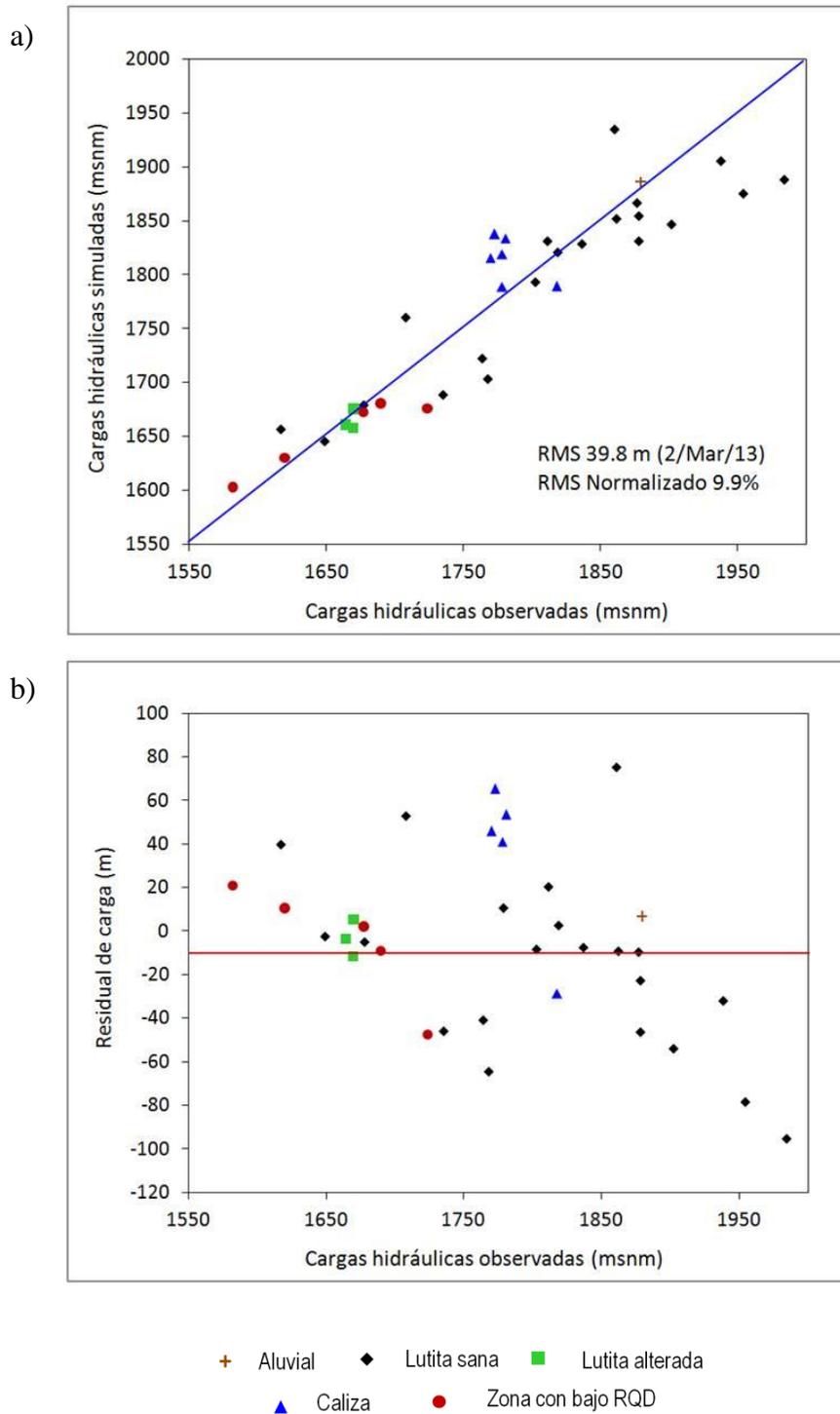


Figura 4.34 Resultados de la calibración del enfoque 3 para el tercer periodo de estrés (2010 – 2013). **a** relación entre valores de cargas simuladas y observadas; **b** relación entre los residuales y cargas observadas.

Evolución del nivel de agua en el tajo

Con relación al nivel de agua en el tajo, al igual que en los dos enfoques anteriores en los primeros dos periodos de estrés no se observan impactos importantes por el desagüe (Figura 4.35a y b). En el tercer periodo se observan los cambios, de modo que el piezómetro TP-1760 presenta una carga hidráulica simulada de 1602.9 msnm con respecto a un valor observado de 1582 msnm. Al igual que en los enfoques anteriores, se presentan fuertes gradientes hidráulicos producto de los contrastes.

Modelo predictivo

La Figura 4.36 muestra la evolución de las curvas de elevación del nivel piezométrico simuladas para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2022. Se observa que al centro del tajo el nivel de agua desciende más rápido con respecto a los dos enfoques anteriores, llegando hasta la isopieza 1450 msnm desde el 2017. Aparentemente, del 2020 al 2022 el nivel se estabiliza. Aunque en este enfoque el nivel bajó más que en los anteriores, aún será necesario incrementar el bombeo para hacer descender el nivel de agua por lo menos a la elevación 1250 msnm para permitir el minado.

4.4.5 Calibración con respecto al nivel de agua en el tajo

La calibración con respecto a la evolución hidrodinámica observada al centro del tajo para el periodo marzo 2013–enero 2014, muestra una buena representación del nivel de agua en los tres enfoques (Figura 4.37). Se observa que el Medio Poroso Equivalente presenta valores por encima del nivel real, con diferencias desde 3.1 hasta 18.1 m con respecto a los datos observados. A diferencia de los otros dos enfoques, este tiende a estabilizarse, lo cual se observó claramente en la Figura 4.20. El enfoque de Medio Poroso Equivalente Parametrizado se aproxima mejor a los datos reales, con diferencias que varían entre -8.7 m y 1.0 m. Asimismo, el tercer enfoque (Dual-Continuo) presenta mucha congruencia con los datos observados, con diferencias que van desde -6.6 m hasta 4.5 m.

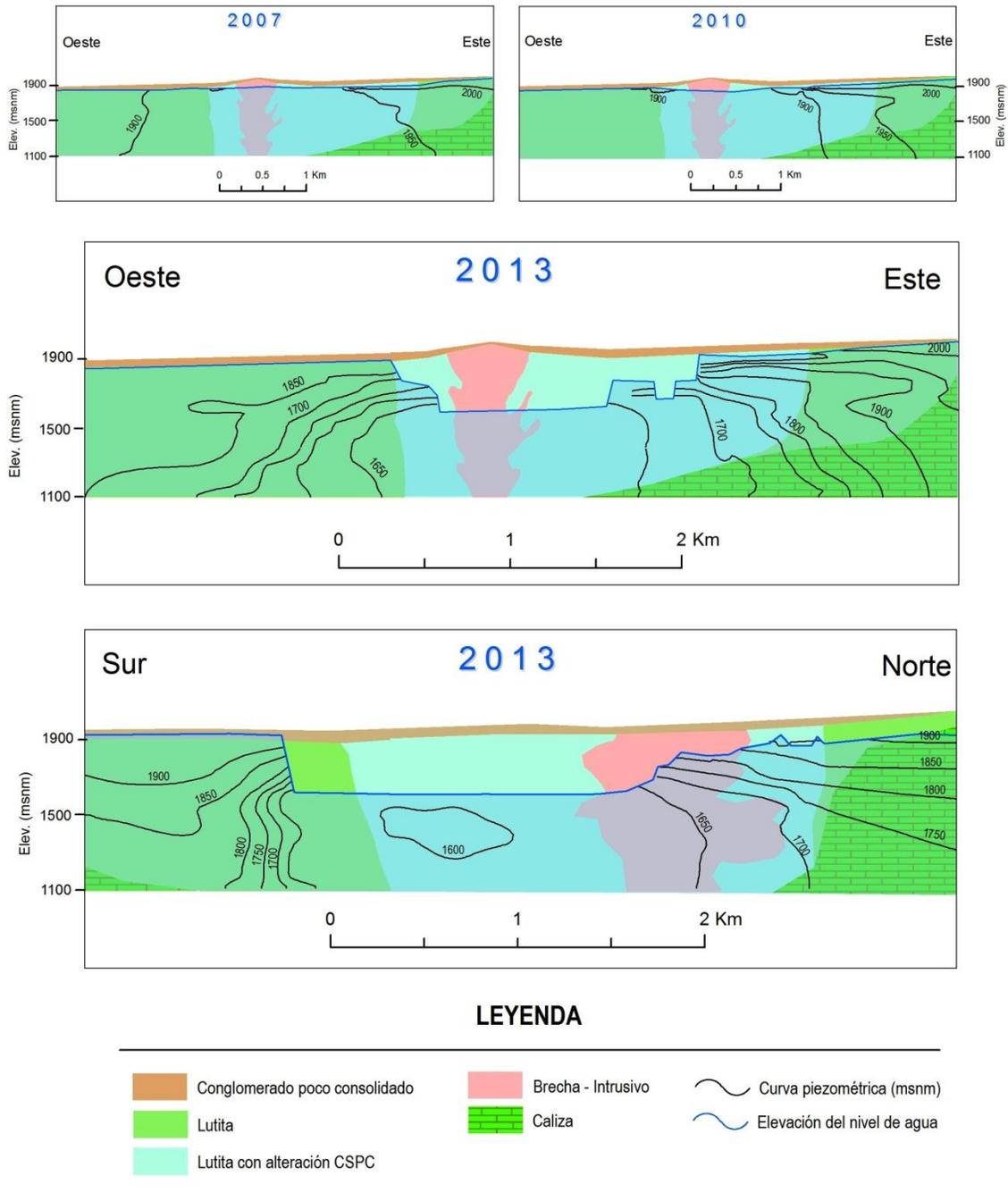


Figura 4.35 Evolución del nivel estático en el área del tajo, enfoque 3. **a** diciembre de 2007; **b** diciembre de 2010; **c** marzo de 2013 en sección Oeste – Este; **d** marzo de 2013 en sección Sur – Norte. El nivel observado en el piezómetro TP-1760 en marzo de 2013 es de 1582.0 msnm y el nivel simulado es de 1627.8 msnm.

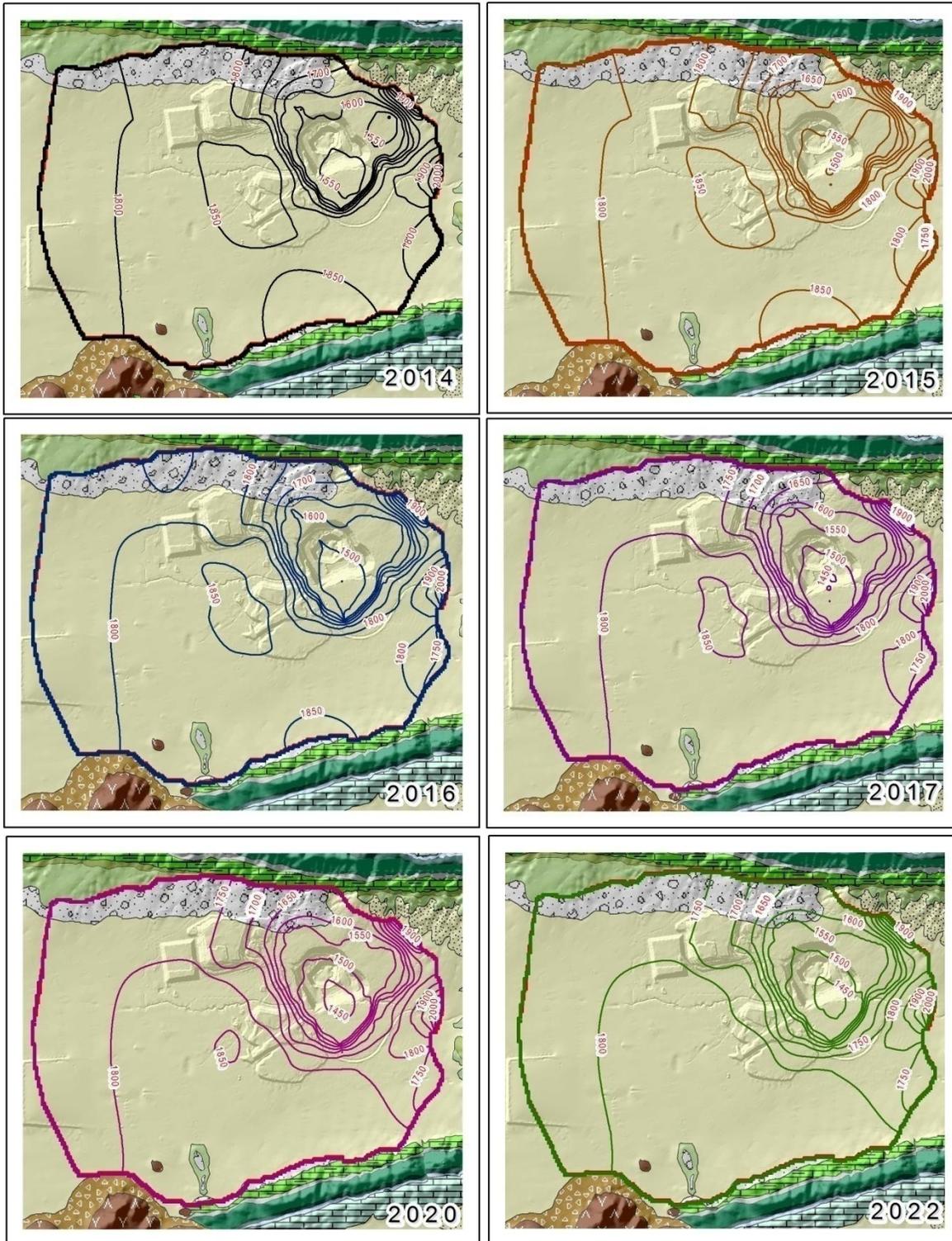


Figura 4.36 Evolución del nivel estático en el área del modelo para los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2022, para el enfoque 3. Se observa que bajo las condiciones de bombeo actuales, el nivel tiende a estabilizarse desde el 2014. Aunque se presenta un abatimiento en el centro del tajo, este no es suficiente para soportar el plan de minado, pues para el 2022 el fondo del tajo se encontrará en la cota 1265 msnm.

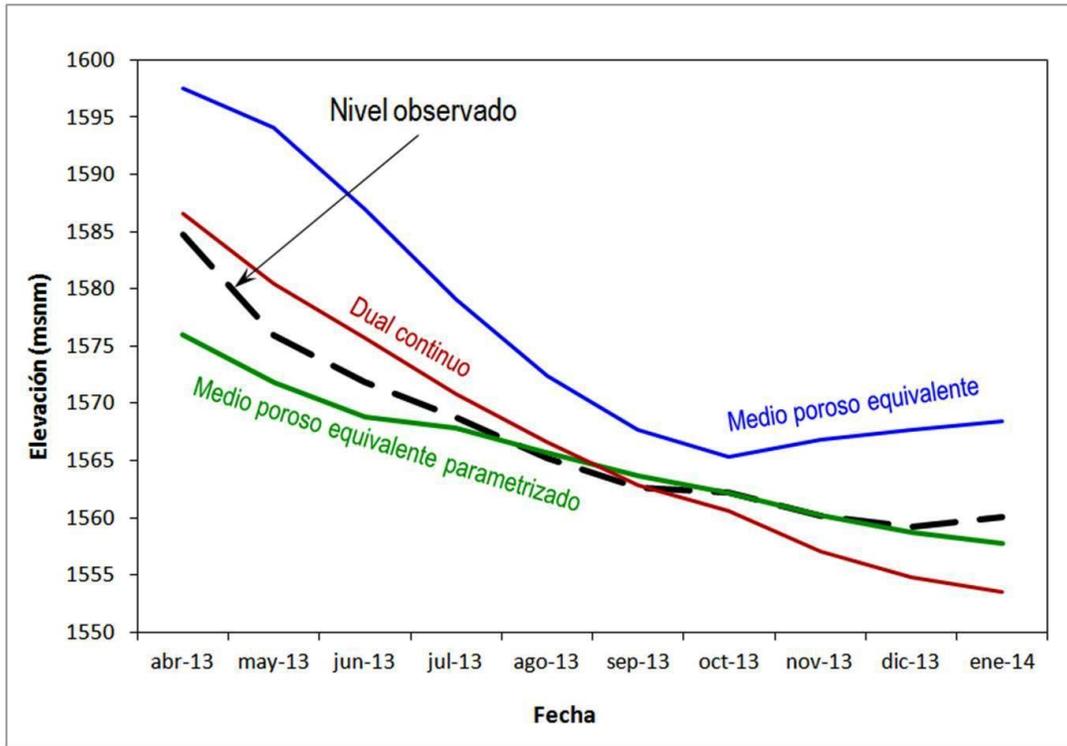


Figura 4.37 Calibración de los modelos con respecto al nivel de agua observado en el piezómetro TP-1760 localizado dentro del tajo, en la porción centro-sur.

4.4.6 Plan de desagüe a largo plazo

Se realizaron varias simulaciones para obtener el plan de desagüe a largo plazo para la mina. La elevación del fondo del tajo de acuerdo con el plan de minado se muestra en la Tabla 4.12, donde también se incluyen los resultados de plan de desagüe. Se colocaron inicialmente cinco pozos con inicio de bombeo en el 2014, además de conservar el régimen de bombeo de los pozos pre-existentes. El resultado de esta primera simulación se muestra en la Figura 4.38, donde se observa que en el 2018 el nivel de agua en el tajo se estabiliza, de modo que se hace necesario incrementar el volumen de bombeo para hacerlo descender. De este modo, se colocaron cinco pozos más dentro del tajo, para que con ellos se alcance a drenar satisfactoriamente (Figuras 4.39 y 4.40).

Tabla 4.12 Elevación del fondo del tajo de acuerdo con el plan actual de minado. Se incluyen también los resultados de la modelación considerando la adición de cinco o diez pozos de desagüe.

Fecha	Elevación del fondo del tajo (msnm)	Elevación del nivel de agua con cinco pozos	Elevación del nivel de agua con diez pozos
Enero – 2014	1610	1556	1556
Enero – 2015	1505	1448	1448
Enero – 2016	1475	1401	1400
Enero – 2017	1460	1397	1396
Enero – 2018	1415	1392	1392
Enero – 2019	1340	1388	1281
Enero – 2020	1340	1394	1266
Enero – 2021	1340	1394	1261
Enero – 2022	1295	1394	1257
Enero – 2023	1265	1395	1253

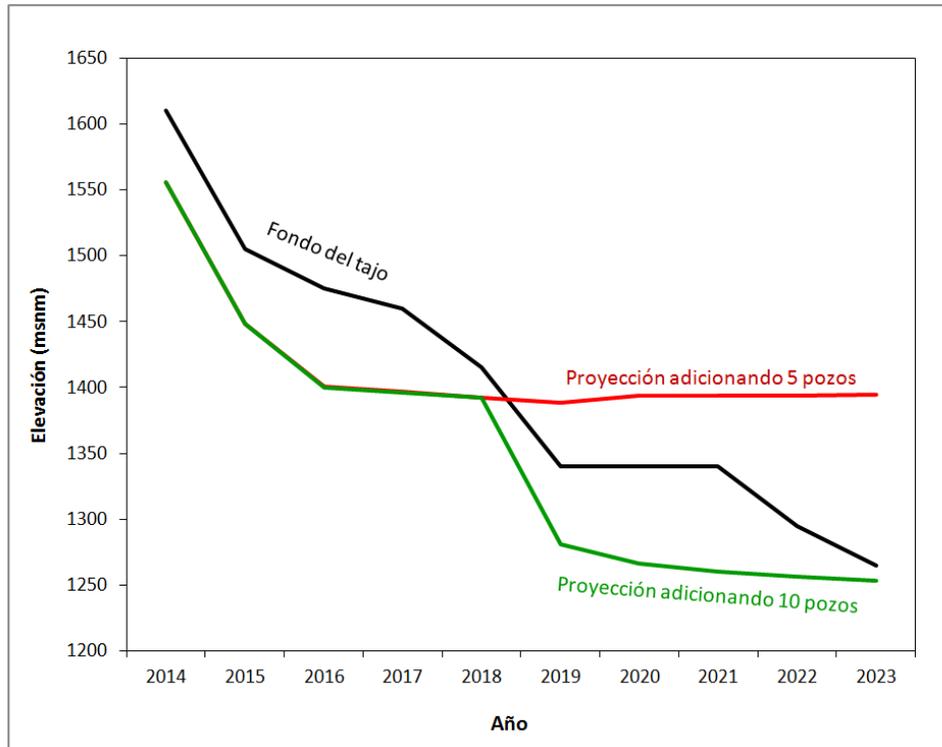


Figura 4.38 Evolución del nivel estático en el tajo para el periodo de 2014 a 2022 adicionando cinco y diez pozos a la operación.

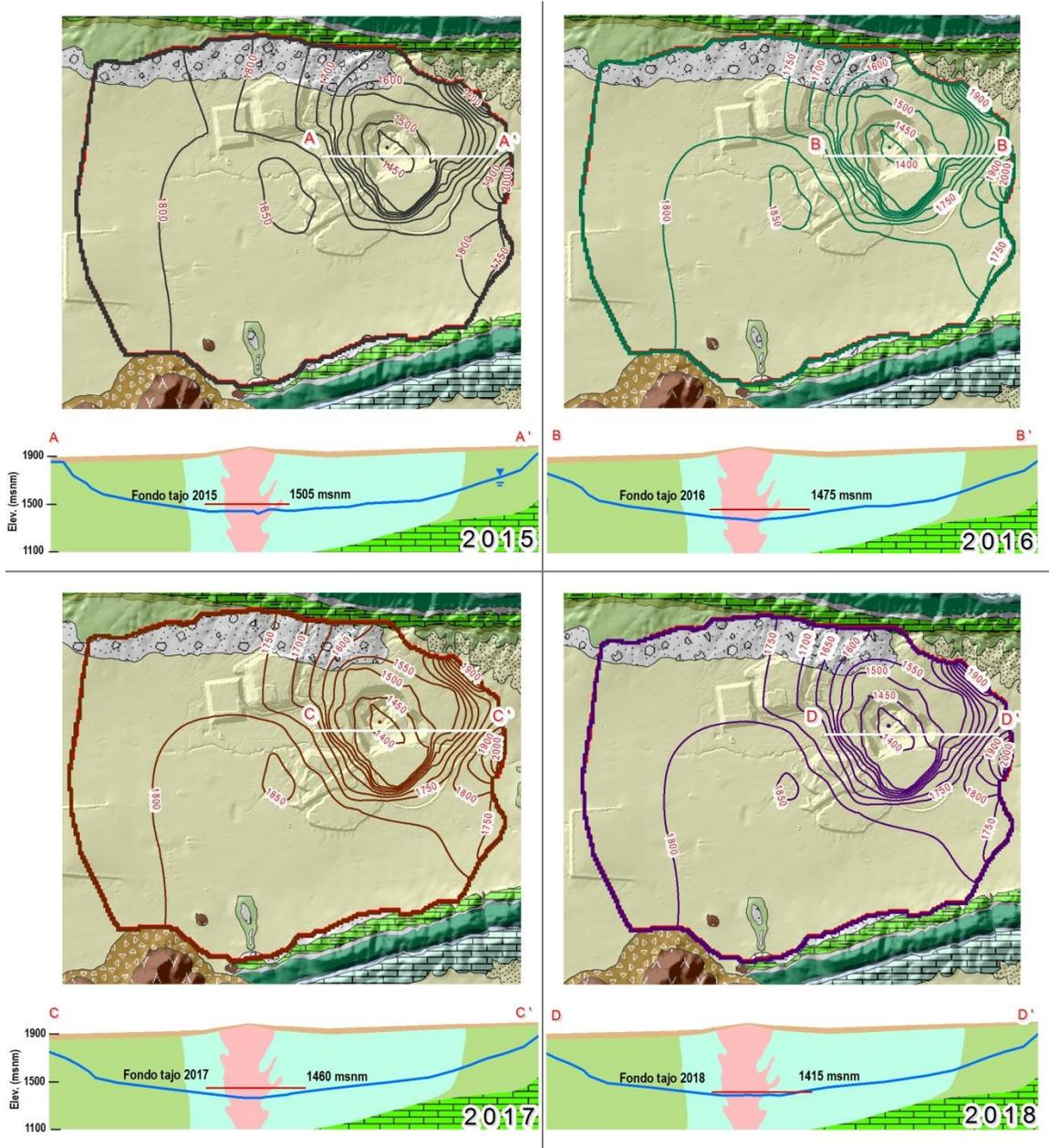


Figura 4.39 Evolución del nivel de agua en el tajo de acuerdo con el plan de desagüe propuesto de acuerdo con el plan de minado, para el periodo 2015 – 2018. Se observa que el nivel de agua siempre se encuentra por debajo del nivel de minado.

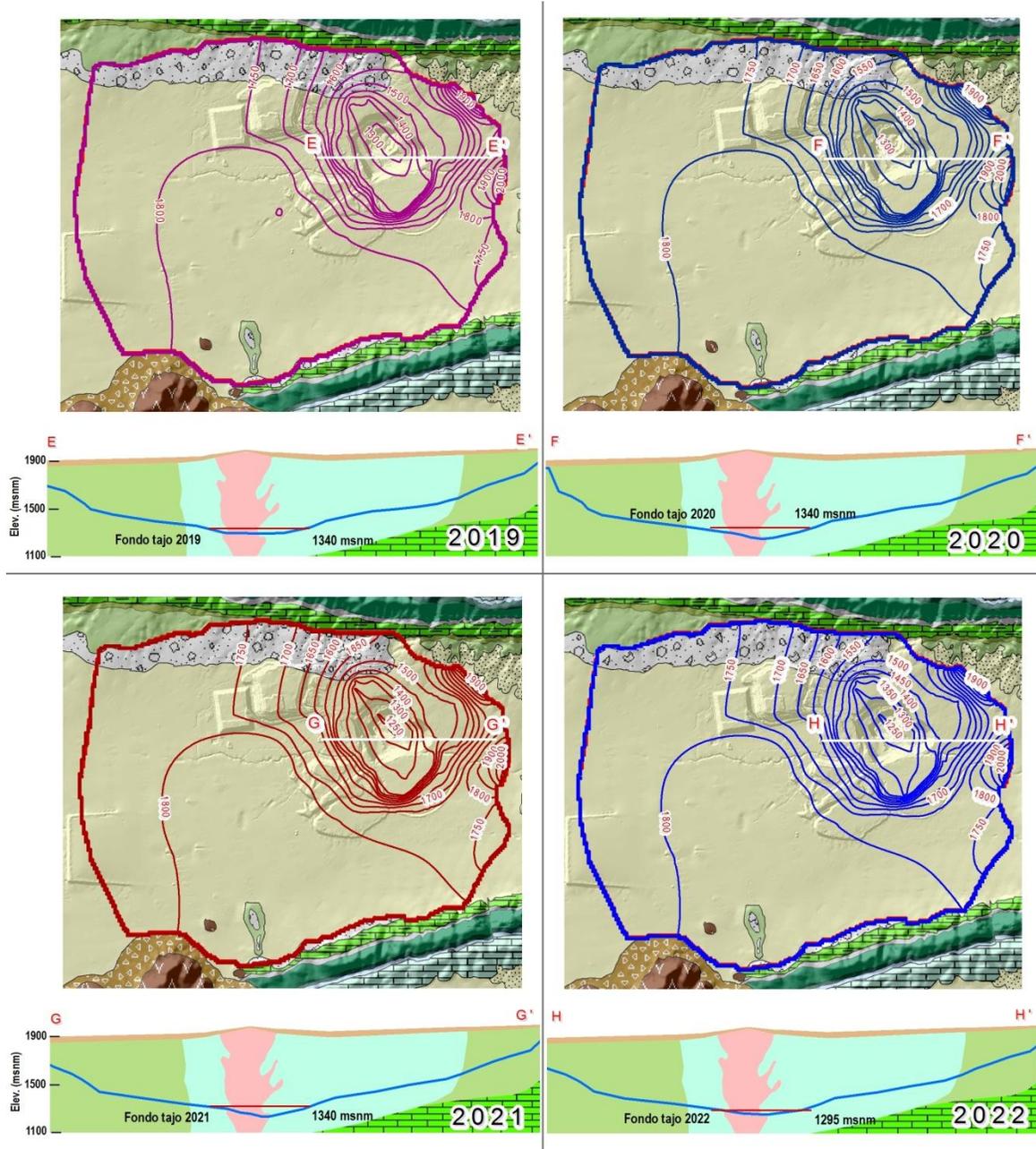
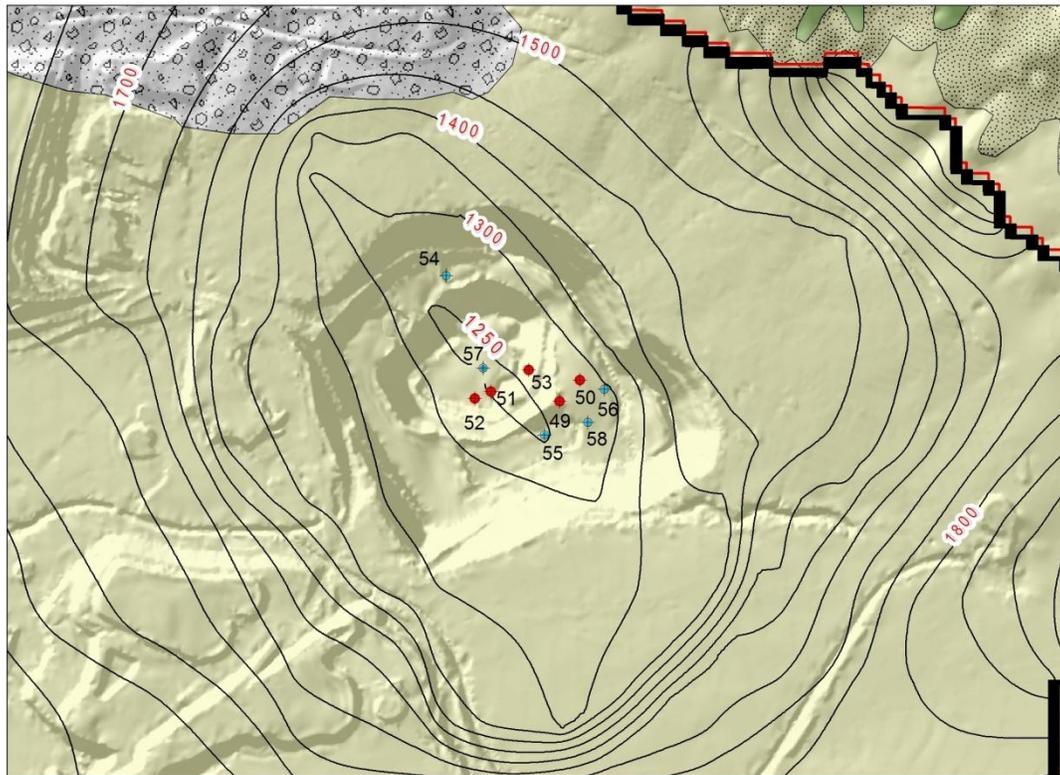


Figura 4.40 Evolución del nivel de agua en el tajo de acuerdo con el plan de desagüe propuesto de acuerdo con el plan de minado, para el periodo 2019 – 2022. Se observa que el nivel de agua siempre se encuentra por debajo del nivel de minado.

La ubicación de los pozos propuestos se muestra en la Figura 4.41. Estos fueron ubicados de acuerdo con la distribución de la conductividad hidráulica, buscando la intersección con las zonas de falla modeladas. El detalle de la ubicación, profundidad de ranurado, inicio de operación y caudal estimado se muestran en la Tabla 4.13. Se encontró que al colocar los pozos fuera de las zonas de alta conductividad hidráulica, la velocidad de abatimiento del nivel disminuye, lo que hacía necesario colocar más pozos, que a su vez es inapropiado operativamente, por las condiciones riesgosas que se generan al colocar varios pozos en las áreas donde se extrae mineral.

Tabla 4.13 Localización, y condiciones de modelación utilizadas para en la adición de los diez pozos de desagüe propuestos para el plan a largo plazo. Las coordenadas son en sistema NAD27, Zona 14.

Pozo	X	Y	Elevación del tramo ranurado (msnm)	Fecha de inicio de bombeo	Caudal modelado (m ³ /d)
DW49	229780	2728393	1480-1180	Abril – 2014	-3024
DW50	229872	2728492	1480-1180	Abril – 2014	-3024
DW51	229463	2728438	1480-1180	Mayo – 2014	-3024
DW52	229638	2728538	1480-1180	Mayo – 2014	-3024
DW53	229389	2728406	1480-1180	Julio – 2014	-3024
DW54	229258	2728971	1350-1150	Enero – 2018	-3024
DW55	229709	2728239	1350-1150	Enero – 2018	-3024
DW56	229984	2728449	1350-1150	Enero – 2018	-3024
DW57	229427	2728547	1350-1150	Enero – 2018	-3024
DW58	229908	2728296	1350-1150	Enero – 2018	-3024



LEYENDA

Cuaternario

Coluvión

Terciario - Neógeno

Conglomerado

Basalto

Brecha

Terciario - Paleógeno

Conglomerado

Cretácico

Lutita-Arenisca

Lutita-Caliza

Caliza-Lutita

Caliza

Caliza

Caliza-Lutita

Jurásico

Limolita-Caliza

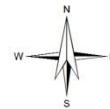
Caliza

1300 Nivel estático simulado - Enero 2022

Limite de celdas activas

Pozos para bombeo a partir del 2014

Pozos para bombeo a partir del 2018



ESCALA

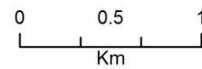


Figura 4.41 Ubicación de los diez pozos propuestas para desagüe a largo plazo.

4.5 Discusión

4.5.1 Comparación entre enfoques de modelación

El resumen de los resultados de calibración para los enfoques modelados se presenta en la Tabla 4.14. Para el primer periodo de calibración se observó que el enfoque dual-continuo presentó mejores resultados con un *RMS* Normalizado menor a los otros dos enfoques. No obstante, este primer periodo de modelación presenta muy poco bombeo y efectos poco significativos en la hidrodinámica del acuífero resultando en una calibración bastante sencilla para este periodo. Por lo tanto, los tres enfoques ofrecen una representación muy apropiada desde el punto de vista de la modelación hidrogeológica, satisfaciendo el requerimiento del valor de *NRMS* < 10%.

Tabla 4.14 Resultados obtenidos en la modelación de los tres enfoques.

Periodo de estrés	Medio Poroso Equivalente			Medio Poroso Equivalente Parametrizado			Medio Dual-Continuo		
	NRMS (%)	Rango de variación de residuales (m)		NRMS (%)	Rango de variación de residuales (m)		NRMS (%)	Rango de variación de residuales (m)	
2007	7.7	-15.5	7.7	5.9	-21.0	24.0	5.1	-24.9	17.1
2010	22.0	-36.7	84.9	21.7	-76.5	93.9	19.2	-42.8	75.8
2013	11.0	-94.1	74.6	14.6	-54.36	196.9	9.9	-95.35	75.5

El segundo periodo de modelación fue el que presentó menor consistencia con los tres modelos. Los piezómetros ubicados al noroeste y sureste del tajo (PH-3, PH-4, RC-40 y GT-07) presentaron niveles simulados mayores a los observados en los tres enfoques, con excepción del GT-07 que respondió favorablemente al tercer enfoque. Dado que los cambios importantes entre cada enfoque se dieron en las conductividad hidráulica de las rocas (a partir de la capa 3), estos piezómetros probablemente sean sensibles a otros parámetros como la recarga o el almacenamiento. Por lo tanto, es difícil definir cuál de los tres enfoques es el más consistente en este periodo, aunque por una diferencia mínima, el tercer enfoque (medio dual-continuo) fue el más representativo.

El tercer periodo de simulación es el que deja al descubierto la alta heterogeneidad del área de estudio, manifestándose principalmente en los altos gradientes hidráulicos en el contacto de las lutitas sanas con las lutitas alteradas principalmente. Asimismo, este periodo de estrés permite ver claramente el efecto de las zonas de falla en la modelación dual-continua, disminuyendo notablemente los residuales en algunas zonas, pero aumentándolos en otras. Sin embargo, el enfoque dual-continuo de forma general se acerca mejor a las equipotenciales observadas, fallando en las calizas de la porción sureste del área. Desde el punto de vista de la modelación de acuíferos, este modelo es el único que cumple el requerimiento de un valor de *NRMS* <10 % y puede considerarse confiable para predicciones.

La tabla 4.15 muestra un resumen de las ventajas y desventajas de los tres enfoques de simulación. En cuanto a los modelos de Medio Poroso Equivalente (enfoques 1 y 2), se pudo observar que el modelo altamente parametrizado, no ofrece grandes ventajas desde el punto de vista de modelación contra un modelo basado en unidades hidrogeológicas, lo cual es consistente con Voss (2011). Probablemente el enfoque funcione mejor a menor escala, pero en el presente caso de estudio no se observaron ventajas claras en parametrizar la conductividad hidráulica.

Tabla 4.15 Comparación de ventajas y desventajas entre los enfoques de modelación utilizados

Enfoque de modelación	Complejidad de modelación	Calibración de conductividad hidráulica	Calibración de almacenamiento	Representatividad del acuífero fracturado	Sensibilidad a los errores de interpolación	Carga computacional
Medio Poroso Equivalente	Baja	Fácil de calibrar en el modelo de simulación	Fácil de calibrar en el modelo de simulación	Baja, porque generaliza las unidades	Baja	Baja
Medio Poroso Equivalente Parametrizado	Media	Difícil de calibrar durante la simulación, pues es necesario importar la base de datos	Fácil de calibrar en el modelo de simulación	Media porque asigna K por celda	Alta	Baja
Medio Dual-Continuo	Alta	Difícil de calibrar durante la simulación, pues es necesario importar la base de datos	Fácil de calibrar en el modelo de simulación	Alta, porque incluye todos los factores geológicos relacionados	Alta	Alta

Dado que la parametrización está en función de los tres modelos sólidos de RQD, alteración y litología, esta depende directamente de la cantidad de información y del método de interpolación. En este sentido, se observaron varias zonas incongruentes con el modelo conceptual, derivadas de deficiencias en la modelación de los atributos geológicos. Esta desventaja también aplica al modelo dual-continuo.

Con respecto a carga computacional, en tiempo para cada simulación en el modelo dual-continuo aumentó aproximadamente diez veces más con respecto a los dos enfoques anteriores debido a que se refinó la malla para poder modelar apropiadamente las zonas de falla, haciendo el proceso de calibración más largo y complicado por la alta demanda de tiempo y esfuerzo computacional.

4.5.2 Confiabilidad del plan de desagüe a largo plazo

Con respecto a la modelación de forma predictiva desde el 2014 al 2022, en el primer enfoque se observó una tendencia a la estabilización del nivel de agua en el centro del tajo a partir de 2014, manteniendo la evolución del bombeo actual. En los dos siguientes enfoques el nivel de agua en el tajo descendiendo lentamente, a un ritmo insuficiente de acuerdo con el plan de minado. Estos resultados muestran claramente que será necesario incrementar el volumen de bombeo en el tajo a partir del 2014. Con este fin se realizaron varias corridas de modelación para buscar el abatimiento apropiado del tajo de acuerdo con el plan de minado, aplicando el modelo dual-continuo porque conceptualmente es el que mejor representa al acuífero y porque presentó una calibración ligeramente mejor que los modelos de Medio Poroso Equivalente. El plan inicia adicionando cinco pozos en el 2014, logrando disminuir el nivel satisfactoriamente hasta el 2018. No obstante, fue necesario adicional cinco pozos más a partir del 2018 para lograr hacer descender el nivel y cumplir con el plan de minado.

Sin embargo, el plan de desagüe definido no es definitivo pues se encuentra en función del plan de minado, el cual se actualiza constantemente. Esto es porque del mismo modo que los modelos de simulación, los planes de minado se actualizan a causa de adición de nueva información geológica o por factores diversos como fluctuaciones en el precio del oro, cambios en las metas de producción, limitaciones en los equipos de minado y eventos extraordinarios como derrumbes, deslizamiento de rocas, etc. Por lo tanto, el presente modelo de simulación constituye una herramienta flexible para encontrar la forma de crear planes de desagüe en función de los planes de minado y de la operación, pues es necesario considerar la ubicación de caminos de acarreo, subestaciones eléctricas, facilidad para canalizar el agua hacia fuera del tajo, etc. antes de definir la ubicación más óptima de cada pozos de desagüe. Usualmente esta información se encuentra en función de planes de corto plazo, de modo que las ubicaciones definidas en el presente estudio en su momento deberán ser ajustadas.

4.5.3 Confiabilidad de los modelos

La calibración con respecto al nivel de agua en el tajo muestra la factibilidad de encontrar un arreglo de parámetros que satisfaga una calibración. Por lo tanto, se considera que los tres enfoques pueden ser representativos y válidos para simular las condiciones del flujo en el tajo. Sin embargo, el enfoque dual-continuo integra más información geológica que los otros dos y además fue ligeramente más consistente con los datos observados. Esto implica que, aunque hasta el 2013 la calibración fue satisfactoria, es difícil predecir el comportamiento hidrodinámico a mayor profundidad, de modo que en la medida que las predicciones avancen hacia las capas más profundas los resultados son menos confiables pues no se variaron los parámetros hidráulicos en función de la profundidad pues se carece de información para justificar dichas variaciones. De forma similar sucede con las predicciones de los modelos con enfoque Medio Poroso Equivalente, toda vez que no toda el área está cubierta con información de barrenos profundos, la cual es abundante en la zona del tajo y dispersa en los alrededores.

La hidrodinámica del área de estudio es sumamente compleja, de modo que fue difícil modelar los altos gradientes hidráulicos relacionados con cambios litológicos, de alteración y de grado de fracturamiento, a lo cual se adiciona la participación activa de las zonas de fallas. Afortunadamente, la gran cantidad de información de datos de bombeo, piezométrica y datos geológicos con que se cuenta redujo en gran medida el grado de incertidumbre, de tal forma que la calibración fue enfocada hacia las propiedades hidráulicas del acuífero. No obstante que esto les confiere una mayor confiabilidad a los tres modelos, desde el punto de vista de modelación hidrogeológica, varios escenarios no cumplen con la calibración mínima requerida, lo cual deriva en la necesidad de estudiar a mayor profundidad las causas de la falta de calibración. En el presente trabajo se evitó realizar ajustes sin fundamentos geológicos, para evitar forzar a los modelos a presentar una buena calibración en todos los escenarios.

4.6 Conclusiones

Los modelos son muy sensibles a la conductividad hidráulica y a los parámetros de almacenamiento de las lutitas sin alteración, pues esta unidad hidrogeológica es la de mayor espesor y distribución espacial. Por otro lado, el modelo dual-continuo mostró que existen zonas de falla que participan activamente en la hidrodinámica de flujo, lo cual fue muy claro en las estructuras con rumbo NW–SE relacionadas con los piezómetros PH3 y PH39.

Se observó que la variación de la recarga afecta principalmente al segundo periodo de estrés (2010), mientras el primer y tercer periodo muestran muy poca respuesta a la variación en cantidad y distribución de la recarga. Esto implica que el volumen de bombeo proviene principalmente del almacenamiento, de modo que es necesario estudiar más a fondo los valores y distribución de estos parámetros, que en el presente estudio fueron calibrados con bibliografía y con las cargas observadas. Por otro lado, las variaciones en las celdas de carga constante presentan poco efecto en los resultados.

A pesar de que el modelo dual-continuo pudo reproducir de forma más apropiada la configuración piezométrica observada y lograr mejor calibración, desde el punto de vista de modelación matemática la ventaja de este enfoque sobre los demás no es suficientemente clara para justificar su aplicación, pues la cantidad de información requerida y esfuerzo computacional son mucho mayores que lo que necesita el enfoque 1, el cual produjo resultados similares. Sin embargo, desde el punto de vista hidrogeológico, el modelo dual-continuo es mucho más representativo de las características del acuífero fracturado.

En este sentido, se puede concluir que el factor principal en la modelación del área fue producto del modelo conceptual y no necesariamente del enfoque de modelación en sí. Esto es porque los tres modelos se basaron en la diferenciación de los atributos geológicos del acuífero. El realizar la modelación sin considerar uno de los tres parámetros esenciales habría llevado a varios errores en la modelación, lo cual es evidente por un lado en los altos gradientes hidráulicos en el contacto de la lutita sana con lutita alterada y en los grandes contrastes de conductividad hidráulica de la zona de bajo RQD con las zonas de roca sana.

En cuanto al plan de desagüe, se concluye que las predicciones son confiables, sujetas a actualización en la medida que se obtenga mayor información pues se desconoce la hidráulica a profundidad. Si bien las propiedades hidráulicas a grandes profundidades fueron estimadas a partir de los atributos geológicos, es necesario considerar que la mayoría de barrenos alrededor del tajo, sobre todo al norte, sur y oeste no alcanzaron profundidades mayores que 400 m, de manera que en gran medida puede haber datos extrapolados.

El presente capítulo tuvo como objetivo analizar diferentes enfoques de modelación con el fin de lograr una mejor representación de la alta heterogeneidad de los acuíferos fracturados. Sin embargo, se concluye que un acuífero fracturado debe ser apropiadamente comprendido de forma conceptual pues a escala regional la modelación mediante varios enfoques puede llevar a resultados muy similares entre sí, de manera que la falta de comprensión de los factores principales que influyen en la hidrodinámica del acuífero conducirá a errores en la modelación y por consiguiente a toma de decisiones erróneas.

4.7 Referencias

- Alaoui A, Eugster W (2004) Dual-porosity modeling of groundwater recharge: testing a quick calibration using in situ moisture measurements, Areuse River Delta, Switzerland. *Hydrogeol J* 12:464-476
- Alwathaf Y, Mansouri B (2012) Hydrodynamic modeling for groundwater assessment in Sana'a Basin, Yemen. *Hydrogeol J* 20:1375-1392
- Bredehoeft J (2005) The conceptualization problem – surprise. *Hydrogeol J* 13:37-46
- de Marsily G, Delay F, Gonçalves J, Renard P, Teles V, Violette S (2005) Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeol J* 13:161-183
- Comisión Nacional del Agua (2002) Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Publicada en el D.O.F. el 17 de abril de 2002.
- Coutagne A (1954). Etude de quelques corrélations hydrométéorologiques regionales et de leur interpretation algébrique. *Ibid.*, 220-226
- Giambastiani B, McCallum A, Andersen M, Kelly B, Acworth R (2012) Understanding groundwater processes by representing aquifer heterogeneity in the Maules Creek Catchment, Namoi Valley (New South Wales, Australia). *Hydrogeol J* 20:1027-1044
- Harbaugh A (2005) MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model — the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p.
- Goodman S (2012) Structural model of the Peñasquito mine, Zacatecas State, Mexico. CAE Mining unpublished report for Goldcorp Inc.
- Herrera E, Garfias J (2013) Characterizing a fractured aquifer in Mexico using geological attributes related to open-pit groundwater. *Hydrogeol J* 21:1323-1338
- IDEAS (2007) Informe final de la hidroclimatología del proyecto Minero Peñasquito. Integración de la manifestación de impacto ambiental local. Reporte técnico no publicado, para GoldCorp, Inc.
- Langbein W (1949) Annual runoff in the United States. U. S. Geological Survey Circ. 52. p.14.
- National Research Council (1996) Rock Fractures and Fluid Flow, Contemporary Understanding and Applications: National Research Council, National Academy Press, Washington, DC, p. 551.

- Rausch R, Schäfer W, Therrien R, Wagner C (2009) Solute transport modeling. An introduction to models and solution strategies. Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, 26:264–270 p.
- Ragan D (1987) Geología estructural. Introducción a las técnicas geométricas. Ediciones Omega S.A. Barcelona, P. 207
- Surrete M, Allen D, Journeay M (2008) Regional evaluation of hydraulic properties in variably fractured rock using a hydrostructural domain approach. *Hydrogeol J* 16:11-30
- Scanlon B, Mace R, Barrett M, Smith B (2003) Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *J of Hydrology* 276 137–158.
- Scanlon B, Keese K, Flint A, Flint L, Gaye C, Edmunds W, Simmers L (2006) Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrol Process*, Vol. 20, Issue 15, 3335-3370.
- Shingal B, Gupta R (1999) Applied hydrogeology of fractured rocks. Kluwer academic publishers, 400 p
- Slade R, Ruiz L, Slagle D (1985) Simulation of the flow system of Barton Springs and associated Edwards Aquifer in the Austin area, Texas. In: Scanlon B, Mace R, Barrett M, Smith B (2003) Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *J of Hydrology* 276 137–158.
- Su N (1994) A formula for computation of time-varying recharge of groundwater. In: Alaoui A, Eugster W (2004) Dual-porosity modeling of groundwater recharge: testing a quick calibration using in situ moisture measurements, Areuse River Delta, Switzerland. *Hydrogeol J* 12:464-476
- Thum P, Stüben K (2012) Advanced algebraic multigrid application for the acceleration of groundwater simulations. XIX Conference on Water Resources, CMWR. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Turc L (1954) The water balance of soils', relation between precipitation evaporation and flow. *Ann. Agronomiques* 5:491–569
- Universidad de Sonora (2004) Estudio regional de evaluación hidrogeológica del acuífero Cedros, en el municipio de Mazapil, en el estado de Zacatecas. Reporte no publicado para M3 Mexicana.
- Voss C (2011) Editor's message: Groundwater modeling fantasies – part 1, adrift in the details. *Hydrogeol J* 19:1281-1284

CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones generales

5.1 Conclusiones generales

En la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero, uno de los objetivos fue utilizar la información geológica que comúnmente está enfocada hacia la exploración mineral y convertirla en información hidrogeológica de utilidad. Este objetivo se cumplió satisfactoriamente al encontrar importantes relaciones geológico-hidráulicas utilizando dicha información y los resultados de las pruebas de bombeo en los pozos. El cumplimiento de este objetivo fue de suma importancia para la correcta caracterización hidrogeológica del área.

La construcción del modelo conceptual inició con un modelo sólido de RQD, cuyo proceso de optimización mostró que la malla con menor tamaño de celda produce la mejor correlación, así como el método de ponderación inversa a la distancia en modalidad de anisotropía. La comparación de los resultados muestra que el comportamiento hidrodinámico en el área presenta una fuerte relación con el grado de alteración, litología y fracturamiento de la roca (RQD). Se encontró que las lutitas con alteración moderada a fuerte presentan mayor conductividad hidráulica sobre todo cuando su RQD es bajo. En cambio, las lutitas sanas presentan conductividades hidráulicas bajas, fracturadas o no. Adicionalmente, el análisis mostró que las mayores conductividades hidráulicas se

encuentran en brechas e intrusivos con alto RQD con cualquier tipo de alteración, de modo que se concluye que estos altos valores se derivan de la intersección de los pozos con las zonas de falla identificadas en estudios previos con alta conectividad hidráulica. Esto concluyó con la conceptualización de dos dominios estructurales para el área de estudio, matriz fracturada y fallamiento regional.

Para encontrar las ecuaciones apropiadas para la estimación de la conductividad hidráulica en cada celda del dominio de matriz fracturada, fue necesario tomar información bibliográfica y ajustarla para lograr mejor congruencia con el modelo conceptual y con los valores reales obtenidos en las pruebas de bombeo. Este ajuste se debe en gran medida a la falta de una referencia de conductividad hidráulica para lutitas con alteración CSPC. Al final, las ecuaciones aplicadas lograron coeficientes de correlación mayores a 0.90. En el caso del dominio de fallamiento regional, el valor de conductividad hidráulica de la zona de falla se determinó haciendo una analogía del modelo con un acuífero estratificado, aplicando el concepto de transmisividad. Los valores obtenidos de las fallas resultaron mayores a los del resto de capas logrando la congruencia con el modelo conceptual.

A pesar de los errores de interpolación derivados de falta de información y del método utilizado para crear los modelos sólidos, se considera que la metodología utilizada para convertir la información cuantitativa obtenida en el modelo conceptual en conductividades hidráulicas en función de los atributos geológicos del área es apropiada para definir estos valores en el modelo matemático.

Los modelos matemáticos desarrollados son muy sensibles a la conductividad hidráulica y a los parámetros de almacenamiento de las lutitas sin alteración, pues esta unidad hidrogeológica es la de mayor espesor y distribución espacial. Asimismo, existe mucha sensibilidad en el contacto lutitas sanas–lutitas alteradas, pues en esas zonas se generan altos gradientes hidráulicos.

Se observó que la variación de la recarga afecta principalmente al segundo periodo de estrés (2010), mientras el primero y tercer periodo muestran muy poca respuesta a la variación de la recarga, tanto de la cantidad como de su distribución. Esto implica que a profundidad el volumen de bombeo proviene principalmente del almacenamiento.

De acuerdo con la calibración de los modelos, la ventaja del enfoque dual-continuo sobre los demás no es suficientemente amplia para justificar su aplicación, pues la cantidad de información requerida y esfuerzo computacional son mucho mayores que los requeridos por el enfoque 1, el cual produjo resultados similares. Pero desde el punto de vista hidrogeológico, el modelo dual-continuo es mucho más representativo de las características del acuífero fracturado. Por lo tanto, se concluye que el factor principal en la modelación del área fue la definición del modelo conceptual y no necesariamente el enfoque de modelación. Realizar la modelación sin considerar uno de los tres atributos geológicos principales habría llevado a varios errores en la modelación, lo cual es evidente en los altos gradientes hidráulicos en el contacto de la lutita sana–lutita alterada y en los grandes contrastes de conductividad hidráulica de la zona de bajo RQD con las zonas de roca sana.

Se concluye que las predicciones del plan de desagüe son confiables, pero sujetas a actualización en la medida que se obtenga mayor información, pues se desconoce la hidráulica a profundidad. Si bien las propiedades hidráulicas a grandes profundidades fueron estimadas a partir de los atributos geológicos, es necesario considerar que la mayoría de barrenos alrededor del tajo, sobre todo al norte, sur y oeste no alcanzaron profundidades mayores que 400 m, de manera que en gran medida puede haber datos extrapolados.

El estudio concluye que los acuíferos fracturados deben ser apropiadamente comprendidos de forma conceptual pues a escala regional la modelación mediante varios enfoques puede llevar a resultados muy similares entre sí, de manera que la falta de comprensión de los factores principales que influyen en la hidrodinámica del acuífero conducirá a errores en la modelación y por consiguiente a toma de decisiones erróneas.

Los resultados obtenidos en el presente estudio proporcionan un marco de referencia muy importante para identificar las características principales que controlan la hidrodinámica global de un acuífero fracturado. La determinación de los factores y mecanismos que controlan el flujo en los sistemas naturales fracturados es de vital importancia para predecir el flujo de agua subterránea y los impactos en la calidad del agua en estos ambientes. Por lo tanto, es necesario realizar más análisis de este tipo para lograr una mejor comprensión y planeación del desagüe en una mina a cielo abierto y de las fuentes de abastecimiento de agua en los acuíferos fracturados.

5.2 Recomendaciones

El presente estudio no puede concluir que el tamaño de celda y el método de interpolación utilizados son los apropiados para otras localidades, de modo que para su aplicación en otras áreas deberán probarse otros métodos y tamaños de celdas, de acuerdo con la información disponible en cada caso particular. Esto es porque en la definición del tamaño de celda más apropiado para la definición del modelo de RQD, la reducción estuvo limitada por el software, de modo que se recomienda utilizar otros paquetes de interpolación que no presenten este problema. Los trabajos posteriores deberán considerar otros paquetes de modelación más amplios.

En cuanto al software de modelación, Visual ModFlow es de uso muy común pues presenta varias ventajas como rapidez y visualización. No obstante, los siguientes trabajos deberán explorar el uso del método de elemento finito en problemas similares. Asimismo, el arreglo rectangular de la malla podría cambiarse por mallas triangulares y verificar si ésta puede representar de forma más apropiada la heterogeneidad del medio fracturado.

Debido a que las características hidráulicas de las capas más profundas del acuífero no pudieron ser comprobadas, no se recomienda utilizar el modelo para predicciones a largo plazo. Aunque la regla general en modelación es predecir el mismo número de años con que se cuente con información piezométrica, en el presente estudio el primer periodo tuvo muy poco bombeo de modo que los resultados podrían ser confiables solo por un periodo de seis años en vez de nueve, hasta el año 2019. No obstante, dada la exigencia de precisión para la toma de decisiones referentes al desagüe en una mina, lo recomendable es actualizar y calibrar los modelos periódicamente buscando ajustes cada vez más precisos. Además, el plan de desagüe está en función del plan de minado el cual puede variar por causas muy diversas. Asimismo, la ubicación de los pozos de desagüe debe estar en función de los requerimientos de operación del momento, por lo tanto, el modelo desarrollado debe utilizarse como una herramienta flexible que permita modelar diversos escenarios de desagüe de acuerdo con las necesidades de corto plazo de la mina.

Apéndice A

Datos de bombeo utilizados para la modelación

Periodo	Número de día	DW1	DW2	DW3	DW4	DW6	DW8	DW8A	DW10	DW11	DW12	DW13	DW14	DW15	DW16	DW17	DW18	DW19	
oct-04 dic-07	0 1155	-477	-159	-163	-94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
dic-07 dic-10	1155 2239	-459	-1070	-1340	-656	-1410	-1241	-169	-529	-650	-519	-282	-18	-343	-36	0	0	0	
dic-10 mar-13	2239 3057	0	0	0	0	-225	0	-206	0	0	0	-792	-1402	0	-1367	-54	-934	-90	-2199
mar-13 abr-13	3057 3092	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-780	0	0	0	0	0	0
abr-13 may-13	3092 3122	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-760	0	0	0	0	0	0
may-13 jun-13	3122 3153	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-743	0	0	0	0	0	0
jun-13 jul-13	3153 3183	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-705	0	0	0	0	0	0
jul-13 ago-13	3183 3214	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-651	0	0	0	0	0	0
ago-13 sep-13	3214 3245	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-625	0	0	0	0	0	0
sep-13 oct-13	3245 3275	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-595	0	0	0	0	0	0
oct-13 nov-13	3275 3306	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-610	0	0	0	0	0	0
nov-13 dic-13	3306 3336	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-676	0	0	0	0	0	0
dic-13 ene-14	3336 3367	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-642	0	0	0	0	0	0
ene-14 feb-14	3367 3398	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-655	0	0	0	0	0	0
feb-14 mar-14	3398 3426	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-615	0	0	0	0	0	0
mar-14 abr-14	3426 3457	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-522	0	0	0	0	0	0
abr-14 may-14	3457 3487	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-595	0	0	0	0	0	0
may-14 jun-14	3487 3518	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-586	0	0	0	0	0	0
jun-14 jul-14	3518 3548	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-577	0	0	0	0	0	0
jul-14 ago-14	3548 3579	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-569	0	0	0	0	0	0
ago-14 sep-14	3579 3610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-561	0	0	0	0	0	0
sep-14 oct-14	3610 3640	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-553	0	0	0	0	0	0
oct-14 nov-14	3640 3671	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-546	0	0	0	0	0	0
nov-14 dic-14	3671 3701	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-538	0	0	0	0	0	0
dic-14 ene-15	3701 3734	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-531	0	0	0	0	0	0
ene-15 ene-16	3734 4099	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-493	0	0	0	0	0	0
ene-16 ene-17	4099 4465	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-436	0	0	0	0	0	0
ene-17 ene-18	4465 4830	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-229	0	0	0	0	0	0
ene-18 ene-19	4830 5195	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ene-19 ene-20	5195 5560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ene-20 ene-21	5560 5926	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ene-21 ene-22	5926 6291	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Periodo	Número de día	DW21	DW22	DW24	DW25	DW26	DW27	DW28	DW29	DW30	DW31	DW32	DW33	DW35	DW37	DW39	DW40		
oct-04	dic-07	0	1155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
dic-07	dic-10	1155	2239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
dic-10	mar-13	2239	3057	-341	-381	-23	-1722	-600	-579	-1280	-420	-972	-331	-326	-988	-137	-271	-1085	-75
mar-13	abr-13	3057	3092	0	0	0	-1358	-587	-671	-2886	0	-2241	-627	-483	-1577	0	0	-3691	0
abr-13	may-13	3092	3122	0	0	0	-946	-571	-603	-2393	0	-2099	-573	-450	-1446	0	0	-4047	0
may-13	jun-13	3122	3153	0	0	0	-748	-610	-516	-2358	0	-1996	-588	-444	-1459	0	0	-3922	0
jun-13	jul-13	3153	3183	0	0	0	-614	-554	-620	-2777	0	-2148	-561	-423	-1258	0	0	-4025	0
jul-13	ago-13	3183	3214	0	0	0	-644	-526	-612	-2563	0	-2108	-534	-395	-1886	0	0	-4016	0
ago-13	sep-13	3214	3245	0	0	0	-355	-507	-609	-2572	0	-2145	-547	-357	-1682	0	0	-3915	0
sep-13	oct-13	3245	3275	0	0	0	0	-454	-578	-2206	0	-1855	-568	-317	-1738	0	0	-3772	0
oct-13	nov-13	3275	3306	0	0	0	0	-528	-491	-2484	0	-549	-257	-302	-1823	0	0	-3922	0
nov-13	dic-13	3306	3336	0	0	0	0	-530	-437	-2392	0	-759	0	-293	-1800	0	0	-3770	0
dic-13	ene-14	3336	3367	0	0	0	0	-563	-434	-2236	0	-12	0	-287	-1776	0	0	-3485	0
ene-14	feb-14	3367	3398	0	0	0	0	-540	-421	-2263	0	0	0	-290	-1788	0	0	-3568	0
feb-14	mar-14	3398	3426	0	0	0	0	-490	-409	-2263	0	0	0	-269	-1788	0	0	-3568	0
mar-14	abr-14	3426	3457	0	0	0	0	-425	-288	-2263	0	0	0	-242	-1788	0	0	-3568	0
abr-14	may-14	3457	3487	0	0	0	0	-476	-369	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
may-14	jun-14	3487	3518	0	0	0	0	-469	-350	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
jun-14	jul-14	3518	3548	0	0	0	0	-463	-332	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
jul-14	ago-14	3548	3579	0	0	0	0	-457	-315	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
ago-14	sep-14	3579	3610	0	0	0	0	-451	-299	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
sep-14	oct-14	3610	3640	0	0	0	0	-446	-284	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
oct-14	nov-14	3640	3671	0	0	0	0	-441	-270	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
nov-14	dic-14	3671	3701	0	0	0	0	-436	-248	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
dic-14	ene-15	3701	3734	0	0	0	0	-430	0	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
ene-15	ene-16	3734	4099	0	0	0	0	-404	0	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
ene-16	ene-17	4099	4465	0	0	0	0	-365	0	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
ene-17	ene-18	4465	4830	0	0	0	0	-194	0	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
ene-18	ene-19	4830	5195	0	0	0	0	0	0	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
ene-19	ene-20	5195	5560	0	0	0	0	0	0	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
ene-20	ene-21	5560	5926	0	0	0	0	0	0	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0
ene-21	ene-22	5926	6291	0	0	0	0	0	0	-2263	0	0	0	0	-1788	0	0	-3568	0

Periodo	Número de día	DW41	DW42	DW44	DW45	DW46	MW01	*DW49	*DW50	*DW51	*DW52	*DW53	*DW54	*DW55	*DW56	*DW57	*DW58
oct-04 dic-07	0 1155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dic-07 dic-10	1155 2239	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dic-10 mar-13	2239 3057	-986	-710	-399	-485	-188	-33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
mar-13 abr-13	3057 3092	-3033	-3867	-1055	-3693	-2289	-662	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
abr-13 may-13	3092 3122	-3624	-3769	-1219	-3684	-2179	-290	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
may-13 jun-13	3122 3153	-3736	-3949	-1177	-3621	-2087	-491	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
jun-13 jul-13	3153 3183	-3542	-3959	-1104	-3618	-2133	-416	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
jul-13 ago-13	3183 3214	-3426	-3908	-1087	-3500	-2154	-372	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ago-13 sep-13	3214 3245	-3465	-3903	-1060	-3535	-2072	-342	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sep-13 oct-13	3245 3275	-2640	-3874	-879	-3278	-1384	-276	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
oct-13 nov-13	3275 3306	-3195	-3931	-1066	-3212	-1829	-281	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
nov-13 dic-13	3306 3336	-4353	-3862	-944	-3038	-1843	-297	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dic-13 ene-14	3336 3367	-4630	-3621	-898	-2984	-1833	-299	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ene-14 feb-14	3367 3398	-4613	-3566	-845	-2896	-1832	-19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
feb-14 mar-14	3398 3426	-4613	-3548	-806	-2790	-1778	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
mar-14 abr-14	3426 3457	-4613	-3324	-457	-1509	-1108	0	-3024	-3024	0	0	0	0	0	0	0	0
abr-14 may-14	3457 3487	-4613	-3512	-724	-2581	-1670	0	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0	0
may-14 jun-14	3487 3518	-4613	-3494	-687	-2476	-1616	0	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0	0
jun-14 jul-14	3518 3548	-4613	-3476	-651	-2371	-1562	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0
jul-14 ago-14	3548 3579	-4613	-3458	-616	-2266	-1508	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0
ago-14 sep-14	3579 3610	-4613	-3440	-583	-2161	-1454	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0
sep-14 oct-14	3610 3640	-4613	-3422	-552	-2056	-1400	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0
oct-14 nov-14	3640 3671	-4613	-3404	-522	-1951	-1346	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0
nov-14 dic-14	3671 3701	-4613	-3386	-493	-1846	-1292	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0
dic-14 ene-15	3701 3734	-4613	-3367	-463	-1735	-1235	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0
ene-15 ene-16	3734 4099	-4613	-3249	-252	-1049	-882	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0
ene-16 ene-17	4099 4465	-4613	-3034	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	0	0	0	0	0
ene-17 ene-18	4465 4830	-4613	-2817	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
ene-18 ene-19	4830 5195	-4613	-2601	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
ene-19 ene-20	5195 5560	-4613	-2385	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
ene-20 ene-21	5560 5926	-4613	-2170	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024
ene-21 ene-22	5926 6291	-4613	-1953	0	0	0	0	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024	-3024

*Pozos propuestos en plan de desagüe

Apéndice B

Datos de calibración

Pozo	X	Y	Z	Profundidad al nivel estático en Octubre de 2004 (m)	Elevación del nivel estático en Octubre de 2004 (msnm)	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
						Simulado	Residual	Simulado	Residual	Simulado	Residual
B02	228148	2725131	1910	27.63	1882.37	1883.38	1.01	1877.354	-5.02	1884.734	2.36
B06	226361	2724988	1875	33.51	1841.49	1851.469	9.98	1843.047	1.56	1848.944	7.45
B24	223808	2726927	1824	19.87	1804.13	1793.34	-10.79	1791.981	-12.15	1794.675	-9.46
B38	228857	2727560	1946	22.00	1924.00	1916.008	-7.99	1907.152	-16.85	1910.185	-13.82
B40	223210	2729139	1828	58.87	1769.13	1777.667	8.54	1775.581	6.45	1777.258	8.13
B47	223797	2724385	1815	26.00	1789.00	1791.003	2.00	1787.173	-1.83	1789.813	0.81
						RMS	7.7	RMS	9.165	RMS	8.248
						NRMS	4.98%	NRMS	5.92%	NRMS	5.33%
						Max	-10.79	Max	-16.848	Max	-13.815
						Min	1.01	Min	1.557	Min	0.812

Coordenadas en sistema NAD27, Zona 14N

Pozo	X	Y	Z	Profundidad al nivel estático en Diciembre de 2007 (m)	Elevación del nivel estático en Diciembre de 2007 (msnm)	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
						Simulado	Residual	Simulado	Residual	Simulado	Residual
B02	228148	2725131	1910	30.59	1879.41	1885.163	5.753	1879.982	0.572	1885.188	5.778
B06	226361	2724988	1875	33.95	1841.05	1850.946	9.896	1843.825	2.775	1849.164	8.114
B146	225519	2729498	1888	30.17	1857.83	1855.772	-2.058	1848.051	-9.779	1848.756	-9.074
B147	231231	2729346	2050	95.29	1954.71	1957.739	3.029	1956.716	2.006	1948.19	-6.52
B24	223808	2726927	1830	24.39	1805.61	1793.298	-12.312	1792.136	-13.474	1796.215	-9.395
B38	228857	2727560	1946	25.62	1920.38	1917.648	-2.732	1907.398	-12.982	1910.224	-10.156
B40	223210	2729139	1830	57.98	1772.02	1777.416	5.396	1775.207	3.187	1776.785	4.765
B47	223797	2724385	1815	26.99	1788.01	1796.745	8.735	1794.859	6.849	1794.348	6.338
PC-4	227920	2725092	1908	38.80	1869.20	1877.177	7.977	1869.827	0.627	1876.011	6.811
RC-06	230001	2729119	2005	93.19	1911.81	1944.57	32.76	1935.818	24.008	1924.427	12.617
RC-08	228766	2728160	1921	9.82	1911.18	1924.839	13.659	1910.038	-1.142	1910.642	-0.538
RC-23	230448	2728284	1995	87.06	1907.94	1944.53	36.59	1926.988	19.048	1925.082	17.142
RC-26	229660	2726837	1964	43.23	1920.77	1926.158	5.388	1918.775	-1.995	1917.52	-3.25
S-03	230825	2727110	1991	15.36	1975.64	1960.093	-15.547	1954.584	-21.056	1950.773	-24.867
S-12	230494	2728775	2011	86.47	1924.53	1949.203	24.673	1943.182	18.652	1929.183	4.653
WC-06	228846	2727560	1945	25.00	1920.00	1922.55	2.55	1910.271	-9.729	1908.831	-11.169
						RMS	15.726	RMS	12.108	RMS	10.468
						NRMS	7.72%	NRMS	5.95%	NRMS	5.14%
						Max	36.59	Max	24.008	Max	-24.867
						Min	-2.058	Min	0.572	Min	-0.538

Coordenadas en sistema NAD27, Zona 14N

Pozo	X	Y	Z	Profundidad al nivel estático en Diciembre de 2010 (m)	Elevación del nivel estático en Diciembre de 2010 (msnm)	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
						Simulado	Residual	Simulado	Residual	Simulado	Residual
B02	228148	2725131	1910	30.08	1879.92	1886.079	6.159	1881.168	1.248	1885.717	5.797
B146	225519	2729498	1888	28.32	1859.68	1855.665	-4.015	1847.977	-11.703	1848.437	-11.243
B40	223210	2729139	1830	56.31	1773.69	1776.929	3.239	1774.546	0.856	1776.006	2.316
GT-07	228881	2729723	1989	113.79	1875.21	1905.756	30.546	1922.948	47.738	1888.804	13.594
PH-1	227884	2728377	1925	38.05	1886.75	1908.078	21.328	1886.010	-0.740	1884.811	-1.939
PH-2	230779	2727931	1993	46.39	1946.31	1919.431	-26.879	1927.452	-18.858	1917.857	-28.453
PH-3	228399	2729571	1964	167.47	1796.53	1878.741	82.211	1890.439	93.909	1872.347	75.817
PH-4	230156	2727764	1976	176.59	1799.81	1884.305	84.495	1875.166	75.356	1874.963	75.153
PH-6	228574	2728053	1942	73.38	1868.12	1874.227	6.107	1881.948	13.828	1872.172	4.052
PJ-1	225638	2726567	1886	31.85	1854.15	1843.934	-10.216	1833.321	-20.829	1838.313	-15.837
PJ-2	226438	2725767	1877	38.70	1838.30	1856.288	17.988	1848.489	10.189	1853.342	15.042
PJ-6	223141	2724595	1799	25.22	1774.02	1771.869	-2.151	1770.842	-3.178	1770.995	-3.025
PL-1	225049	2728848	1862	26.86	1835.14	1839.573	4.430	1829.427	-5.716	1830.016	-5.127
PL-2	225288	2728050	1857	52.86	1804.14	1840.450	36.307	1828.756	24.613	1831.520	27.377
RC-24	230527	2727218	1986	32.26	1953.74	1917.024	-36.716	1915.205	-38.535	1910.962	-42.778
RC-30	227897	2727979	1924	39.17	1884.83	1900.414	15.584	1885.607	0.777	1886.617	1.787
RC-40	230325	2728659	2003	181.22	1821.38	1906.309	84.929	1897.910	-76.530	1889.869	68.489
						RMS	39.619	RMS	39.101	RMS	34.609
						NRMS	22.0%	NRMS	21.7%	NRMS	19.2%
						Max	84.900	Max	93.909	Max	75.817
						Min	-2.151	Min	-0.740	Min	1.787

Coordenadas en sistema NAD27, Zona 14N

Pozo	X	Y	Z	Profundidad al nivel estático en Marzo de 2013 (m)	Elevación del nivel estático en Marzo de 2013 (msnm)	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
						Simulado	Residual	Simulado	Residual	Simulado	Residual
DW-23	230322	2727067	1979	78.08	1901.28	1863.991	-37.29	1885.804	-15.47	1847.292	-53.99
B02	228148	2725131	1910	30.35	1879.37	1886.134	6.76	1881.499	2.13	1886.096	6.73
B147	231231	2729346	2046	108.21	1937.37	1945.141	7.77	1922.351	-15.02	1905.626	-31.74
PL-1	225049	2728848	1864	27.97	1836.26	1839.53	3.27	1829.151	-7.11	1828.935	-7.33
PL-2	225288	2728050	1864	53.04	1811.03	1840.391	29.36	1828.716	17.69	1831.286	20.26
RC-24	230527	2727218	1986	32.29	1953.71	1901.043	-52.67	1899.353	-54.36	1875.242	-78.47
RC-30	227897	2727979	1924	47.62	1876.38	1896.163	19.78	1873.622	-2.76	1866.874	-9.51
TP1760	229656	2728233	1760	178.00	1582.00	1602.992	20.99	1574.583	-7.42	1602.868	20.87
PH-1	227884	2728377	1925	47.12	1877.68	1841.085	-36.60	1855.124	-22.56	1831.568	-46.11
PH-10	230410	2727972	1983	363.54	1619.64	1642.485	22.84	1598.293	-21.35	1630.244	10.60
PH-11	230549	2728201	1994	324.48	1669.47	1664.703	-4.77	1640.823	-28.65	1657.759	-11.71
PH-16	231621	2728161	2024	40.70	1983.68	1889.584	-94.10	1931.947	-51.74	1888.333	-95.35
PH-18	231704	2727777	2016	155.93	1859.98	1847.208	-12.77	1966.636	106.66	1935.524	75.54
PH-2	230779	2727931	1993	131.38	1861.32	1795.123	-66.20	1866.085	4.76	1852.081	-9.24
PH-28	227584	2728290	1917	39.61	1877.39	1891.801	14.41	1865.154	-12.24	1854.618	-22.78
PH-29	231215	2725761	2000	230.31	1769.76	1812.031	42.27	1818.62	48.86	1815.699	45.94
PH-3	228399	2729571	1964	315.82	1648.18	1692.49	44.31	1821.315	173.14	1645.648	-2.53
PH-35	229699	2726581	1965	146.98	1818.26	1890.294	72.03	1863.651	45.39	1821.139	2.88
PH-38	229931	2729820	2041	223.34	1817.81	1865.573	47.76	1833.317	15.50	1789.124	-28.69
PH-39	228594	2729645	1972	355.69	1616.66	1691.259	74.60	1813.514	196.85	1656.665	40.01
PH-41	230740	2728852	2022	351.69	1670.00	1661.489	-8.51	1705.361	35.36	1675.323	5.32

Pozo	X	Y	Z	Profundidad al nivel estático en Marzo de 2013 (m)	Elevación del nivel estático en Marzo de 2013 (msnm)	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
						Simulado	Residual	Simulado	Residual	Simulado	Residual
PH-43	230301	2728763	2004	339.88	1664.22	1664.155	-0.06	1682.333	18.12	1660.573	-3.64
PH-49	231819	2726176	2020	242.13	1778.23	1792.035	13.81	1790.184	11.96	1788.938	10.71
PH-50	231456	2726263	2015	236.95	1778.05	1814.03	35.98	1821.237	43.19	1819.165	41.12
PH-51	231067	2728901	2034	344.14	1689.69	1663.601	-26.09	1714.923	25.23	1680.526	-9.17
PH-54	230964	2728865	2028	351.05	1677.12	1643.273	-33.84	1698.938	21.82	1672.248	-4.87
PH-55	230959	2729067	2034	310.13	1723.51	1667.701	-55.81	1708.251	-15.26	1676.058	-47.45
PH-56	231418	2728561	2031	268.23	1763.19	1835.479	72.29	1760.458	-2.73	1722.556	-40.63
PH-58	231220	2728178	2010	302.90	1707.33	1713.201	5.88	1802.641	95.32	1760.451	53.13
PH-59	231621	2726566	2013	232.18	1780.53	1822.421	41.90	1835.976	55.45	1834.031	53.51
PH-6	228574	2728053	1942	139.78	1801.72	1873.408	71.69	1826.644	24.92	1793.302	-8.42
PH-60	231200	2728689	2031	296.79	1734.38	1656.629	-77.75	1722.885	-11.49	1688.744	-45.63
PH-61	231412	2728761	2020	252.40	1767.60	1717.994	-49.61	1730.455	-37.15	1703.388	-64.21
PH-63	230505	2729209	2028	350.55	1677.11	1686.503	9.39	1716.334	39.22	1679.282	2.17
PH-65	231217	2726564	2002	229.38	1772.62	1827.237	54.62	1842.19	69.57	1837.843	65.22
						RMS	44.234	RMS	58.293	RMS	39.828
						NRMS	11.01%	NRMS	14.61%	NRMS	9.92%
						Max	-94.098	Max	196.854	Max	-95.349
						Min	-0.06	Min	2.129	Min	2.172

Coordenadas en sistema NAD27, Zona 14N

Apéndice C

Artículo publicado

Hydrogeology Journal (2013)

Characterizing a fractured aquifer in Mexico using geological attributes related to open-pit groundwater

Enrique Herrera · Jaime Garfias

Abstract A multivariable analysis of the Rock Quality Designation (*RQD*) and its relation with the hydraulic conductivity of 17 dewatering wells in an open-pit mine (central Mexico) is presented as a tool for groundwater exploration in fractured aquifers. A solid model was constructed with the *RQD* data using three sizes for each grid cell and four interpolation methods. The inverse-distance method with a small grid gives the best results. The resulting *RQD* solid model was used to locate 22 pilot holes, on which an air-lift test was performed as a qualitative assessment of their usefulness. The results showed a lower water production (1.8l/s) in shale that has low alteration, whereas in highly altered shale, breccias, and intrusive rock, the flow rate was 3.9l/s. This implies an important relationship between the pilot-hole performance, the lithology, and the rock alteration, but it was also found that some fractures or faults, which cannot be detected clearly by the *RQD*, play an important role in the hydrodynamics of the aquifer. In conclusion, it is necessary to consider all available factors that can help to identify the hydrodynamic behavior of the aquifer because using only *RQD* data can lead to errors in prospecting for groundwater.

Keywords Fractured rocks · Groundwater exploration · Rock quality designation · Conceptual models · Mexico

Introduction

Most large open-pit mines intersect groundwater at some stage in their development. Dewatering then becomes essential to allow safe access for operators to extract the ore, have fewer wet blast-holes, maintain slope stability, reduce haulage costs, prevent contact of groundwater with

the ore (mainly iron sulfides) and oxygen to avoid the production of acid drainage, and in some cases, also to provide a water supply for different uses of the mine operations (camp, dust suppression, metallurgical process).

Most of the open-pit mines are typically made in hard rocks, which can constitute fractured aquifers. In these aquifers, structural features such as folds, faults, and fracture networks have the potential to significantly influence the regional-scale fluid flow (Surrete et al. 2008). The main problem for hydrogeologists is to detect these features. Despite its importance, groundwater flow through such structures is poorly understood (Gudmundsson 2000).

The tendency of groundwater exploration in fractured aquifers focuses on defining structural domains (Surrete et al. 2008; Scesi and Gattinoni 2009). However, when the aquifer has a limited number of features to be measured, because it is covered by alluvium or the rock is strongly folded rather than fractured, it is difficult to identify these features. Although permeability loss with increasing depth is a general trend in geologic formations (Jiang et al. 2010; Shingal and Gupta 1999), it is difficult to predict the hydrogeological behavior at depth of structures that are measured at the surface. On the other hand, another key issue is the difficulty of finding correlations between geometrical and hydraulic properties of a fractured formation (Berkowitz 2002). These difficulties have led to a high risk of failure in some locations, so that the success of a project relies upon the decision maker to make the right choice when weighing the cost effectiveness of various investigative techniques against the risk of drilling an unsuccessful borehole (Sander 2007). Predetermining the success of dewatering in the mines currently can be highly subjective.

Fortunately, most of the mines go through a feasibility stage, which usually incorporates an intense drilling campaign to characterize, classify, and quantify the mineral reserves. Typically, these boreholes are drilled using a diamond bit allowing a quantitative recovery of the core. The cores obtained are described by geologists, who include the Rock Quality Designation (*RQD*), a semi-quantitative index obtained directly from measurements or rock-core pieces used to predict ore hardness. This index was proposed by Deere (1964) and it is defined as the ratio of the recovered core more than 4 inches (about 10 cm) long and of good quality to the total drilled length,

Received: 27 March 2012 / Accepted: 16 April 2013
Published online: 26 May 2013

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

E. Herrera (✉) · J. Garfias
Faculty of Engineering (CIRA),
Autonomous University of the State of Mexico, Toluca, Mexico
e-mail: jeherrerass@gmail.com
Tel.: +52-842-4242700

J. Garfias
e-mail: jgarfias@uaemex.mx

and is expressed as a percentage. Although *RQD* is mainly used in assessing the geomechanical properties of the rock, it is also considered to be an important parameter in assessing relative permeability (Shingal and Gupta 1999). A low *RQD* could reflect a fractured or a faulted zone at depth, which may be representative of a permeable zone in the fractured rock given that large fractured zones are usually complex hydraulic features that are composed of several fractures (Poteri 2009).

Presently this characteristic has been given little attention in hydrogeological exploration, possibly caused by the trend in hydrogeology to focus on hydraulics and the solving of flow equations, rather than the geology and understanding and describing the rock structure, facies, and properties (de Marsily et al. 2005). This could lead to improper construction of conceptual models and to erroneous numerical models, because the conceptual-model problem makes model predictions inherently more uncertain (Bredehoeft 2005). As a result, the location of new pumping or dewatering wells in fractured aquifers can lead to considerable loss of money and time.

Because of the strategic importance of the water supply and dewatering in an open-pit mine, and because fractured aquifer systems are challenged by complex issues of heterogeneity and uncertainty, the main goal of this study is to assess the factors that control the hydrodynamic behavior of a fractured aquifer in an attempt to provide a tool based on the rock properties. The results not only demonstrate the utility of various investigational approaches to evaluate the global dynamics in an open-pit mine but also provide an insight to some of the factors that can be subsequently integrated with other characteristics to develop better conceptual models to improve the potential locations for successful dewatering wells.

Hydrogeological framework

Geographic setting of the study area

The study area is in the northeast part of the state of Zacatecas, Mexico, at the geographic coordinates of 101°38'38"–101°45'25" E longitude and 24°36'04"–24°41'12" N latitude with an elevation between 1,750 and 2,050 masl (m above sea level). The study area (44.4 km²) is in the Mazapil Basin (catchment area ~270 km²) and the main stream that drains the basin is the Arroyo Grande (Fig. 1). The most important towns near the area are Cedros and Mazapil, which had populations of 1,013 and 794 inhabitants, respectively, in 2010. The main economic activities in the area are agriculture, animal husbandry, and mining. The last one is a new blossoming activity because of the enormous geological potential of the area.

The area is semi-arid, with an average annual precipitation of about 400 mm. The greatest precipitation occurs from June to September and the least is in March. The average annual temperature is 12.5 °C, and the potential evaporation is 1,920 mm. These data were obtained from the Cedros and Mazapil meteorological

gauging stations. The predominant vegetation is xerophytic, which changes to forest in the upper parts of the surrounding mountain range.

Hydrogeology and geologic settings

The aquifer is unconfined at the flanks, becoming semiconfined closer to the center, in the pit area. This is formed by a sedimentary sequence, constituted mainly by shale with interbedded sandstone (Caracol formation), with a thickness about 900 m. The ore-deposit is located mainly in breccia and intrusive rock, which form part of a magmatic diatreme mineralized with sphalerite, pyrite, galena, quartz, and calcite. Derived from the thermal and chemical interaction between the host rock and the mineralizing fluids, mainly two types of alterations occur: pyrite-calcite (PC) and quartz-sericite-pyrite-calcite (QSPC).

Regarding tectonic efforts, the sedimentary sequence was deformed after sedimentation, forming synclines and anticlines in the sedimentary sequence. On the other hand, the tectonic changes after the formation of the ore deposit produced an overprint of northwestern- and northeastern-trending faults. These faults in combination with lithology have produced permeability heterogeneities, which directly affect groundwater flow.

Because of the presence of the open-pit mine in the study area, the hydrodynamic behavior of the aquifer has become important and is caused by the need for dewatering the pit and for a water supply for the metallurgic process. Thus, several pumping and dewatering wells and piezometers have been constructed with depths from 193 to 650 m and well yields from 2 to 47 l/s. The yields tend to decrease over time caused by the reduction of the water column in each well that was constructed to dewater the pit. The depths to the water table in the pit area before mining were 12 to 81 m, and currently are 49 to 206 m because of the dewatering to allow the extraction of ore.

The hydrodynamic behavior of the aquifer clearly shows a high level of hydrogeological complexity caused by the strong contrast in hydraulic properties between the high permeability fractures and the surrounding rock matrix of lower permeability, and also because of the permeability contrast between the different fracture types, which is characteristic of fractured aquifers (Tweed et al. 2005; Lemieux et al. 2006).

Methodology

The research approach includes the use of geological and hydrogeological data and patterns of structurally controlled fluid flow for use in regional characterization of a fractured bedrock aquifer. In order to integrate these data, a combined approach of statistical techniques of interpolation and synthesis of additional data are employed. The use of hydraulic properties and geological attributes should result, therefore, in more accurate characterization and quantification of regional groundwater resources for fractured rock aquifers.

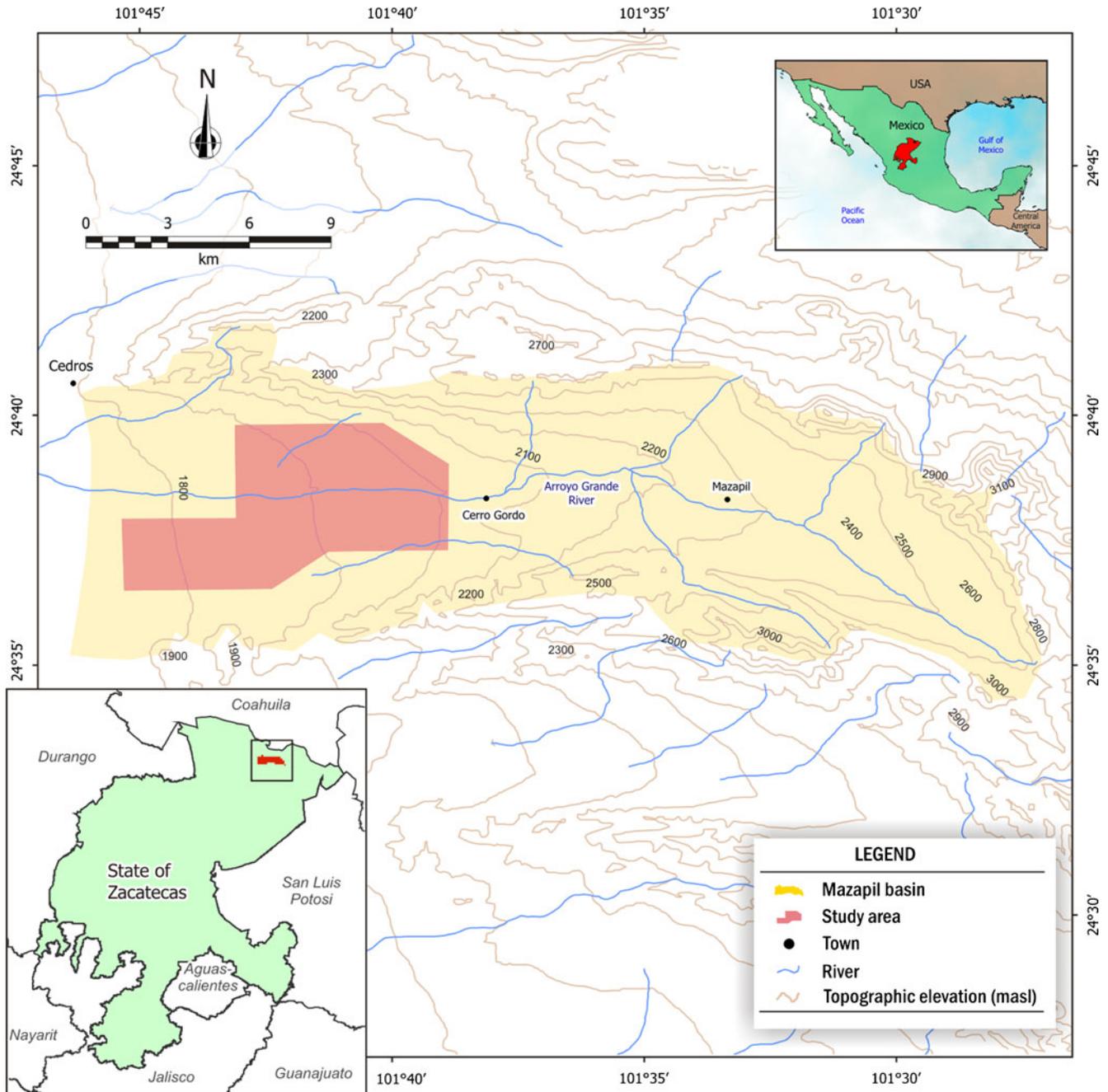


Fig. 1 Location map of the study area, in the state of Zacatecas, Mexico. The topographic elevation contours and the predominant surface streams are included, showing the shape of the *Mazapil Basin*

Determination of geological attributes

In the hydrogeology of mines a substantial challenge is to transform the abundant geological information, which usually focuses on mineral exploration, into hydrogeologically relevant data suitable for modeling purposes (Younger and Robins 2002). In the study reported here, this problem was addressed by using the pre-existing *RQD*, lithology and alteration data for the available boreholes, which were obtained by the exploration geologists for mineral prospecting. In the present study, a total of 823 drill cores were used to construct the three-dimensional (3D) solid models, with depths ranging from 400 to

1,422 m, drilled either vertically or inclined 60° mainly to the north and south. Thus, *RQD* data were obtained as a percentage at intervals of 3-m depth, with a 100 % equivalent for a rock with a high quality and 0 % for a zone with poor rock quality. Lithology and alteration data were obtained descriptively, at different intervals, so that the data in this study were transformed into quantitative data for the analysis process.

An index proposed by Bieniawski (1976) commonly used for rock mass classification in underground excavations is Rock Mass Rating (*RMR*). This index includes: spacing, conditions, and orientation of discontinuities;

compressive strength of rock material; *RQD*; and groundwater conditions. Although this index is more complete than just *RQD* for the analysis, in this study some of the information required to determine the *RMR* was not available, so it has to be obtained directly from the cores, which in most of the cases were discarded or are not available, since the geologists tend to store only the cores with mineral interest. In addition, it was considered impractical to try to determine the *RMR* at intervals of less than 10 m in the 823 boreholes, considering that the main idea of this study is to present a practical way to convert the geologic information available in all mines to useful hydrogeological information. Thus, it was decided to analyze geologic attributes as *RQD*, lithology and alteration related to the hydraulic properties of the aquifer because this information is usually easy to obtain in most of the mines.

Estimation of hydraulic properties

Data from 17 short-term pumping tests performed from 2007 to 2011 were collected and used to obtain hydraulic conductivity values for the aquifer. Figure 2 displays the location of the 17 dewatering wells used to determine the hydraulic properties of the aquifer. As illustrated in this graph, the 17 wells used are located within and around the pit. Some of the wells were eliminated to allow the excavation of the pit, and others were never used because they presented a low performance (< 4 l/s).

Hydraulic data obtained from the pumping tests were analyzed using established methods, e.g., Theis with Jacob correction, Neuman-Boulton, double porosity, Hanstush with storage, Papadopulos and Copper, and Moench. Information for interpretation of the pumping test data can be obtained from numerous hydrogeology

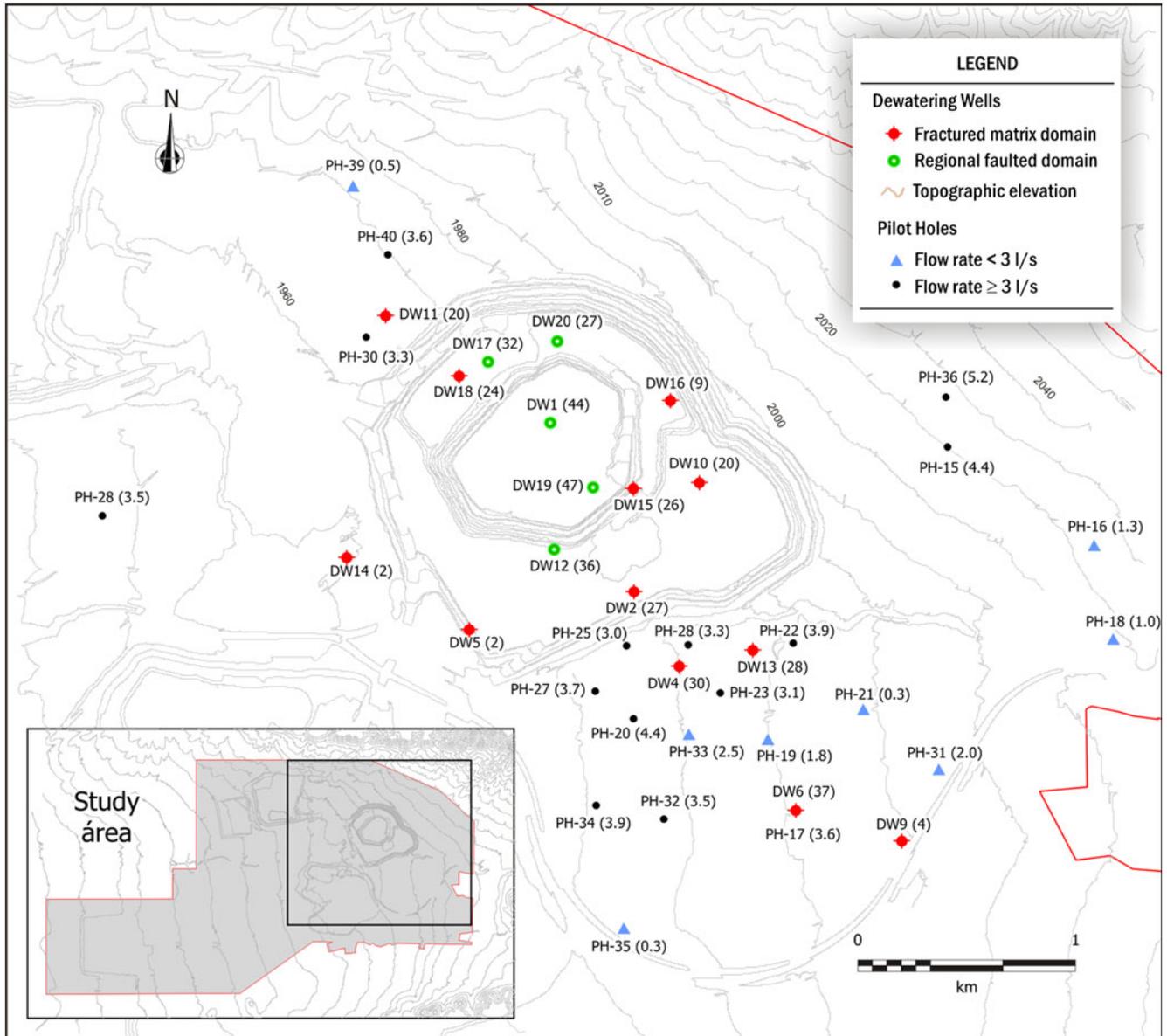


Fig. 2 Locations of the dewatering wells used to optimize the *RQD* solid model and the pilot holes installed to test its applicability. The initial flow rate of the dewatering wells and the flow rate obtained in the air-lift test in the pilot holes are indicated *in parenthesis*. In addition, the domain to which each well belongs is indicated

texts (e.g., Freeze and Cherry 1979; Kruseman and de Ridder 1990; Fetter 1994; Domenico and Schwartz 1990; Driscoll 1987). Because the aquifer behaves as unconfined to the north and south of the pit, and semiconfined in the center of the pit, the hydraulic conductivity for each well was obtained as an average of the methods which gave the best fit to the data. Estimated well capacities based on pumping tests are summarized in Table 1.

Solid model construction

The solid models were constructed using RockWorks 15, which allows modeling of inclined and vertical boreholes, since several drill cores were drilled inclined at 60°. The main advantages of RockWorks 15 are that it is a low-cost and easy to use software for use in geology, hydrogeology, oil exploration, etc. Nonetheless, the main interpolation algorithm for 3D solid models is inverse distance weighting, and kriging is not included. Furthermore, when there is a lot of information, some processes such as interpolation and display of images can be slow. A flowchart for the modeling process is shown in Fig. 3, which shows all steps followed to obtain the optimized solid models. This process was repeated using three different cells sizes and four interpolation methods, which produced a total of 12 solid models.

Once the drill cores data were introduced to the software, three grid dimensions were defined. The first grid was defined with cells of 250×250×50 m (10,584 cells), in order to speed the initial tests. A second grid size was defined with cells of 100×100×20 m (163,800 nodes) considering that the minimum distance between wells is about 128 m (wells DW17 and DW18). Finally, a third grid size was used reducing the previous grid to half size, i.e. 50×50×10 m (1,301,040 cells). After defining the grid dimensions, solid models were created

using inverse distance (anisotropic and weighting) and directional weighting (30° and 150° azimuth) interpolation methods.

For this study, the closest point was not used since this is best suited for data that are not gradational, and in this case a gradational change was expected between high and low *RQD* zones. On the other hand, distance to point was not used because this method assigns values to the nodes equal to the distance to the closest control point, so it was considered that this method is not useful to represent the heterogeneity of the aquifer. Thus, inverse distance-anisotropic mode was used since this method uses the closest point in each 90° sector around the node. The isotropy mode was not used since this is useful when modeling uniformly distributed data, which is not the case of this study. Also, the weighting mode was used because it weights the data point differently based on their horizontal and vertical positioning relative to the node, in order to test if there is a hydrogeological relation to vertical fracturing, because faults in the area tend to be from 75 to 90°. Finally, directional weighting was also used to weight the models with the direction of the main faults in the area, which are mostly 30 and 150° azimuth. All the solid models were created using the project dimensions defined, without constraints (to obtain a complete model with no voids), without filtering (in order to obtain a model for the entire project dimensions including all the lower and higher values), and without additional options such as tilting, warping, and smoothing.

Solid model optimization process

The *RQD* solid model was considered as the basis of this study, since its relation with the hydraulic conductivity is based on the assumption that damaged zones and core zones of faults are the primary flow paths for contemporary flow, and that they can also be

Table 1 Hydraulic data of the 17 wells used to correlate with *RQD* weighted values extracted at different elevations from the solid models. Some wells were eliminated to allow excavation of the pit, and others were abandoned because of poor performance and are being used as observation wells

Well ID	Well depth (m)	Pumping test (month/year)	Flow rate (l/s)	Total drawdown (m)	Transmissivity (m ² /d)	Hydraulic conductivity (m/d)	Weighted <i>RQD</i>
DW1	202	Jul-07	44	20	377.9	0.756	4.9
DW2	202	Sep-07	27	36	53.5	0.107	3.7
DW4	201	Nov-07	30	59	55.5	0.111	3.7
DW5	193	Dec-07	2	42	4.4	0.007	7.4
DW6	201	Dec-07	37	22	160.1	0.320	6.1
DW9	249	Aug-08	4	42	5.8	0.012	6.4
DW10	400	Nov-09	20	252	9.1	0.018	4.7
DW11	401	Feb-09	20	203	1.7	0.003	6.4
DW12	447	Nov-10	36	48	60	0.120	4.5
DW13	650	Jul-11	28	164	7.4	0.015	5.2
DW14	601	Dec-10	2	439	0.1	0.001	7.3
DW15	526	Sep-10	26	106	32.2	0.064	4.4
DW16	389	Dec-10	9	130	4.1	0.008	7.0
DW17	503	Oct-11	32	8	273	0.546	7.1
DW18	503	Feb-11	24	89	3.4	0.007	7.3
DW19	565	Nov-11	47	58	58.1	0.116	3.8
DW20	515	Aug-11	27	35	95.4	0.191	6.8

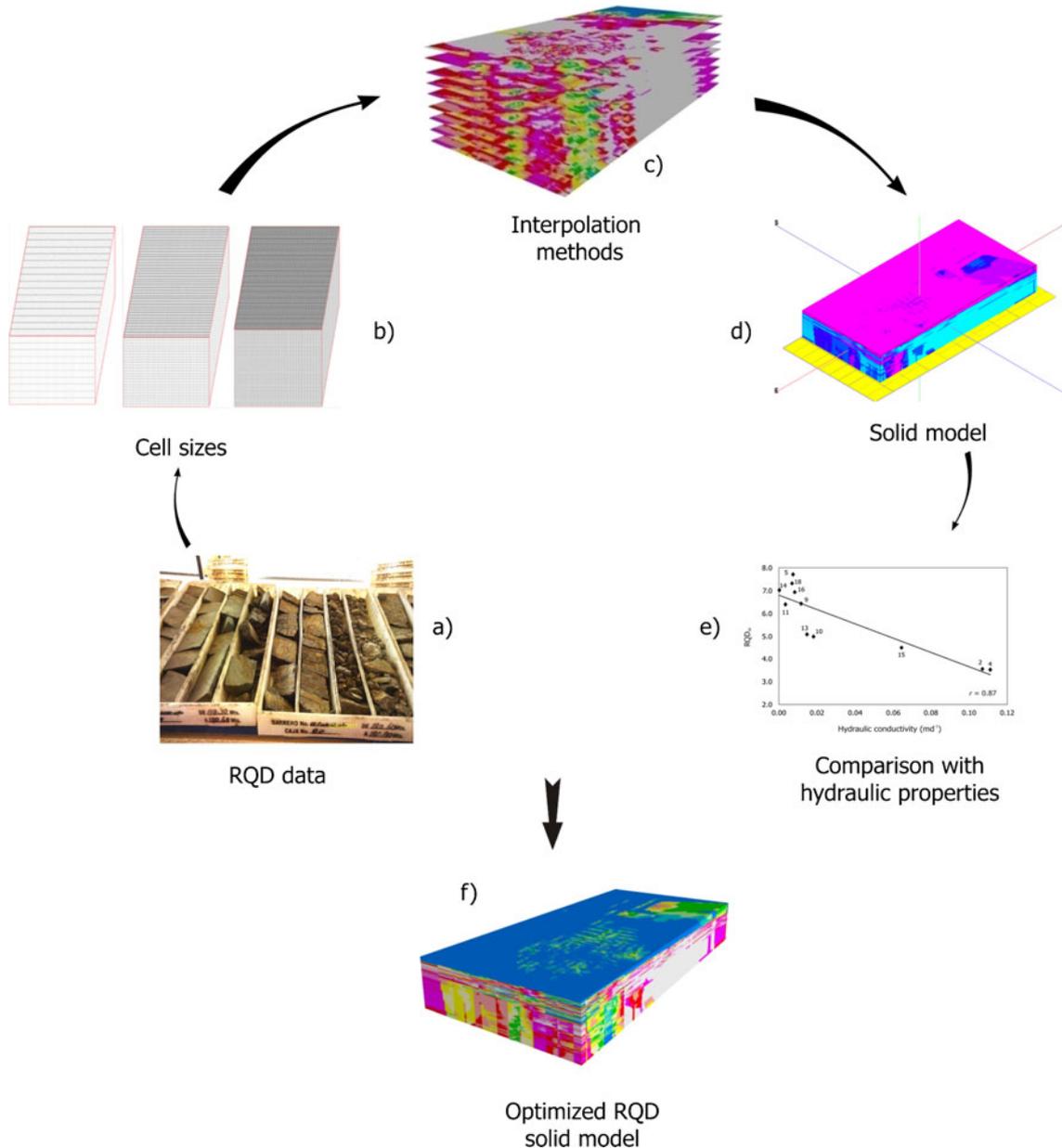


Fig. 3 Flowchart of the modeling process to obtain the *RQD* solid model: Generation of a *RQD* data base (a); Definition of cell size (b); Selection of an interpolation method (c); Interpolation and obtaining of a *RQD* solid model (d); Comparison between the solid model results at each well with its respective hydraulic conductivity (e); Definition of the optimized *RQD* solid model (f). This process was repeated (from a to e), using three different cells sizes and four interpolation methods

conduits or barriers to groundwater flow (Caine and Forster 1999; Rogers 2003). These damaged zones can be related to a decrease in the *RQD*, so the basic principle is that the permeability of the rock has an inverse correlation with this characteristic (*RQD*).

Once the solid models were completed, horizontal slices were obtained at the smaller intervals of 50, 20 and 10 masl which were allowed by the software according with the dimensions of the different grid cell sizes initially defined. These slices were exported to a shape-file format to integrate them into a geographic information system (GIS) tool to correlate the results with the performance of the wells and with other

useful features, such as geology, hydrology, structural geology, and satellite images, which has been used in other hydrogeological studies (e.g., Shaban et al. 2006). An example of a slice obtained is shown in Fig. 4 where *RQD* values are indicated as percentages with a color scale.

To allow the comparison between the *RQD* models obtained and the hydraulic data from the 17 wells, it was necessary to define a single *RQD* value for each well using the models generated. Thus, the *RQD* values at each well obtained from the slices extracted at different elevations were weighted considering only those slices located within the saturated zone, since the hydraulic

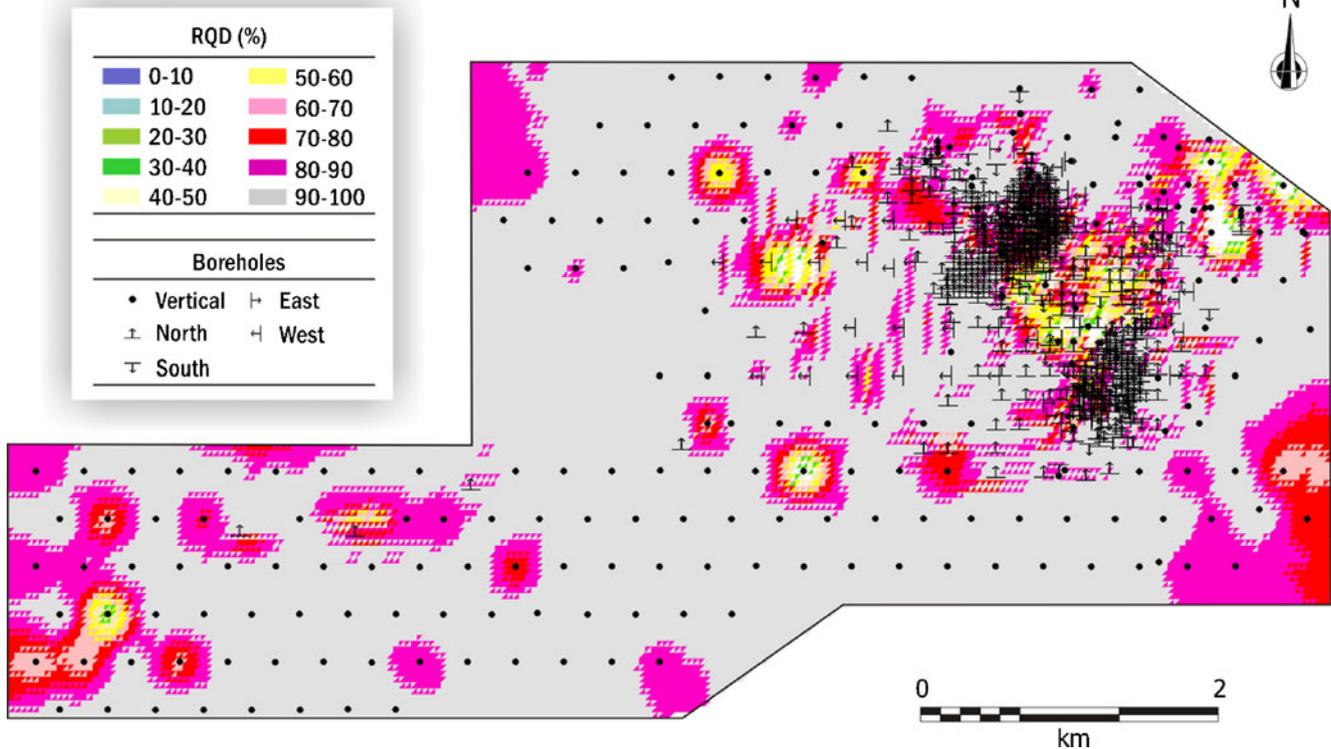


Fig. 4 Distribution of the RQD solid model at the slice located at 1,800 masl. The color scale is shown at intervals of each 10 % of the RQD varying from 0 (associated with a high hydraulic conductivity) to 100 % (associated with a low hydraulic conductivity). In the legend, 0–10 means 0 to less than 10. Also, the locations of the boreholes used for the model are shown, including the direction of the inclined boreholes

conductivity obtained from the pumping tests is a single value which corresponds to the hydraulics of the saturated zone at each well. Since deeper wells could have higher RQD values, it was necessary to weight each well by dividing the total RQD by the saturated thickness of the well as

$$RQD_w = \frac{\sum (RQD_1 + RQD_2 + RQD_3 + \dots + RQD_n)}{b_s}, \quad (1)$$

where RQD_w is the weighted RQD value of the well, RQD_1 , RQD_2 , RQD_3 , and RQD_n are the RQD values at different elevations in the well that correspond to a horizontal slice, and b_s is the saturated thickness of the well.

Using the three grid dimensions and the four varieties of interpolation methods, 12 RQD solid models were obtained. For each well, a RQD value was obtained and correlated with hydraulic conductivity using scatterplots. This process was made for each model obtained with the aim to define the optimum grid cell size and interpolation method. The grid dimensions used were $250 \times 250 \times 50$ m, $100 \times 100 \times 20$ m, and $50 \times 50 \times 10$ m. An additional attempt was made reducing the cell sizes to $25 \times 25 \times 5$ m (16,286,400 cells), since it could be expected that a smaller grid cell could result in a better fit, but it was noted that there is a limitation of the software when

extracting the horizontal slices, each 5 m, for the evaluation of the RQD_w at each well, so this attempt was discarded for the analysis. As shown in Fig. 5, the results were not promising because the correlation coefficient (r) was < 0.11 . Therefore, the results showed that, in general, the scale is not the main factor that produces a poor correlation (Fig. 5).

In trying to find the cause of the poor correlation, an evaluation of the evolution of the dynamic levels in the active dewatering wells was made using data from June to October 2011. Figure 6 outlines the hydrodynamic evolution of 8 active wells in the open pit that indicate the presence of two domains. It is evident from this graph that wells with the higher hydraulic conductivity, more than 0.115 m/d (wells DW-12, 17, 19, and 20), also present higher dynamic levels, which vary from 1,650 to 1,750 masl (Fig. 6). On the other hand, wells with lower hydraulic conductivity (DW-13, 14, 15, and 18) are also related to deeper dynamic levels. Considering this, the wells were then divided into domain 1 (fractured matrix domain) and domain 2 (regional faulted domain).

Optimized model application

The optimized RQD solid model was used to locate, drill, and test 22 pilot holes that would be used to find water sources and for dewatering the pit. The zones with the

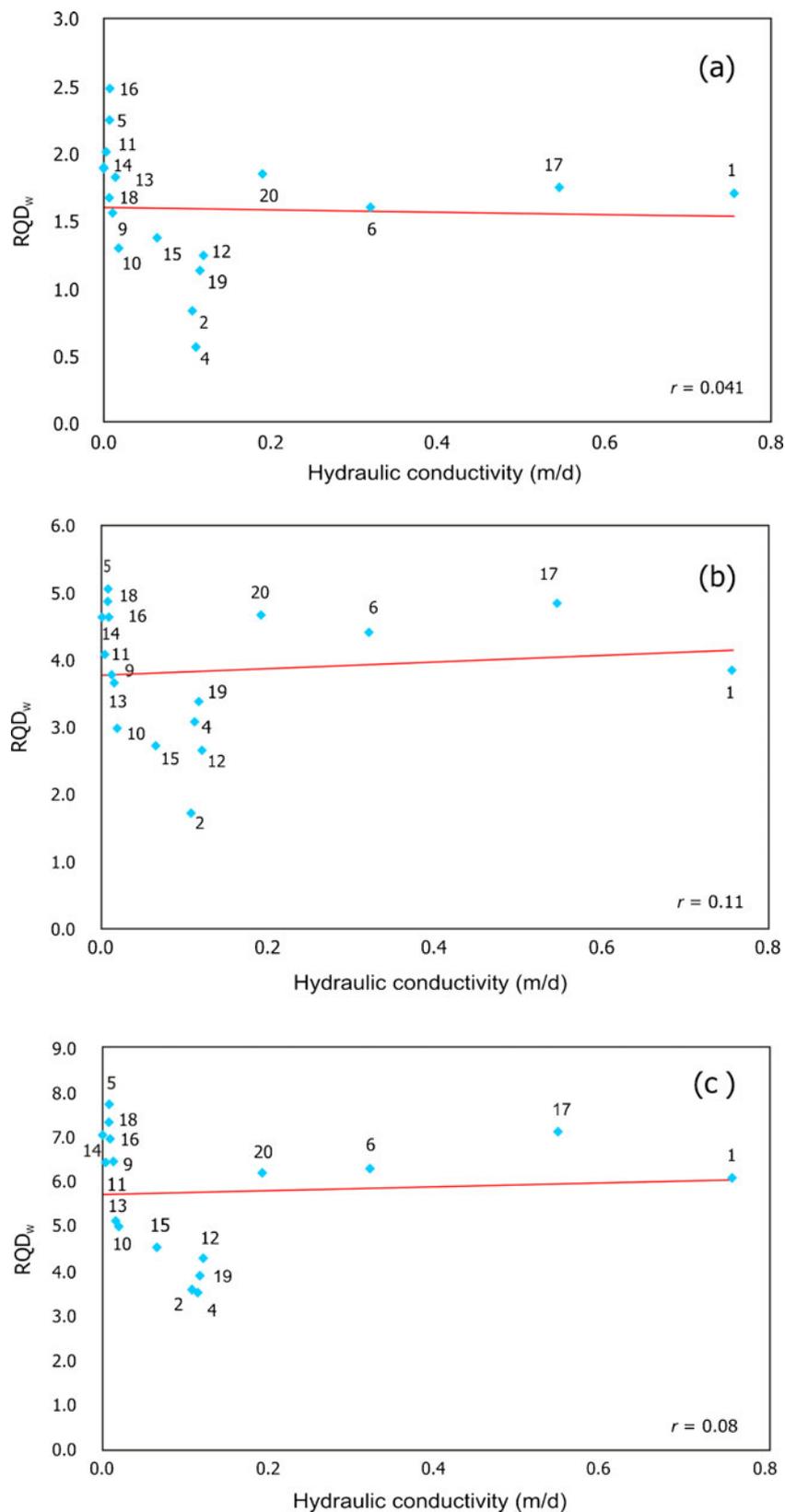


Fig. 5 Relationship between the RQD_w (weighted) data, obtained from the RQD solid model, and the hydraulic conductivity of the wells (numbered) for the three grid cell-sizes, calculated for the whole study area not accounting for the hydrogeologic domain specificity. The grid sizes used are: **a** $250 \times 250 \times 50$ m, **b** $100 \times 100 \times 20$ m, **c** $50 \times 50 \times 10$ m. A poor correlation is shown, but also it is clear that the cell size is not the main factor that affects the correlation

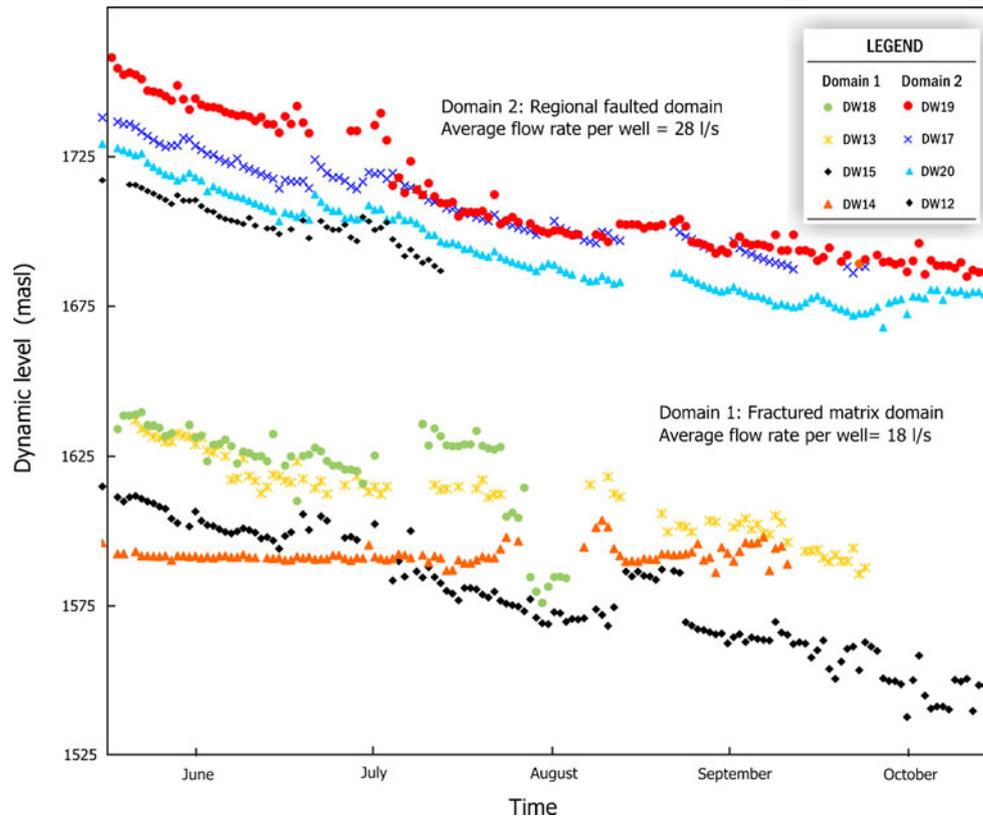


Fig. 6 Hydrodynamic evolution of active wells from June 2011 to October 2011 in the open pit. The presence of two domains is seen, representing the fractured matrix domain (*domain 1*) and the regional faulted domain (*domain 2*)

lower *RQD*, according with the optimized solid model obtained (related to surface drainage and regional faulting), were chosen for the locations of the pilot holes. However, some of the pilot holes were drilled in zones with a high *RQD* where there could be an intersect with some potential faults inferred in geologic maps, which may not have been clearly identified by the *RQD* solid model.

The pilot holes were drilled to depths ranging from 383 to 603 m with a drilling diameter of 5.5 in. (14 cm), using an air-reverse circulation rig. The pilot holes were tested qualitatively by the air-lift method which has been used to estimate the capacity of wells in fractured aquifers (e.g., Henriksen and Braathen 2006). According to Sterret (2007), this test is usually used to determine an approximation of the performance of the well, and because it is less expensive than a conventional pumping test. Pilot holes and its geological attributes are shown in Table 2.

Integration of geological attributes

A spatial analysis combining two geological attributes was made using additional solid models constructed in the same way as the *RQD* optimized model, one for alteration and the second for lithology, since it was noted that there was some correlation with these attributes and the results obtained with the air-lift tests in the pilot holes. The additional data were entered into the same databases used for the *RQD* model, but

quantitative values for alteration and lithology were defined. For alteration, which can be unaltered, weak, moderate, and high, a range from 1 to 4 was defined; and for lithology a value was assigned from 1 to 4 for

Table 2 Dominant lithology, flow rate and geologic properties obtained in the 22 pilot holes installed using the *RQD* solid model

Pilot hole	<i>RQD</i> model	Flow rate (l/s)	Dominant lithology	Alteration
PH15	4.5	4.4	Shale	QSPC
PH16	3.6	0.3	Shale	–
PH17	6.8	3.6	Shale	PC
PH18	4.3	1.0	Shale	–
PH19	7.6	1.8	Breccia, intrusive	?
PH20	5.5	4.4	Breccia	QSPC
PH21	6.8	0.3	Shale	PC
PH22	5.6	3.9	Breccia	QSPC
PH23	5.6	3.1	Breccia, intrusive	?
PH25	3.8	3.0	Breccia	QSPC
PH26	3.4	3.3	Shale	QSPC
PH27	3.1	3.7	Shale	QSPC
PH28	3.0	3.5	Shale	QSPC
PH30	7.2	3.3	Shale	QSPC
PH31	5.8	2.0	Shale	–
PH32	5.5	3.5	Breccia, intrusive	?
PH33	4.8	2.5	Breccia, intrusive	?
PH34	5.7	3.9	Shale	QSPC
PH35	5.8	0.3	Shale	PC
PH36	3.8	5.2	Shale	QSPC
PH39	6.8	0.5	Shale	–
PH40	6.2	3.6	Shale	QSPC

PC pyrite-calcite, QSPC quartz-sericite-pyrite-calcite, Q unaltered

intrusive rock, breccia, shale, and for the sedimentary sequences (mainly formed by limestone). Both new models were interpolated using the inverse distance method with the anisotropic mode, since it was proved that this method provides the best correlation with the *RQD* data (Table 3). The same grid dimensions (50×50×10 m) and the same considerations were used in the optimized *RQD* model. Considering the three solid models represented by the *RQD* data, and alteration of the rocks and lithology, an overlapping graph was developed associated with the hydraulic conductivity; this was used to study the relationship among these data. Finally, a conceptual model was developed integrating potential hydraulic properties for characterization and quantification of regional groundwater resources in the open pit.

Results and discussion

Analysis of hydraulic properties

The pumping test analysis results show that hydraulic conductivity values vary from 0.001 to 0.756 m/d. Higher values are located within the pit, mainly in the center and southeast in a trend NW–SE, while lower values could be found outside the pit. Wells included in domain 1 (DW-2, 4, 5, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, and 18) present the lower values of hydraulic conductivity, which vary from 0.008 to 0.111 m/d, with a geometric mean of 0.014 m/d. Wells defined in domain 2 (DW-1, 6, 12, 17, 19 and 20) present the higher values ranging from 0.0116 to 0.756 m/d, with a geometric mean of 0.266 m/d. All these wells are located to the center of the pit, with the exception of DW6.

RQD solid model results

Figure 7 displays the relationship between the *RQD_w* solid model and the hydraulic conductivity of the wells for three grid cell sizes, accounting for the fractured matrix domain (domain 1) and the regional faulted domain (domain 2). For these domains, the coefficient of correlation (*r*) shows a much better relationship between *RQD_w* and the hydraulic conductivity, improving further using the finest mesh (Fig. 7e, f). It appears that the wells of domain 2 incorporate fracture permeability that the *RQD* alone cannot clearly detect.

Regarding the interpolation methods used, it was found that the interpolation process is relatively rapid with inverse distance (anisotropic) and inverse distance weighting (using a 3 to 1 relation in weight between horizontal and vertical), whereas for directional weighting with 30° azimuth, and 150° azimuth, the process took several tens of hours.

The optimization process showed that the inverse distance-anisotropic interpolation method presented the best correlation with the domains previously defined. The lowest correlation was for the inverse distance weighting method, while for directional weighting, the correlation was better using a 30° azimuth, but not as

good as was obtained with the inverse-distance, anisotropic-filtering method (Table 3). Thus, this interpolation method as well as the third grid cell size (50-m length, 50-m width, and 10-m height) was adopted for the optimized solid model used for the hydrogeological analysis.

Analysis of the pilot holes installed

The analysis of the air-lift test results performed in the pilot holes showed variable results related with the *RQD* solid model. Most of the pilot holes resulted in a good performance (more than 3 l/s), except for PH19, PH21, PH31, PH33, PH35, and PH39 located in zones with a high *RQD*, and PH16 and PH18 located to the east of the area in zones with a low *RQD*. To explain the low flow rate of these pilot holes, the rock cuttings were examined. The wells that were screened in zones with a high *RQD* did not intersect important faults or fractures. Conversely, it was found that those pilot holes drilled in zones with a low *RQD* (PH16 and PH18) were screened into incompetent rock (Caracol Formation).

This result is consistent with Apaydin (2010), who found that the permeability of the faults is influenced, among other features, by geologic properties such as the nature of the faulted rock. In strong competent rocks, faulting will tend to create zones of higher permeability, whereas in weak, incompetent rocks, the faults will tend to be filled with broken or crushed material (Masset and Loew 2010; Henriksen and Braathen 2006), which could impede water movement. Hence, Fig. 8 shows a low correlation coefficient (*r*=0.24) for the *RQD* model with the flow rate from the air-lift test in the pilot holes.

However, in detail, three hydrogeologic domains could be separated for which the correlations between the *RQD_w* and the air-lift tests seem to be better, but it is hard to find a common factor to support a separation thereof. This could imply a deeper analysis of the air-lift method, which in this case was used just in a qualitative way. Nevertheless, a relationship between the airlift flow rate, lithology, and alteration of the rock was found because most of the pilot holes associated with unaltered shale have low flow rates (below 2 l/s), whereas the higher values (2 to 5.2 l/s) are related to altered shale and breccia and intrusive rock.

Hydraulic potential related to geological attributes

For the analysis of the three geological attributes together, it was necessary to generalize the appearance of alteration and lithology models. Figure 9 shows the *RQD*, lithology and alteration for a slice located at 1,700 masl (about 300-m depth), including the hydraulic conductivity distribution. The *RQD* values are indicated as percentages with a color scale and the alteration zones are defined by lines, dividing zones with high alteration, moderate to low alteration, and unaltered rock. For the lithology, almost all the area is formed by shale, but there are some zones composed of breccia and intrusive rock, which form the

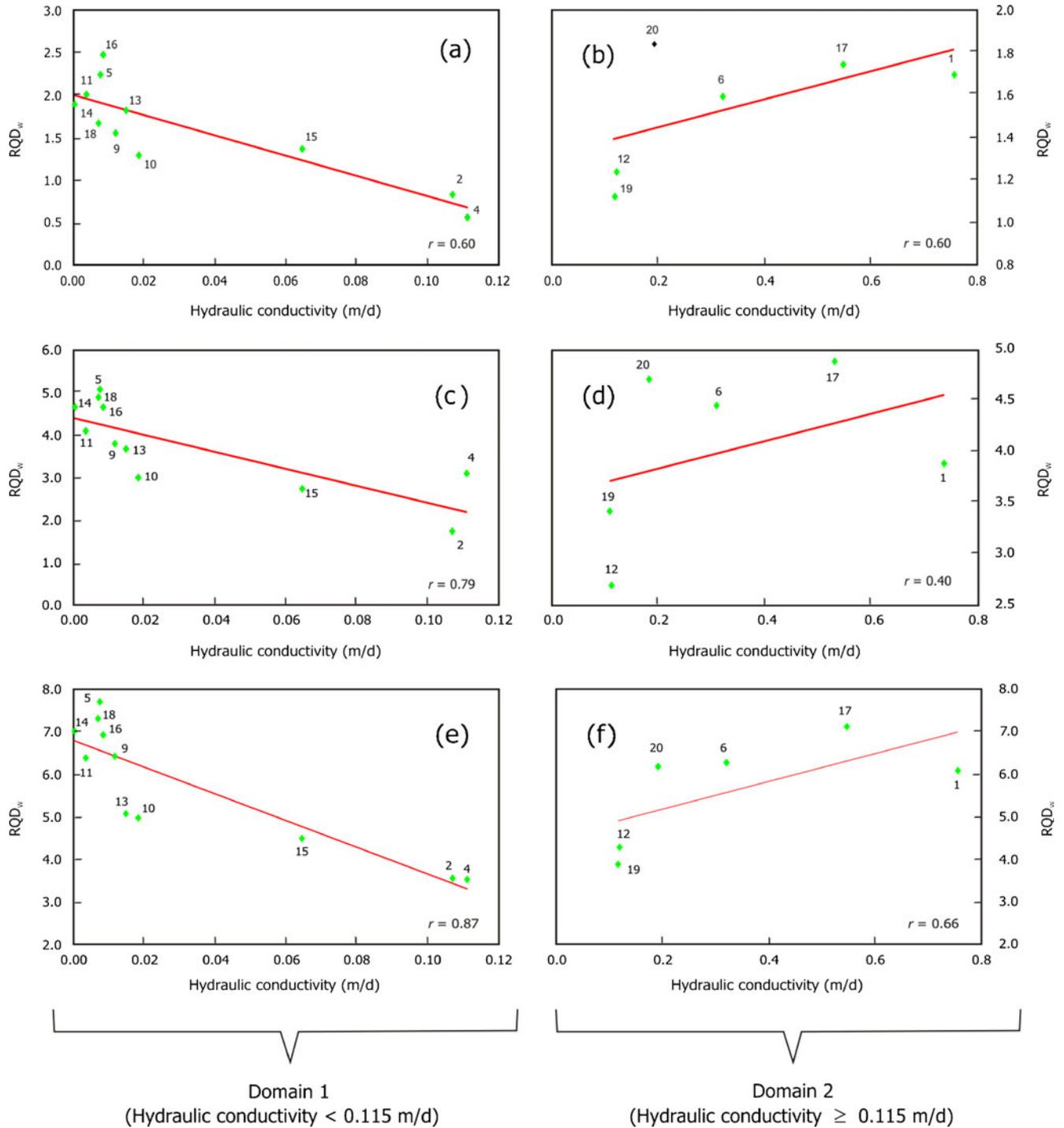


Fig. 7 a–f Relationship between the RQD_w solid model and the hydraulic conductivity of the wells (numbered) for the three grid cell sizes, accounting for the hydrogeologic domain specificity. *Left panel: domain 1, Right panel: domain 2*

diatremes where the ore is mainly located. These zones were indicated with a dotted line in Fig. 9.

It was found that most of the wells with higher hydraulic conductivity (above 0.115 m/d) are located in highly altered breccia and intrusive rock, with RQD_w values that are both high and low, with the exception of wells DW6 and DW12, which are located in shale. However, well DW12 is located in a zone with low RQD and high alteration in comparison to DW6, which is

in a zone with high RQD and moderate to low alteration. Wells with intermediate values of hydraulic conductivity (from 0.0151 to 0.115 m/d) are located in highly altered shale, with low RQD_w values. The wells with the lowest hydraulic conductivity values (below 0.015 m/d) are located in shale with a high RQD_w and moderate to low alteration, with the exception of DW13 and DW18 located in intrusive rock and breccia with a high RQD_w . The correlations found are consistent with Jiang et al. (2010),

Table 3 Comparison between interpolation methods used to create the *RQD* solid model using wells data divided into *domain 1* and *domain 2*. The grid size used for this evaluation was the finest mesh ($50 \times 50 \times 10$ m)

Method of interpolation	Coefficient of correlation (<i>r</i>)	
	Domain 1	Domain 2
Inverse distance-anisotropic	0.87	0.66
Inverse distance weighting, 3 to 1 relation vertical to horizontal	0.62	0.17
Directional weighting, 30° azimuth	0.79	0.30
Directional weighting, 130° azimuth	0.70	0.37

who noted that those factors and others would lead to heterogeneous permeability.

Figure 10 shows a schematic diagram for the applied methodology, which basically considers hydraulic data related to the *RQD* data, lithology and alteration of the rocks. Taking into consideration this diagram, hydraulic conductivity is related to the *RQD* and the rock competence, so that a low *RQD* associated with competent rock (breccias, intrusive) could present higher hydraulic conductivity values compared to a *RQD* associated with an incompetent rock (shale), which can have a significantly higher value if quartz-sericite-pyrite-calcite (QSPC) alteration is present (Fig. 10). Therefore, wells in intrusive rock, breccia, or shale (with a certain degree of alteration) have good hydraulic conductivity (for this study, more than 0.015 m/d), whereas wells located in unaltered shale tend to have a low performance. The wells placed in rock with a high *RQD*, according to the model, can have either high or low hydraulic conductivity, e.g., wells DW17 and DW18, which have almost the same geological attributes. This means that some wells, like DW17, could be related to open and well-connected faults or fractures that the *RQD* model was not able to clearly detect.

According to Berkowitz (2002), genetically, domain 1 could be related to fractures which form from uplift, excess fluid pressure, and thermal and chemical actions, whereas domain 2 could be related to faults, since they are generated by large-scale tectonic events. So, fault networks typically consist of two (usually) or three distinct families of oriented fractures. In contrast, a fracture network can consist of one to an indistinguishable number of fracture families. Furthermore, those domains could be named as hydrostructural domains, according to Surrete et al. (2008).

Domain 1: fractured matrix domain. This domain shows a good response with the *RQD* solid model, improving as the cell size becomes smaller (Fig. 7). For this study, these wells are located mainly in unaltered to moderately altered shale and in some cases in intrusive rock and breccias with a high *RQD* (Fig. 9). Most of the wells included in this domain tend to have low hydraulic conductivity, with a geometric mean of 0.014 m/d, and a dynamic level deeper than the wells of domain 2 (Fig. 6).

Domain 2: regional faulted domain. Wells included in domain 2 have the higher hydraulic conductivity (geometric mean in this study was 0.266 m/d) and therefore the shallower drawdowns. According to the initial hypothesis, these wells should have lower hydraulic conductivity (or lower *RQD*), which means that they are much better than the *RQD* model can estimate. In fact, the relation with the *RQD* of this domain is reverse compared with domain 1 (Fig. 7). This could mean that a fault zone could develop high permeability in a competent rock, i.e., with high *RQD*. Therefore, this domain was related to regional faults, implying higher hydraulic conductivity derived from open and well-connected faults and fractures, with a NE–SW

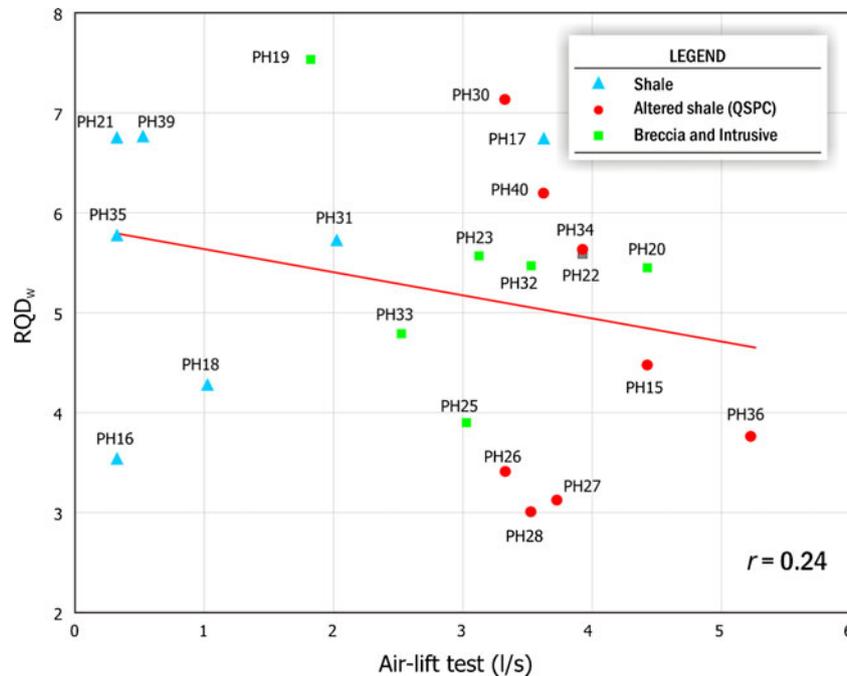


Fig. 8 Scatterplot showing the correlation between the *RQD_w* data obtained from the model and the flow rate from the air-lift test in the pilot holes, including the lithology and alteration of the rock

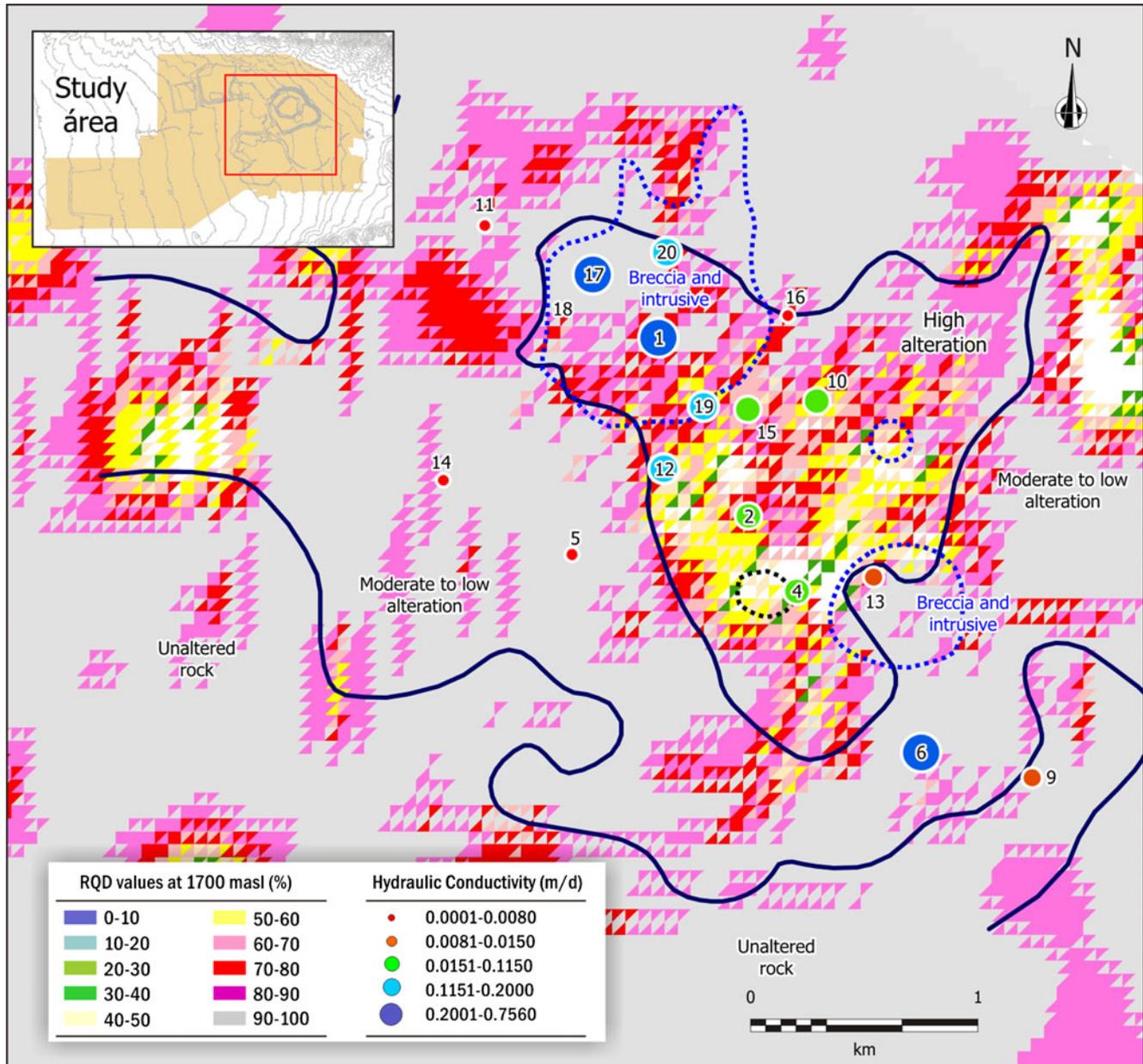


Fig. 9 Overlap of the *RQD*, alteration, and lithology models, related with hydraulic conductivity of the wells at the 1,700-masl slice. *Solid blue lines* divide the degree of alteration; the *dotted line* represents the contact between breccias and intrusive with shale. It is clear that the hydraulic conductivity tends to decrease when the *RQD* is high and when the alteration of the rocks is low. Considering the lithology, most of the wells located in breccia and intrusive rock tend to have the higher hydraulic conductivity. See Table 1 for well identification corresponding to *numbers* in the main map

trend and to a lesser proportion, a NW–SE trend. Those faults were not clearly detected by the *RQD* model, so they were inferred from the satellite image of the area, which is a useful strategy to identify large-scale features given that it is a cost effective, nondestructive, and noninvasive method that can be used for semiarid regions (Zeeb et al. 2010) and for improving modeling (Brunner et al. 2007).

For this study, the hydraulic conductivity of each well shows the domain to which it belongs. This implies that those wells placed in the fractured-matrix domain are mainly associated with a rock type that has a degree of fracturing (measured quantitatively by the *RQD*) and a

degree of alteration, having deeper dynamic levels than the other domain (wells DW-2, 4, 5, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, and 18). Those wells associated with the regional-faulted domain have shallower dynamic levels caused by a high hydraulic conductivity of the fault zone (wells DW-1, 6, 12, 17, 19, and 20).

Hydrogeological conceptual model

A simplified conceptual model of the hydrogeological system of the study area, including the pit area, is shown

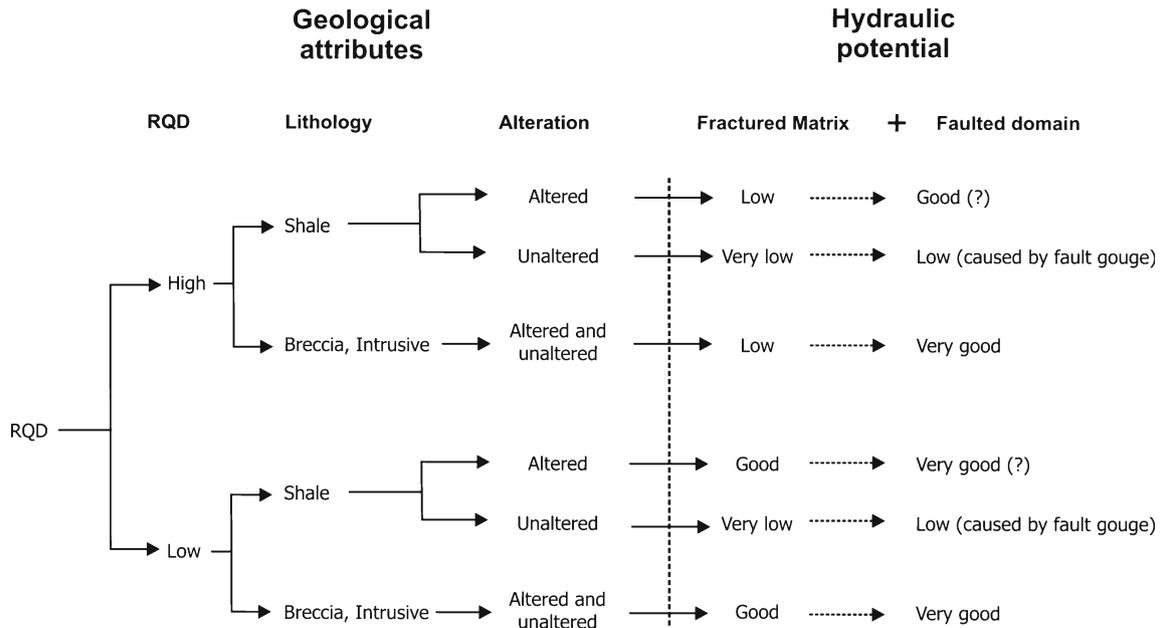


Fig. 10 Schematic diagram showing the applied methodology, which considers the hydraulic data of the wells related to the *RQD* data, *lithology*, and *alteration* of the rocks. A fourth associated factor is the intersection with open faults and fractures that are not clearly detected by the *RQD*

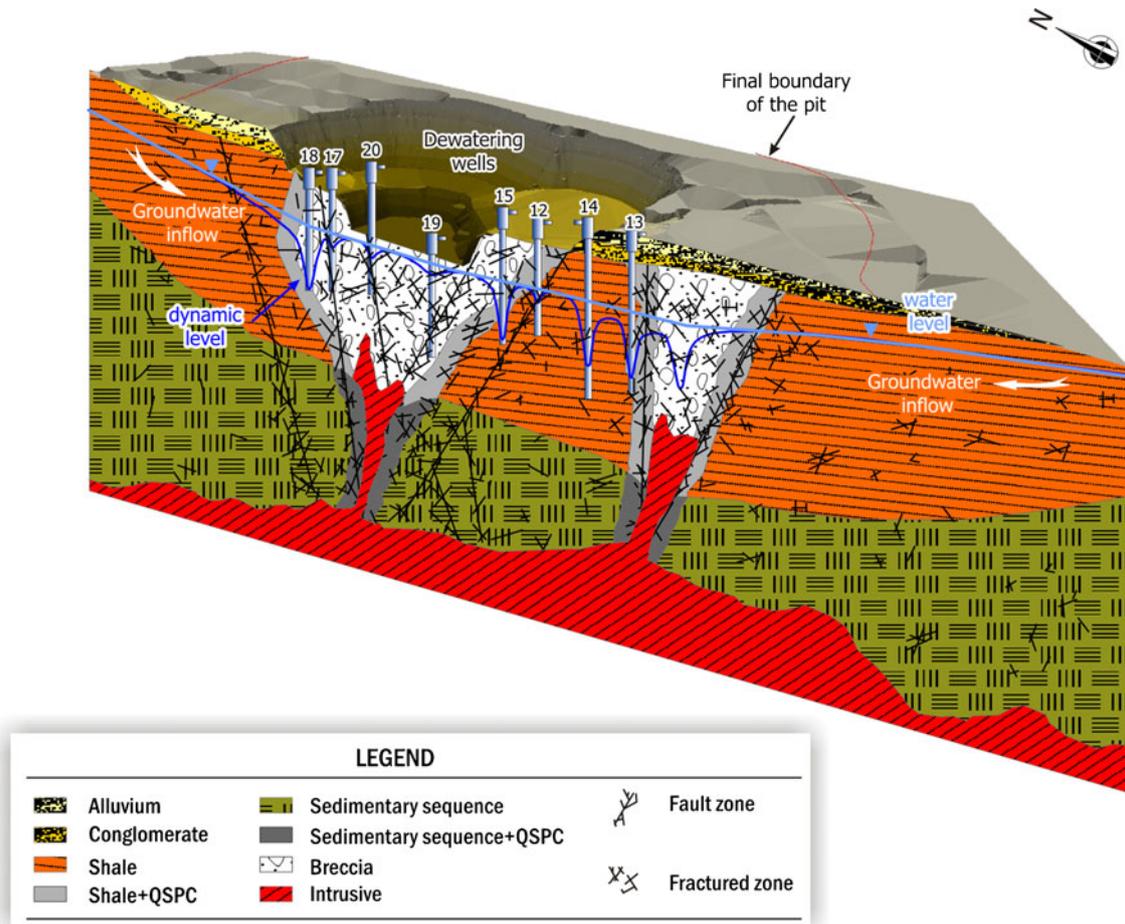


Fig. 11 Simplified hydrogeological conceptual model for the study area. The current shape of the pit and its final boundary are shown. Also shown is the regional groundwater flow caused by all dewatering wells, which have different dynamic levels because of their intersection with the fault zones

in Fig. 11. The general shapes of the diatremes that form the ore bodies in the area are illustrated. Diatremes are breccia-filled volcanic pipes, generally with a conical shape, formed by gaseous explosions (Laznicka 2006; Moon et al. 2006). These explosions were caused by intrusive material going upward through zones of weakness (faults or fractures) that, upon contact with the water table and because of the accumulation of gases, produced the explosions that fragmented the host rock, forming breccias of various types. The mineralizing fluids and the heat exchange between the host rock and the intrusive material generated different types of alteration; one of them is the quartz-sericite-pyrite-calcite alteration.

As a consequence, the aquifer is formed with a wide variety of lithology, and further altered by tectonic processes that have affected the region, which have led to large contrasts in the hydraulic conductivity mainly caused by the different responses of the rocks to the tectonic effort. The competent rocks are favorable for groundwater circulation because they tend to break (breccia, intrusive, and altered sedimentary rocks), whereas the incompetent rocks tend to fold (shale and the underlying sedimentary sequence). Even if the latter are broken, they generate fault gouge (clay) that drastically decreases the ability to be a conduit for groundwater flow.

The direction of groundwater flow in the aquifer is toward the center of the pit, because of the induction produced by the concentration of the dewatering wells. The sources of the recharge to the aquifer are in the foothill areas, mainly going through fault zones, and to a lesser proportion through the alluvial and conglomerate deposits. The fluctuation of the water level in the aquifer is considered as a product of the differences in the hydraulic conductivity of the geological stratigraphy of the aquifer system.

Conclusions

A conceptual model of the ore body related to groundwater occurrence and geological attributes was developed to locate wells for a water supply and dewatering at an open-pit mine. The optimization process of the *RQD* solid model shows that the finer grid has a better adjustment with the data, and with the inverse-distance, anisotropic-filtering interpolation method. The comparison of the results shows that the hydrodynamic behavior in the area has a response derived from the resulting permeability of the intersection of all faults and fractures, so that the anisotropic-filtering method provides the best fit rather than using just a fracture-strike direction. However, the present study cannot conclude that this scale and this interpolation method will work in other locations. Further analysis should be made to determine the best methods that define each particular area.

Because of the high heterogeneity that characterizes fractured aquifers, it is necessary to consider all factors that can help to identify the hydrodynamic behavior. This study shows that using only the *RQD* data can lead to

errors in groundwater prospecting. The *RQD* should be used as a tool in combination with other features of the aquifer according to the characteristics of the area and with the information available, e.g., lithology, regional, and local structural trends, piezometry, and the alteration of the rocks. This integration of information can be useful to form usable hydrogeological conceptual models and consequently to characterize fractured aquifers using information of geological attributes for groundwater prospecting.

Although the results of this study should be used with caution when predicting the hydrodynamic behavior of a fractured aquifer, they provide valuable insights into flow processes and identified the key characteristics that control the global flow dynamics in these environments. For this reason, determining the factors and mechanisms that control the onset of fracture flow in natural systems will be vitally important for predicting groundwater flow and water-quality impacts in fractured soil environments. Further quantification of this and other relationships is necessary for improved understanding of water supply and dewatering in an open-pit mine.

Acknowledgements Financial support was provided by GoldCorp, and the authors wish to thank the management body, especially B. Buhl who allowed the hydrogeological exploration. Without their permission, this paper could not have been finalized. The authors are also grateful to the Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) and the Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología de México (CONACYT) for supporting this research. The authors wish to thank A. Coulam, G. Aramburo, L. López, and A. Perez for their thoughtful comments, and especially G. Ainsworth and E. Chen. Also, they appreciate valuable comments from Dr. A. Davis for his constructive suggestions to improve this paper and to Dr. Ellis Glazier for editing this English-language text. The authors would also like to thank the reviewers for their comments and suggestions, which improved this article.

References

- Apaydin A (2010) Relation of tectonic structure to groundwater flow in the Beypazari region, NW Anatolia, Turkey. *Hydrogeol J* 18:1343–1356
- Berkowitz B (2002) Characterizing flow and transport in fractured geological media: a review. *Adv Water Resour* 25:861–884
- Bieniawski ZT (1976) Rock mass classification in rock engineering. In: Hoek E, Kaiser P, Bawden W (eds) Support of underground excavations in hard rock. Mining Research Directorate and Universities Research Incentive Fund, Akron, OH
- Bredehoeft J (2005) The conceptualization problem: surprise. *Hydrogeol J* 13:37–46
- Brunner P, Hendricks F, Kgotlhang L, Bauer-Gottwein P, Kinzelbach W (2007) How can remote sensing contribute in groundwater modeling? *Hydrogeol J* 15:5–18
- Caine JS, Forster CB (1999) Fault zone architecture and fluid flow: insights from field data and numerical modeling. In: Apaydin A (ed) Relation of tectonic structure to groundwater flow in the Beypazari region, NW Anatolia, Turkey. *Hydrogeol J* 18:1343–1356
- de Marsily G, Delay F, Gonçalves J, Renard P, Teles V, Violette S (2005) Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeol J* 13:161–183
- Deere D (1964) Technical description of rock cores for engineering purposes. In: US Army Corps of Engineers (ed) Rock Foundations, Washington DC

- Domenico P, Schwartz F (1990) Physical and chemical hydrogeology. Wiley, Chichester, UK, 824 pp
- Driscoll F (1987) Groundwater and wells. Johnson Division, St. Paul, MN, 1089 pp
- Fetter C (1994) Applied hydrogeology, 3rd edn. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 691 pp
- Freeze R, Cherry J (1979) Groundwater. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ, 604 pp
- Gudmundsson A (2000) Active fault zones and groundwater flow. *Geophys Res Lett* 27(18):2993–2996
- Henriksen H, Braathen A (2006) Effects of fracture lineaments and in-situ rock stresses on groundwater flow in hard rocks: a case study from Sunnfjord, western Norway. *Hydrogeol J* 14:444–461
- Jiang XW, Wang XS, Wan L (2010) Semi-empirical equation for the systematic decrease in permeability with depth in porous and fractured media. *Hydrogeol J* 18:839–850
- Kruseman G, de Ridder N (1990) Analysis and evaluation of pumping test data, 2nd edn. International Institute for Land Reclamation and Improvements, Wageningen, The Netherlands, 377 pp
- Laznicka P (2006) Giant metallic deposits. Springer, Heidelberg, 732 pp
- Lemieux J, Therrien R, Kirkwood D (2006) Small scale study of groundwater flow in a fractured carbonate-rock aquifer at the St-Eustache quarry, Québec, Canada. *Hydrogeol J* 14:603–612
- Masset O, Loew S (2010) Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland. *Hydrogeol J* 18:863–891
- Moon C, Whateley M, Evans A (2006) Introduction to mineral exploration, 2nd edn. Blackwell, Oxford, UK, 481 pp
- Poteri A (2009) Retention properties of flow paths in fractured rock. *Hydrogeol J* 17:1081–1092
- Rogers S (2003) Critical stress-related permeability in fractured rocks. *Geol Soc London Spec Publ* 209:7–16
- Sander P (2007) Lineaments in groundwater exploration: a review of applications and limitations. *Hydrogeol J* 15:71–74
- Scesi L, Gattinoni P (2009) Water circulation in rocks. Springer, Heidelberg, 165 pp
- Shaban A, Khawlie M, Abdallah C (2006) Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeol J* 14:433–443
- Shingal B, Gupta R (1999) Applied hydrogeology of fractured rocks. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 400 pp
- Sterret R (2007) Groundwater and wells. Johnson Screens, New Brighton, MN
- Surrete M, Allen D, Journeay M (2008) Regional evaluation of hydraulic properties in variably fractured rock using a hydrostructural domain approach. *Hydrogeol J* 16:11–30
- Tweed S, Weaver T, Cartwright I (2005) Distinguishing groundwater flow paths in different fractured-rock aquifers using groundwater chemistry: Dandenong Ranges, southeast Australia. *Hydrogeol J* 13:771–786
- Younger P, Robins N (2002) Challenges in the characterization and prediction of the hydrogeology and geochemistry of mined ground. *Geol Soc London Spec Publ* 198:1–16
- Zeeb C, Göckus D, Bons P, Al Ajmi H, Rausch R, Blum P (2010) Fracture flow modeling based on satellite images of the Wajid Sandstone, Saudi Arabia. *Hydrogeol J* 18:1699–1712