

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**MODELACION HIDROGEOLOGICA DE UN SISTEMA GEOTERMAL ANDINO.
APLICACIÓN EN CAMPO GEOTERMICO EL TATIO
II REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
CIENCIAS MENCION GEOLOGIA**

JUAN CRISTÓBAL DÍAZ MOURGUES

**PROFESOR GUÍA:
PAULO HERRERA RICCI**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DOLORINDA DANIELE
SASKIA ROELS**

**SANTIAGO DE CHILE
2017**

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE:** Magíster en Ciencias Mención Geología
POR: Juan Cristóbal Díaz Mourgues
FECHA: 29/08/2017
PROFESOR GUIA: Paulo Herrera Ricci

**MODELACION HIDROGEOLOGICA DE UN SISTEMA GEOTERMAL ANDINO.
APLICACIÓN EN SISTEMA GEOTERMICO EL TATIO
II REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

La existencia de un sistema geotermal requiere, aparte de una fuente de calor, que existan unidades geológicas permeables que constituyan acuíferos o reservorios y una recarga de agua adecuada al sistema. En ese sentido es fundamental conocer y estudiar los aspectos hidrogeológicos en los sistemas geotermales, en particular la interacción entre las aguas subterráneas y el gradiente térmico, de forma de anticipar el comportamiento de un sistema geotermal ante posibles escenarios de explotación y recarga.

La motivación del presente trabajo de investigación radica en caracterizar la dinámica de las aguas subterráneas y modelar numéricamente los flujos y el transporte de calor en un sistema geotermal andino de alta entalpía. Esto, con el objetivo de contribuir al desarrollo creciente de la energía geotérmica en el país y por el potencial que esta representa. En particular, el trabajo se enfoca en el sistema geotérmico de El Tatio, ubicado en la Región de Antofagasta.

Como hipótesis de trabajo se planteó que dicho sistema geotérmico es modelable numéricamente a través de un enfoque de flujo multifase no isothermal asumiendo un medio poroso equivalente, con permeabilidades consistentes con el tipo de roca y discontinuidades que conforman los acuíferos, permitiendo reproducir los datos registrados de temperatura y presión en el sistema. A partir de la recopilación y análisis de antecedentes hidrológicos, hidrogeológicos, topográficos y de estudios de exploración geológica y geoquímica, se elaboró el modelo conceptual del sistema, el cual constituyó la base para el desarrollo de la modelación numérica.

Para la construcción del modelo numérico se utilizó: el software GMS (Groundwater Modeling System) como herramienta de creación de la grilla numérica, Microsoft Excel para el procesamiento de datos, y TOUGH2 para la resolución numérica del problema. El modelo fue posteriormente calibrado tanto en régimen permanente como en régimen transiente y luego fue sometido a un análisis de sensibilidad de los principales parámetros que condicionan el comportamiento del sistema.

Los resultados indican que el modelo calibrado en régimen permanente reproduce en forma razonable los datos de temperatura y presión observados en los pozos existentes del sistema geotermal El Tatio. Esto indica que el enfoque basado en medios porosos equivalentes permite representar adecuadamente el comportamiento de un sistema cuya dinámica de las aguas subterráneas está dominada fundamentalmente por permeabilidades de tipo secundaria.

El modelo calibrado permite además estudiar las respuestas del sistema ante potenciales escenarios de explotación, aunque la validez de estos resultados queda sujeta a las posibles mejoras en la calibración del régimen transiente del sistema.

*A mis hijos
María Ignacia y José Cristóbal*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a Raúl Demangel y a Ernesto Menchaca, quienes me otorgaron las facilidades para poder compatibilizar los estudios con el trabajo.

Por otra parte, quiero agradecer a mi familia, en especial a mi señora María Alejandra, quien fue un apoyo fundamental durante todo este proceso. Además agradecer a mi mamá y a mi hermana, por estar siempre pendiente de mis avances y a Pablo, que aunque ya no se encuentre físicamente entre nosotros, se que hubiese estado muy contento de poder compartir conmigo el final de esta etapa..

Por último, quiero agradecer a los profesores de mi comisión. A la profesora Linda Daniele y a Saskia Roels, por sus valiosas observaciones y comentarios al informe, y en especial, al profesor Paulo Herrera, quien creyó en mi y me dio la confianza para planificar y desarrollar un estudio acorde a mis intereses. Además agradecer sus gestiones con el Departamento de Ingeniería Civil para el financiamiento parcial de una breve estadía en Berkeley, California, lo que me permitió profundizar en el conocimiento y manejo del software TOUGH2 y en los avances relacionados con modelos acoplados de flujo y transporte en medios porosos y fracturados.

**MODELACION HIDROGEOLOGICA DE UN SISTEMA GEOTERMAL ANDINO.
APLICACIÓN EN CAMPO GEOTERMICO EL TATIO
II REGIÓN DE ANTOFAGASTA**

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Generalidades.....	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivos generales	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Hipótesis de trabajo.....	2
1.4	Metodología general y actividades realizadas	3
2.	ESTADO DEL ARTE/ MARCO TEORICO	6
2.1	Revisión de antecedentes	6
2.2	Marco teórico	9
2.2.1	Historia.....	9
2.2.2	Estudios actuales	10
2.2.3	Transporte de flujo y calor en medios porosos	11
2.2.4	Permeabilidades en medios porosos y fracturados.....	12
3.	MODELO CONCEPTUAL.....	14
3.1	Marco geológico	14
3.2	Exploración mediante pozos	16
3.2.1	Ubicación y características de los pozos.....	16
3.2.2	Estratigrafía de pozos.....	17
3.2.3	Perfiles de temperatura.....	19
3.2.4	Perfiles de presión.....	21
3.3	Hidrogeología	23
3.4	Hidrogeoquímica.....	27
3.5	Balance hídrico	30
3.5.1	Antecedentes hidrometeorológicos	30
3.5.2	Análisis de precipitaciones en la zona de estudio	32
3.5.3	Análisis de caudales en la zona de estudio.....	34
3.5.4	Estimación de la recarga	35
3.6	Fuente de calor	39
3.7	Exploración geofísica.....	39
3.8	Resumen del modelo conceptual	39
4.	VISITA A TERRENO	42
4.1	Reconocimiento general de la zona	42
4.2	Identificación de pozos	44
4.3	Muestreo de parámetros fisicoquímicos	46

5.	CONSTRUCCIÓN MODELO NUMERICO.....	48
5.1	Metodología de construcción del modelo numérico.....	48
5.2	Construcción grilla.....	48
5.3	Procesamiento de datos para entrada TOUGH2	51
5.4	Condiciones iniciales	51
5.5	Condiciones de borde.....	51
5.6	Proceso de pruebas y obtención de régimen permanente del modelo	56
6.	CALIBRACION DEL MODELO	58
6.1	Parámetros cuantitativos y cualitativos de calibración	58
6.2	Calibración en régimen permanente	59
6.2.1	Datos y criterios utilizados en la calibración	59
6.2.2	Resultados de la calibración.....	59
6.3	Calibración en régimen transiente	65
6.3.1	Datos y criterios utilizados en la calibración	65
6.3.2	Criterios utilizados en la calibración.....	69
6.3.3	Resultados de la calibración en régimen transiente	74
7.	ANALISIS DE SENSIBILIDAD	78
7.1	Régimen permanente	78
7.2	Régimen transiente.....	81
8.	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	82
8.1	Antecedentes de producción de pozos existentes	82
8.2	Escenario de sustentabilidad ambiental	83
8.3	Escenario de sustentabilidad de producción	92
9.	DISCUSION DE RESULTADOS Y LIMITACIONES DEL MODELO	102
10.	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	104
11.	BIBLIOGRAFIA	106

ANEXOS

A PERFILES GEOLOGICOS

B ANALISIS DE PRECIPITACIONES Y REGISTROS DE CAUDALES

C REGISTROS HIDROGEOQUIMICOS

D CONSTRUCCIÓN DEL MODELO Y PARÁMETROS DE MODELACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La existencia de unidades geológicas permeables es una de las condiciones necesarias para el desarrollo de un sistema geotermal. Estas unidades geológicas, que pueden constituir acuíferos o reservorios, requieren además de una recarga de agua adecuada y una fuente de calor para la existencia del sistema. Considerando lo anterior, resulta fundamental analizar la interacción entre las aguas subterráneas y las temperaturas en profundidad, de forma de anticipar el comportamiento de un sistema geotermal ante posibles escenarios de explotación y recarga.

En Chile, la primera central construida corresponde a Cerro Pabellón ubicada en la II Región, (cuya operación se inició recientemente) y destacan los avances en el proyecto de Tolhuaca (IX Región).

Uno de los sistemas geotermales más estudiado corresponde al Tatio, ubicado en la Región de Antofagasta, a aproximadamente 120 km al este de la ciudad de Calama (Ver Figura 1.1). Durante la década de los 70 se efectuó una campaña exploratoria por parte de CORFO y Naciones Unidas (Lahsen, 1975), en el sector de los geysers del Tatio, descubriéndose un potencial geotérmico de importancia. Este sistema geotermal constituye el foco del presente trabajo de investigación debido al avance que tuvo en su etapa de exploración y a la cantidad de información que se posee.

Figura 1.1.- Ubicación general de la zona de estudio



Fuente: Imagen Google Earth

Dado el interés creciente por el desarrollo de la energía geotérmica en el país y por el potencial que esta representa, la motivación principal de este estudio radica en comprender el comportamiento de un sistema geotermal andino de alta entalpía (sistema controlado por un ambiente tectónico de convergencia de placas, con rango de temperatura de 150 a 400 °C) a partir de un trabajo de investigación enfocado en la modelación numérica de flujos multifase y transporte de calor.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

Caracterizar la dinámica de las aguas subterráneas y modelar numéricamente los flujos y el transporte de calor en el sistema geotermal El Tatio, considerado como un sistema geotermal andino de alta entalpía.

1.2.2 Objetivos específicos

Se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar y comprender en términos cualitativos y cuantitativos el funcionamiento del sistema geotermal El Tatio a partir de diversos escenarios de modelación, mediante un enfoque de modelación numérica de flujo multifase no isotermal.
- Calibrar un modelo en régimen natural y permanente del sistema geotermal El Tatio de forma de reproducir los perfiles de temperatura registrados durante la perforación de 13 pozos.
- Calibrar un modelo en régimen transiente con el objetivo de analizar la respuesta del sistema ante diversos escenarios de explotación.
- Estudiar la recarga meteórica y analizar los efectos de transporte de calor por conducción y convección en el sistema geotermal en estudio.
- Sentar bases para futuros trabajos enfocados en la modelación numérica de sistemas geotermales, introduciendo e incorporando herramientas de ingeniería de reservorios, estableciendo ventajas y limitaciones.

1.3 Hipótesis de trabajo

La dinámica de flujo de aguas subterráneas en medios rocosos se produce fundamentalmente debido a la permeabilidad secundaria asociada a la presencia de discontinuidades y/o estructuras como fallas, diaclasas y fracturas. La permeabilidad primaria, asociada a la matriz en un medio fracturado es en general bastante menor a la permeabilidad secundaria, por lo que el movimiento del fluido a una escala local se dará por vías preferenciales cuyas características son difíciles de determinar. No obstante lo anterior, a una escala regional o de cuenca, se acostumbra asumir que el medio rocoso se comporta como un medio poroso equivalente con bloques cuyas permeabilidades reflejen adecuadamente el comportamiento hidráulico del flujo en el sistema.

Por otra parte, el transporte de calor en el subsuelo puede ser del tipo conductivo o convectivo, siendo predominante y necesario en los sistemas geotermales explotables el transporte de calor por convección debido a la presencia de acuíferos permeables. A su vez, el transporte de calor por convección puede deberse exclusivamente a la dinámica del flujo generada por diferencias de densidad (convección libre) o por diferencia de cotas piezométricas (presión + energía potencial) derivada de fuerzas inducidas por topografía (convección forzada) (Domenico y Schwartz, 1997).

Considerando lo anterior, la hipótesis de trabajo consiste en señalar, que el sistema geotermal El Tatio es un sistema constituido en rocas fracturadas que es modelable numéricamente a través de un enfoque de flujo multifase no isotermal asumiendo un medio poroso equivalente, con permeabilidades calibradas a partir de observaciones existentes que conforman los acuíferos, permitiendo reproducir los datos registrados de temperatura y presión en el sistema. Además se plantea que el sistema geotermal está dominado por un transporte de calor del tipo convectivo mixto, en donde el transporte por convección libre tiene mayor injerencia que el transporte por convección forzada.

1.4 Metodología general y actividades realizadas

A continuación se describe en líneas generales la metodología empleada para cumplir con los objetivos de la tesis de investigación y las actividades realizadas durante el desarrollo del trabajo. Las etapas en las cuales se dividió el trabajo de investigación se resumen a continuación:

- a) Marco teórico y estado del arte.
- b) Recopilación y análisis de antecedentes.
- c) Construcción del modelo conceptual.
- d) Visita a terreno.
- e) Construcción y calibración del modelo numérico.
- f) Análisis de sensibilidad.
- g) Simulación del sistema.
- h) Discusión de resultados y limitaciones del modelo.

a) Marco teórico y estado del arte :

Se realizó una completa revisión bibliográfica del tema propuesto incorporando tópicos tales como:

- Importancia de la hidrogeología en los sistemas geotermales.
- Parámetros hidrogeológicos y de conductividad térmica de medios rocosos.
- Ecuaciones que rigen el transporte de flujo multifase y calor en medios porosos.
- Extensión de la ley de Darcy para flujos multifase.
- Rol de las fracturas en la hidrogeología de los sistemas geotermales.
- Enfoques de modelación numérica de flujo y calor en sistemas geotermales.

El marco teórico en conjunto con el estado de arte se presenta en el Capítulo 2.

b) Recopilación de antecedentes del sistema geotermal en estudio:

Se recopilaron antecedentes del sistema geotermal en lo que concierne a los siguientes aspectos.

- Geología y geomorfología
- Informes de perforación y pruebas de pozos
- Antecedentes hidrológicos
- Antecedentes hidroquímicos
- Unidades hidrogeológicas
- Fuente de calor.

La revisión de antecedentes se presenta en el Capítulo 2.

c) Construcción de modelo conceptual

La elaboración de un modelo conceptual es fundamental para la posterior modelación numérica de un sistema hidrogeológico o hidrotermal. Considerando esto, se recopiló toda la información existente del sistema en estudio de forma de elaborar un modelo conceptual que represente gráficamente la geometría del sistema considerando la topografía de superficie, geología, unidades hidrogeológicas principales y sus contactos, pozos existentes y extensión del sector a modelar.

Además se determinó el balance hídrico del sistema estimando la recarga y descarga, para lo cual se utilizaron registros hidrometeorológicos de la zona de estudio. Para una mejor comprensión de la dinámica de las aguas subterráneas en el sistema se utilizó la interpretación de datos hidrogeoquímicos existentes, incluyendo estudios de análisis isotópicos para determinar el origen de la recarga.

Por otra parte, a partir de la información de la geología, pruebas de pozos y bibliografía se determinaron rangos para las permeabilidades de las unidades hidrogeológicas.

Uno de los aspectos más relevantes en el modelo conceptual del sistema geotermal lo constituye la fuente de calor. En este sentido, se analizaron antecedentes de estudios previos en el área de con el objetivo de determinar un flujo calórico basal o temperatura que estuviese acorde con el contexto tectónico que da origen al sistema geotermal en estudio.

Para construir el modelo conceptual se utilizó el software GMS (Groundwater Modeling System) el cual permite incorporar toda la información relevante para la construcción del modelo numérico del reservorio. Una de las ventajas de este software es que permite generar grillas de modelación a partir del modelo conceptual, las que son exportables a otras plataformas de modelación numérica.

La construcción del modelo conceptual se presenta en el Capítulo 3.

d) Visita a terreno

Se efectuó una visita a terreno, la que permitió un reconocimiento general de la zona de estudio a modelar. En esta se observaron los siguientes aspectos:

- Afloramiento de unidades geológicas
- Geomorfología
- Pozos existentes
- Medidas de parámetros físico-químicos (conductividad, T°, pH).

Los resultados obtenidos a partir de la visita a terreno se discuten en el Capítulo 4.

e) Construcción y calibración de modelo numérico

A partir del modelo conceptual se construyó un modelo numérico que permitió representar y simular espacial y temporalmente variables de interés, tales como temperatura y presión. Para esto se utilizó el software TOUGH2, programa desarrollado por el Lawrence Berkeley National Laboratory de California (LBNL), que permite la modelación de flujos multifase no isotermales.

TOUGH2 permite la modelación de flujo y calor tanto en medios porosos, por ej. sedimentos granulares no consolidados, como en medios fracturados. Considerando lo anterior, en este trabajo, el medio será analizado como un medio poroso condicionado sólo por fracturas a gran escala, es decir por fallas que controlen el comportamiento del sistema.

El modelo numérico fue planteado en tres dimensiones, para lo cual se consideraron perfiles representativos del sistema geotermal en estudio. De acuerdo a los datos disponibles del sistema geotermal El Tatio, se calibró un modelo en régimen permanente que permitió representar adecuadamente los perfiles de temperatura obtenidos a partir de la construcción de pozos geotérmicos en la campaña de exploración de la década de los 70.

La construcción del modelo numérico se presenta en el Capítulo 5. En tanto, los resultados de la calibración se muestran en el Capítulo 6.

f) Análisis de sensibilidad

Luego de la calibración del modelo se realizó un análisis de sensibilidad manual con el objetivo de determinar los parámetros que más influyen en los resultados globales del modelo.

El análisis de sensibilidad se presenta en el capítulo 7.

g) Simulación del sistema

Una vez calibrado el sistema, se generaron escenarios de simulación que permitieron estudiar, analizar y comprender el funcionamiento del sistema geotermal a nivel cualitativo y cuantitativo.

Los escenarios de simulación y los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 8.

h) Discusión de resultados y limitaciones del modelo

En función de los resultados obtenidos se establecieron comentarios, conclusiones y recomendaciones respecto a las ventajas, dificultades y limitaciones de la modelación numérica de un sistema geotermal, las cuales se presentan en los Capítulos 9 y 10.

2. ESTADO DEL ARTE/ MARCO TEORICO

2.1 Revisión de antecedentes

Se recopilaron y revisaron una serie de antecedentes relacionados con el sistema geotermal El Tatio y la modelación numérica de sistemas geotermales en general. A continuación se presenta un breve resumen de los principales antecedentes analizados y de cómo estos fueron utilizados en la elaboración del trabajo de investigación.

- ✓ **Horizontal Flow in Hydrothermal Systems. J. Healy and M.P. Hochstein, Journal of Hidrology (New Zealand), 1973.**

Este documento muestra la existencia de sistemas de flujos horizontales de agua subterránea a alta temperatura y a gran escala a partir de datos de pozos exploratorios y campañas geofísicas realizadas en los campos geotérmicos de Chile y Nueva Zelanda.

El objetivo principal radica en que se debe poner atención a la componente horizontal del movimiento del agua que se ha demostrado que es un factor importante en sistemas geotermales como el Tatio (Chile) y Waiotapu-Reporoa (Nueva Zelanda).

A partir de los perfiles de temperatura se infiere que donde el flujo es horizontal ocurre un patrón de flujo que se vuelve estable inicialmente por la permeabilidad y el potencial hidráulico. Luego, por depositación de sílice arriba y abajo del sector de flujo de mayor temperatura, este empieza a quedar aislado desarrollándose un gradiente termal conductivo arriba y abajo.

Finalmente, el estudio concluye que la existencia de flujos horizontales puede ser deducida por campañas geofísicas de resistividad que permitan determinar los contornos definidos por áreas de baja resistividad creadas por la presencia de fluidos salinos y calientes.

Los resultados de este estudio fueron utilizados para sustentar las condiciones de borde del modelo numérico, al señalar que los flujos en el sistema El Tatio son horizontales a gran escala.

- ✓ ***Hydrothermal Alteration and fluid-rock interaction in the El Tatio Geothermal Field, Antofagasta Province, Chile. K.J. Youngman, August, 1984.***

Este estudio incluye un esquema en 2D del modelo hidrogeológico conceptual del sistema Geotermal El Tatio y fue utilizado como base para la construcción del modelo conceptual a utilizar en la tesis. Además incluye perfiles geológicos que fueron interpretados del punto de vista hidrogeológico (incluidos en Anexo A), y posteriormente utilizados para extender la modelación del sistema a tres dimensiones.

- ✓ ***Carta geológica de Chile Escala 1:250.000, Hoja Calama, Región de Antofagasta. Nicolás Marinovic S, Alfredo Lahsen A. (1984).***

La carta geológica de Chile, Hoja Calama, permite visualizar las unidades geológicas que afloran en el área de estudio en conjunto con una interpretación de la historia geológica y de la sucesión de eventos en la zona. Además, presenta una descripción del sistema geotermal El Tatio en términos geológicos, hidrogeológicos y energéticos.

- ✓ ***El Tatio Geothermal Field, Lahsen A., Trujillo, P., 1975.***

Este estudio constituye la base para la descripción de la geología local del sector El Tatio, además de aportar antecedentes relacionados con la exploración del sistema geotermal mediante pozos y campañas geofísicas.

- ✓ ***The Geochemistry of the El Tatio Geothermal Field, Northern Chile.- Cusicanqui, H. 1975. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago Chile.***

Este trabajo aporta con antecedentes hidrogeoquímicos de las aguas del sistema geotermal el Tatio. Las conclusiones resultantes de este informe constituyen la base para definir los mecanismos de recarga del sistema y los tipos de agua predominantes en desde el punto de vista hidrogeoquímico.

- ✓ ***Revisión de la ejecución del Proyecto Perforación Geotérmica profunda El Tatio Fase 1, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Octubre 2010.***

Este documento presenta la revisión técnica y el análisis del incidente ocurrido durante la ejecución de pruebas ejecutadas el año 2009 en el marco del proyecto de perforación geotérmica profunda El Tatio Fase 1. Contiene información relacionada con los registros de presión y temperatura en pozos utilizados para la inyección de fluidos de producción. Esta información fue utilizada para la calibración del modelo en régimen transiente.

- ✓ ***Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Perforación geotérmica profunda El Tatio I, SGA, 1997.***

El Estudio de Impacto Ambiental del proyecto de perforación geotérmica fue extraído de la base de datos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Este aporta con información relevante en términos de geología, hidrología, hidrogeología y topografía de la zona de estudio.

- ✓ ***Actas Primer Congreso Geológico 2-7 de Agosto de 1976. La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile, Alfredo Lahsen.***

Este documento presenta el contexto geológico en el cual se enmarcan los sistemas geotermiales en el norte del país, estableciendo la relación entre el volcanismo cuaternario, la geología estructural y la actividad geotermal existente.

- ✓ ***Present Status of Geothermal Exploration In Chile (Alfredo Lahsen, Nelson Muñoz, Miguel Angel Parada, Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia)***

Este documento abarca la historia de la exploración geotérmica en Chile presentando un estado general de la geotermia en la actualidad. Contiene información relacionado con el origen y la distribución de los recursos geotérmicos en Chile, su potencial y la utilización actual.

- ✓ ***Exploration of The La Torta Geothermal Prospect, Northern Chile (Cumming, Vieytes, Ramirez, Sussman, 2002)***

Este documento contiene los resultados de la exploración geofísica (método magnetoteléurico) realizada en el año 2002 en el Sector La Torta, ubicado unos pocos kilómetros al Sureste del campo geotermal El Tatio. Los resultados obtenidos son complementados con campañas de exploración geofísica previas al año 2001 generándose un perfil en dirección SE-NW en el cual se muestra la distribución de resistividad eléctrica y que permite integrar ambos sectores, El Tatio y La Torta.

✓ ***TOUGH2 User's Guide (Pruess, 1999)***

Corresponde a un manual de utilización del software TOUGH2 desarrollado por el Lawrence Berkeley National Laboratory de California (LBNL), en el cual se detalla la estructura del software y su forma de utilización. Contiene ejemplos y la base teórica utilizada para la resolución de problemas.

✓ ***Antecedentes de exploración en sistema geotérmico El Tatio (1968-1974) realizados por el Comité para el aprovechamiento de la energía geotérmica- CORFO, Programa CORFO-Naciones Unidas, proporcionados por el profesor Juan Rojas:***

- Survey for Geothermal Development in Northern Chile: Report on Steam measurements, El Tatio Well N°1- Frank Scarf, January 1970.
- Survey for Geothermal Development in Northern Chile: Drilling and initial discharge report Well N° 2, El Tatio.
- Survey for Geothermal Development in Northern Chile: The drilling of well N° 7, El Tatio. K. McCorkindale, June 1973.
- Survey for Geothermal Development in Northern Chile: Review of drilling program, El Tatio, December 1973, James Healy.
- Survey for Geothermal Development in Northern Chile: Geological Report on wells 1-5, El Tatio, by James Healy, Feb.1971.
- A geothermal study of wells 7, 8, 9 and 10. Recommendations for wells 11, 12 and 13.
- Informe de mediciones de completación del pozo 8 El Tatio.
- Control de los pozos N° 1, 7, 10, 11 (1er semestre de 1973) por Carlos Muñoz y Raúl Bravo, Enero 1976.

Corresponde a una serie de informes y antecedentes de diversos autores relacionados con la exploración realizada en la década de los 70 (1968-1974) en el sistema geotermal El Tatio. En particular incluye los informes de perforación y pruebas de producción de los pozos 1 al 13. De estos antecedentes es posible extraer datos registrados de presión, perfiles de temperatura, pruebas de permeabilidad, estratigrafía y geofísica. Estos antecedentes constituyeron la base para la calibración del modelo numérico propuesto.

✓ ***Geothermal Reservoir Simulation: The State-of-Practice and emerging trends (Michael O'Sullivan, Karsten Pruess, Marcelo Lippmann, 2010)***

El objetivo de este documento es realizar un resumen del estado de la práctica de la simulación de reservorios geotermiales además de discutir avances recientes y desafíos. Dentro del estado de arte actual se incluyen experiencias y consideraciones de diversos modeladores respecto a la recolección de datos y construcción de modelos conceptuales, diseño geométrico de modelos, condiciones de borde, y calibración de modelos.

Como anexo se incluye un listado de todos los modelos de simulación realizados a la fecha. Para cada modelo se señala un resumen relacionado con los siguientes aspectos: software utilizado, tamaño de la grilla, geometría empleada, parámetros de calibración, etc. Este documento constituyó la base para establecer el estado del arte actual de la modelación numérica de reservorios.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Historia

La solución numérica de sistemas físicos complejos empezó con el avance de los sistemas computacionales a finales de los 60, sin embargo, no fue hasta el inicio de la década de los 70 que empezaron a surgir trabajos relacionados con la modelación de reservorios geotérmicos (O'Sullivan, 2010).

Los últimos 10 a 15 años, el uso de modelos de simulación de reservorios geotermales se ha masificado, utilizándose para simular el comportamiento de alrededor de 100 campos geotermales en todo el mundo, entre los que se cuentan: Ahuachapan (El Salvador), Soultz-sous-Forets (Francia), Cerro Prieto (México), Wairakei (Nueva Zelanda), Geysers, (Estados Unidos), etc.

Si bien los reservorios geotermales de alta entalpía se encuentran fundamentalmente en roca fracturada, el enfoque de modelación más utilizado ha sido el de medio poroso equivalente, siendo menor la preferencia por un enfoque de modelo de doble porosidad o Multiple Interacting Continua (MINC) (Pruess and Narasimhan, 1985). De acuerdo con lo señalado por O'Sullivan (2010), otros modelos incluyen explícitamente la representación de fallas o fracturas dominantes del sistema. En relación a la estructura de los modelos, estos consideran geometría regular e irregular en dos y tres dimensiones, observándose en general una mayor cantidad de modelos de geometría rectangular.

Por otra parte, especial énfasis han dado los modeladores al estudio de las condiciones de borde de los sistemas, tanto a las condiciones de borde basales como laterales, lo que ha permitido a lo largo de la historia establecer ciertas ventajas entre una condición u otra.

Otro de los puntos relevantes ha sido la calibración de modelos, en donde el procedimiento general consiste en la calibración en régimen natural seguido de una calibración en régimen operacional en la medida que los datos lo permitan. El método tradicional consiste en calibrar las permeabilidades del sistema utilizando el método de prueba y error, de forma de reproducir perfiles de temperatura y presión conocidos. El procedimiento usual, al menos para la calibración en régimen natural y permanente es correr el modelo en tiempos muy largos, de forma de reproducir el desarrollo del sistema geotermal a lo largo del tiempo.

Los avances recientes en la simulación de reservorios tratan de reproducir de la manera más real posible el comportamiento de un sistema geotermal, incluyendo la presencia de dióxido de carbono y sólidos disueltos. Además, tratan de incluir la variación de permeabilidad y porosidad en el reservorio producto de la disolución o precipitación de minerales (O'Sullivan, 2010). En términos de calibración de los modelos se han realizado avances en la automatización de este proceso usando técnicas de modelación inversa en reemplazo del método de prueba y error.

Entre los softwares de modelación utilizados se cuentan HYDROTHERM (USGS; Version 3, 2008), SUTRA (USGS, Versión 2.2, 2010), SEAWAT (USGS, 2002), TOUGH2 (Pruess; Versión 2.0, 1999), FEFLOW (DHI-Wasy, Versión 6.2, 2013), STAR (Pritchett, 1995) y TETRAD (Vinsome and Shook, 1993), siendo uno de los modelos más recurrentes el software TOUGH2 desarrollado por el Lawrence Berkeley National Laboratory de California (LBNL).

En términos de resolución numérica, cada vez se desarrollan algoritmos más eficientes de cálculo, a la vez que existen herramientas más avanzadas de interpretación gráfica de resultados o de procesamiento de datos de entrada y salida del modelo.

2.2.2 Estudios actuales

En países que cuentan con plantas geotérmicas en operación es posible encontrar diversos estudios de modelación de los reservorios. Estos modelos en general incluyen una etapa de calibración en régimen permanente y natural, e incluso hay sistemas que cuentan con suficientes datos de operación por lo que cuentan con modelos calibrados en régimen transiente. Como ejemplo se puede citar el modelo del sistema geotermal Ohaaki en Nueva Zelanda, el cual empezó a operar en 1965 y, para el cual ya en 1980 se contaba con diversos modelos de simulación del sistema. Hoy en día el sistema cuenta con casi 50 años de operación y cuenta con modelos de simulación actualizados (Clearwater, 2012).

Otro ejemplo reciente lo constituye el estudio de Kiryukhin y Miroshnikk (2012) del sistema geotermal Mutnovsky (Russia). En este estudio se recalibró un modelo existente usando información del período 1984-2006 utilizando una versión modificada de TOUGH2 (iTOUGH), que permite la calibración de parámetros usando modelación inversa en vez del tradicional método de prueba y error.

Aunque Chile tiene un gran potencial geotérmico, recién el año 2017 entró en operación la central geotérmica Cerro Pabellón (II Región), por lo que aún no se cuenta con una recolección de datos suficiente como para calibrar modelos en régimen natural y en operación. Para el sistema geotermal El Tatio, si bien se estima cuenta con información suficiente como para generar un modelo en régimen natural, no se reportan estudios al respecto. El resto de los sistemas geotérmicos se encuentran en etapa de exploración (Tolhuaca) o en inicios de operación como el ya mencionado Cerro Pabellón, y no cuentan con información suficiente que permita calibrar un modelo al menos en su régimen natural.

El Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA) es un proyecto que se inició el año 2011 cuya misión es mejorar y aumentar el conocimiento científico sobre la geotermia en Chile. El CEGA está integrado por un equipo de investigadores de la Facultad de Ciencias Físicas (FCFM) y Matemáticas de la Universidad de Chile junto a científicos de otras instituciones nacionales e internacionales. Una de las líneas de investigación del CEGA corresponde a la arquitectura de reservorios y dinámica de geofluidos, en donde se encuentran actualmente en desarrollo investigaciones relacionadas con la modelación numérica de flujo y transporte de calor en medios porosos. Entre estas investigaciones se encuentran¹:

¹ Antecedentes obtenidos de la página web del CEGA

- Aplicación del CO₂ supercrítico en reemplazo del agua como futura alternativa para la geotermia de mediana y alta entalpía en el norte de Chile.
- “Estudio de las perturbaciones hidrogeológicas de la estructura termal de una cuenca somera de antearco mediante modelamiento numérico: El caso de la cuenca de Santiago”.

Cabe destacar que el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (Proyecto Fondecyt #11110228) adquirió licencias del software TOUGH2, con el objetivo de abordar la modelación numérica de problemas relacionados con dinámica de flujo y transporte de calor.

2.2.3 Transporte de flujo y calor en medios porosos

El transporte de calor en medios porosos puede ocurrir mediante procesos de conducción, convección y radiación. El transporte por conducción ocurre desde cuerpos que tienen una mayor temperatura hacia otros que tienen una temperatura menor, y puede ser descrito por una ley lineal que relaciona el flujo de calor con el gradiente de temperatura. Por otra parte, el transporte por convección ocurre debido al transporte de calor por un fluido en movimiento, que en este caso corresponde a las aguas subterráneas. Finalmente, el transporte por radiación se asocia a la radiación emitida debido a la temperatura de un cuerpo.

En el caso de un sistema geotermal, el transporte de calor se produce fundamentalmente por convección y conducción, por lo que se plantearán a continuación las ecuaciones que rigen el flujo de calor en ambos casos.

De acuerdo con lo señalado por Domenico & Schwartz (1998), la ecuación que rige el transporte de calor en tres dimensiones corresponde a la siguiente:

$$\kappa_e \cdot \nabla^2 T - \rho_w c_w \nabla \cdot (Tq) = \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

donde

- T : Temperatura
- t : Tiempo
- ρ : Densidad del medio
- ρ_w : Densidad del fluido
- c : Calor específico del medio
- c_w : Calor específico del fluido
- q : Velocidad del fluido
- κ_e : Conductividad termal efectiva del conjunto roca- fluido.

El primer término del lado izquierdo de la ecuación se asocia al transporte de calor por conducción, mientras que el segundo término corresponde al calor por convección.

El término asociado a la velocidad en un medio poroso puede ser descrito mediante la ley de Darcy, la cual puede ser extendida a más de una fase según la siguiente expresión:

$$q_{\beta} = -k \cdot \frac{k_{r\beta}}{\mu_{\beta}} \cdot (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \cdot g)$$

donde

k : Permeabilidad absoluta

$k_{r\beta}$: Permeabilidad relativa a la fase β

μ_{β} : Viscosidad del fluido asociada a la fase β

P_{β} : Presión del fluido en la fase β

ρ_{β} : Densidad del fluido asociada a la fase β

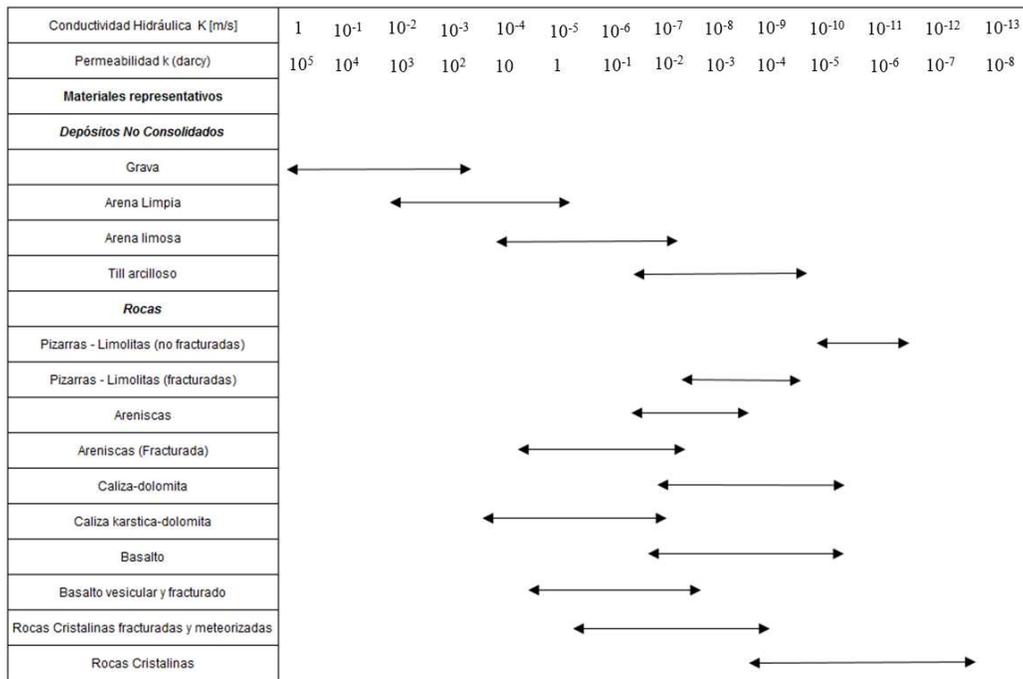
g : Aceleración de gravedad

Luego, dependiendo de las características del medio, el transporte de calor puede ser dominado por convección o conducción. De esta forma, en medios permeables naturales es probable que domine el transporte convectivo en relación al transporte conductivo.

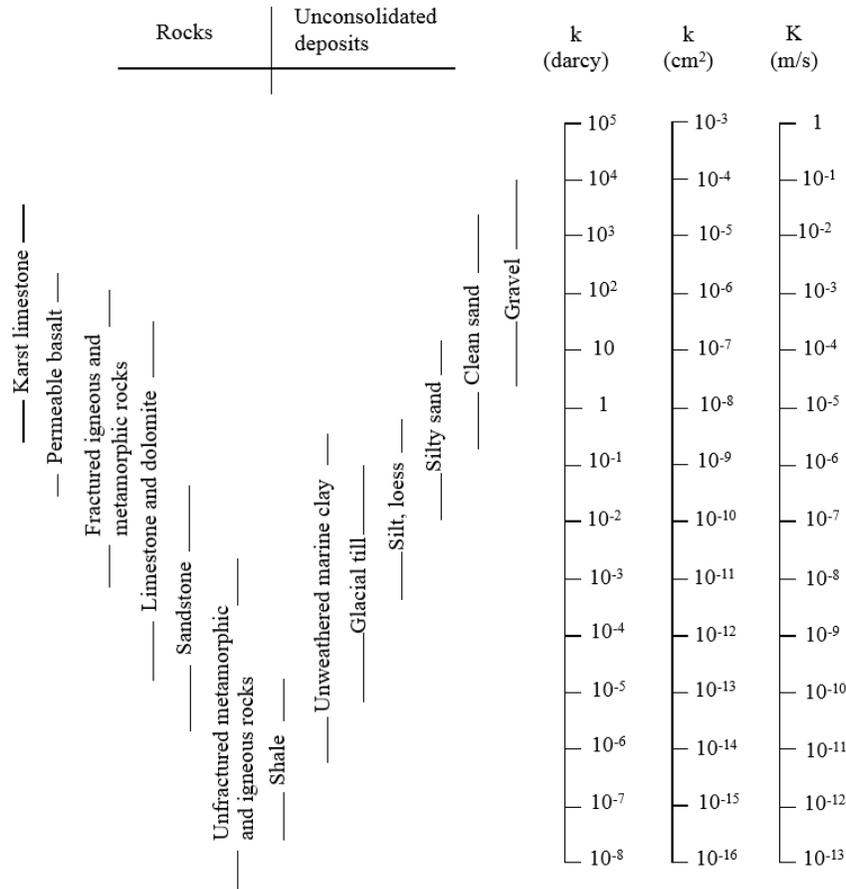
2.2.4 Permeabilidades en medios porosos y fracturados

La permeabilidad del subsuelo es muy variable y depende, entre otros factores, del tipo de depósito, granulometría, grado de compactación y cementación. En un medio rocoso, la permeabilidad primaria está asociada a la formación de la roca siendo en general las rocas ígneas cristalinas bastante menos permeables que rocas sedimentarias y volcánicas. A su vez, las rocas en general presentan una permeabilidad bastante menor que los depósitos no consolidados. Sin embargo, la permeabilidad secundaria, asociada a procesos posteriores a la formación de la roca tales como diaclasiamento y fracturas, puede ser significativa dependiendo del grado de fracturamiento, e incluso comparable a depósitos no consolidados permeables. A modo de referencia, se presentan a continuación una recopilación bibliográfica de los rangos de permeabilidad esperados para distintos medios.

Figura 2.1.- Permeabilidades en medios rocosos



Fuente: Modificado de Applied Hydrogeology of Fractured Rocks, Gupta&Singal.



Fuente: Modificado de "Groundwater" de Freeze and Cherry, 1979.

3. MODELO CONCEPTUAL

La construcción del modelo conceptual del sistema en estudio, que constituye la base para la elaboración del modelo numérico posterior, se basó en la recopilación y análisis de los antecedentes presentados a continuación. Los aspectos principales de estos se resumen en el presente capítulo.

- Geología
- Hidrogeología
- Información de pozos
- Balance hídrico
- Hidrogeoquímica
- Fuente de calor
- Exploración geofísica

3.1 Marco geológico

Para caracterizar el marco geológico de la zona de estudio se utilizó el estudio “El Campo Geotérmico de El Tatio, Chile”, elaborado por Lahsen y Trujillo (1976), el cual contiene los siguientes resultados.

a) Unidades principales.

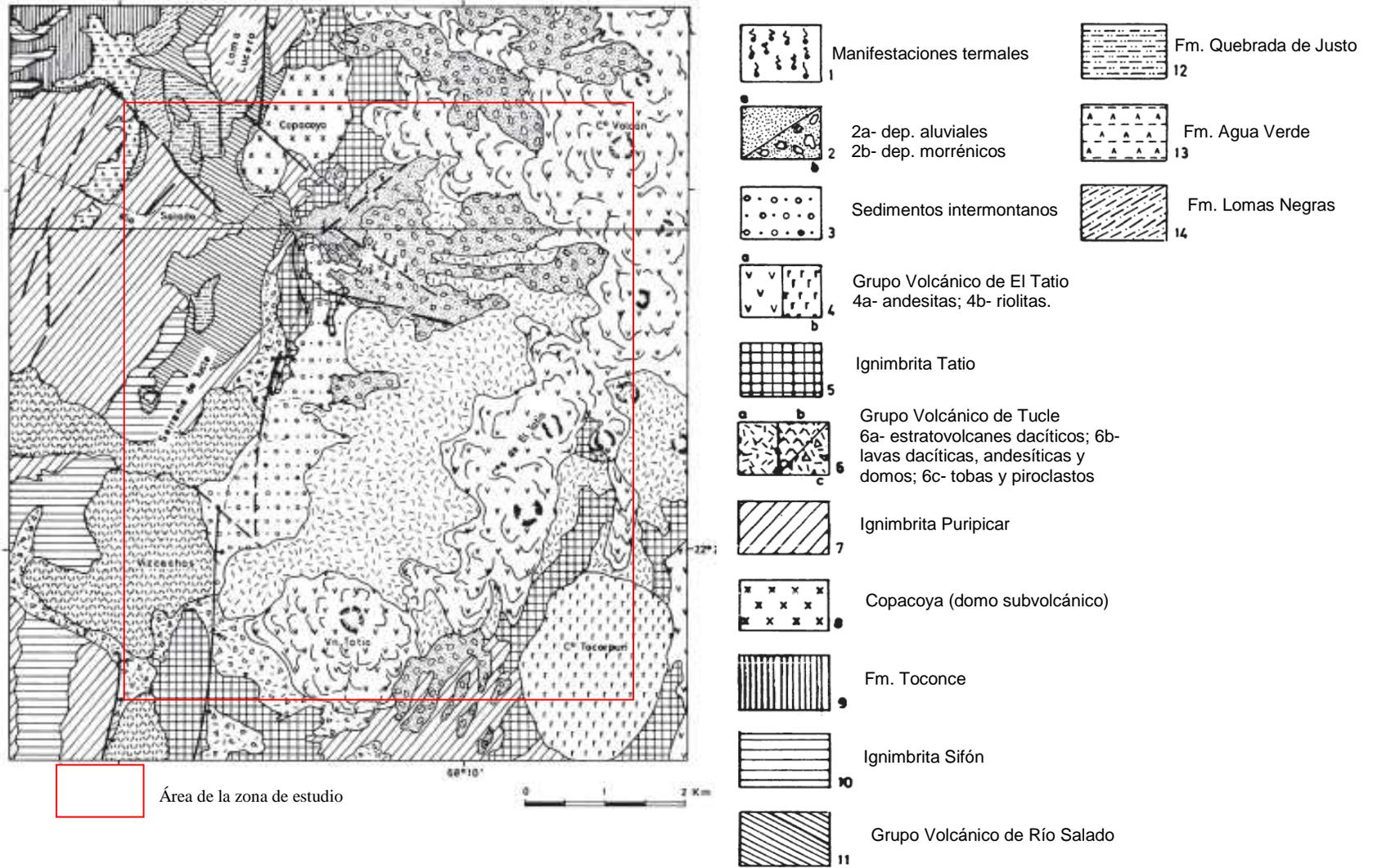
De acuerdo con los antecedentes estudiados, en líneas generales, el sector en estudio se encuentra en una zona de graben, emplazado sobre unidades volcánicas Cenozoicas dispuestas sobre un basamento de origen sedimentario del Mesozoico. Dicho basamento está constituido por las formaciones Lomas Negras, Quebrada de Justo y Agua Verde, las cuales quedan expuestas en el sector oeste de El Tatio.

Las unidades geológicas principales que conforman la depositación sobre el basamento mesozoico corresponden a Ignimbrita Puripicar (Plioceno Inferior), Ignimbrita Tatio (Pleistoceno Inferior), Brecha Salado (Mioceno Inferior), Dacitas de Tucle (Plioceno Superior) e Ignimbrita Salado (Mioceno Inferior). Según lo indicado por Lahsen y Trujillo (1976), la Ignimbrita Puripicar corresponde a una serie de tobas soldadas dacíticas, de color gris claro o rosado y con alto contenido de fenocristales, entre los que se destacan grandes cristales de biotita de hasta 3 mm y cuarzo rosado tipo amatista. Por otra parte, la Ignimbrita Tatio está constituida por tobas moderadamente soldadas, con un bajo contenido de cristales y fragmentos de pómez riolítica especialmente abundantes y de gran tamaño en los niveles inferiores de la unidad. Finalmente, el grupo volcánico de El Tatio está formado por una serie de estratovolcanes andesíticos y domos riolíticas que se ubican en la parte superior de la cordillera de los Andes, en el sector este de la zona de estudio.

b) Estructuras relacionadas con la actividad hidrotermal.

En términos estructurales, existe un sistema de fracturas de orientación NO-SE y NE-SO que controla las descargas de los acuíferos termales. En efecto, la actividad hidrotermal superficial se presenta fundamentalmente a lo largo de estas fracturas. La Figura 3.1 muestra el mapa geológico de la zona de estudio extraído del estudio de Lahsen y Trujillo (1976).

Figura 3.1.- Mapa geológico de la zona de estudio (*)



(*) Extraído de “El Campo geotérmico del Tatio”; Lahsen y Trujillo (1976).

3.2 Exploración mediante pozos

Durante la década de 1970 se efectuó una campaña exploratoria por parte de CORFO y Naciones Unidas (Lahsen, 1975), en el sector de los Geysers de El Tatio, descubriéndose un potencial geotérmico de importancia. Dicha campaña exploratoria consistió fundamentalmente en la perforación de pozos, cuya información fue recopilada y se presenta a continuación.

3.2.1 Ubicación y características de los pozos

La Figura 3.2 muestra la ubicación de los pozos, mientras que la Figura 3.3 resume las características principales de estos.

Figura 3.2.- Ubicación de pozos

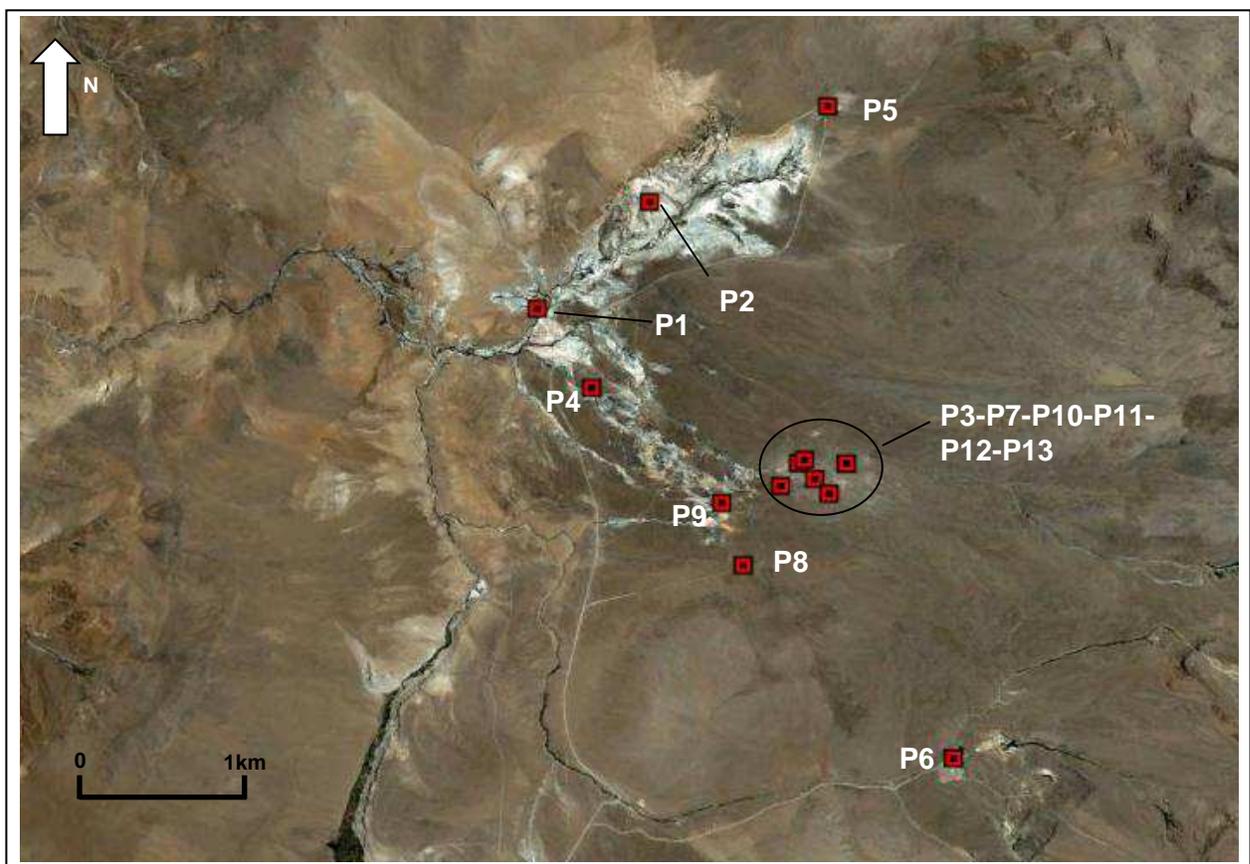


Figura 3.3.- Características de los pozos

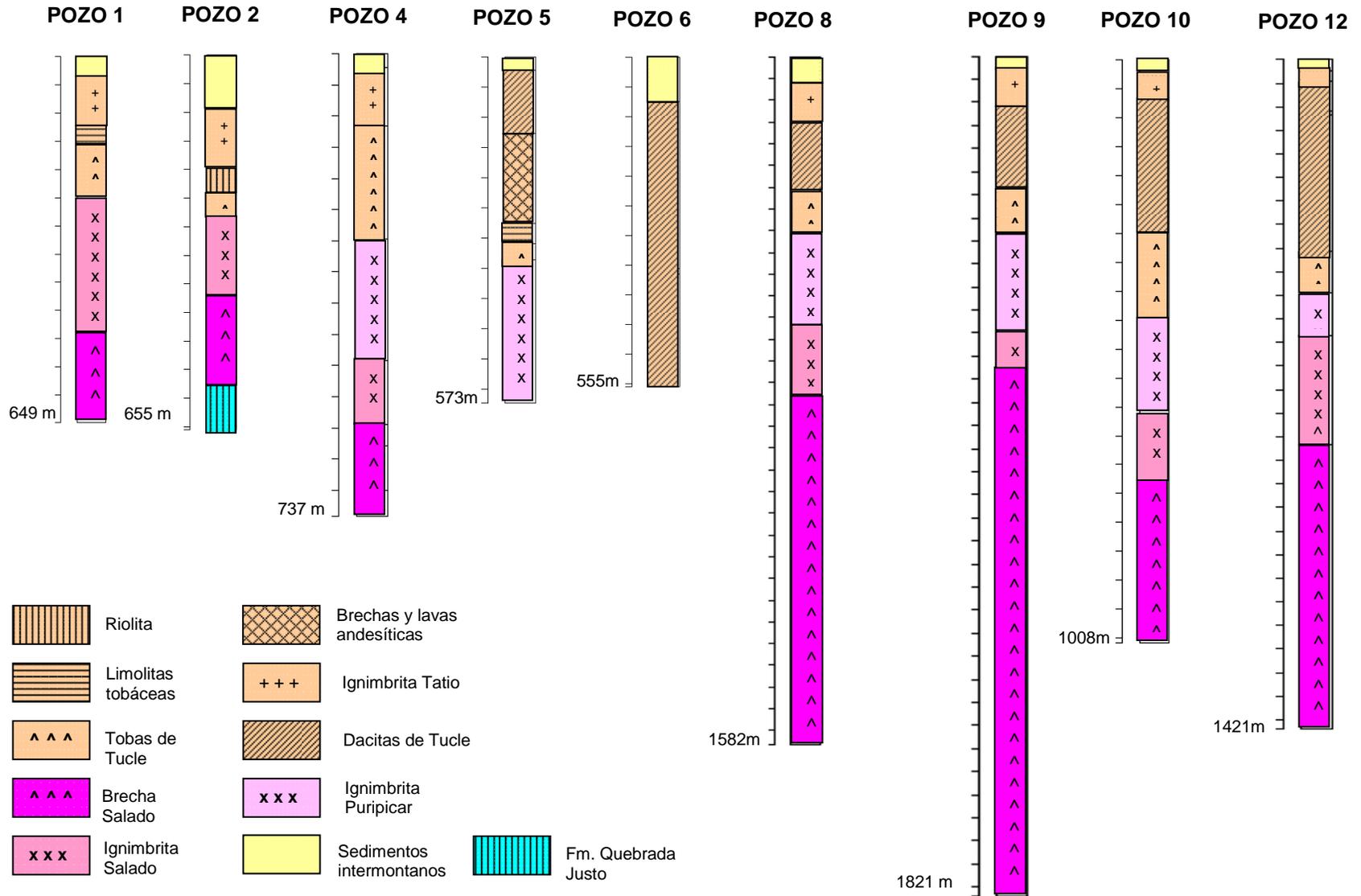
Pozo	UTM Este [m] (*)	UTM Norte [m] (*)	Cota terreno [msnm]	Año de perforación	Profundidad [m]
1	601096	7529366	4150	1969	649
2	601886	7530101	4271	1969	655
3	602862	7528215	4350	-	-
4	601442	7528785	4275	-	737
5	603120	7530736	4300	-	573
6	603771	7526073	4500	-	555
7	603017	7527969	4363	1973	837
8	602420	7527480	4337	1973	1582
9	602293	7527927	4324	1973	1821
10	602694	7528035	4345	1973	1008
11	602823	7528192	4345	1973	900
12	603143	7528177	4350	1974	1421
13	602925	7528077	4361	1974	1010

(*) Coordenadas en sistema UTM Huso 19 Datum WGS 84

3.2.2 Estratigrafía de pozos

La Figura 3.4 resume la estratigrafía de pozos obtenida del estudio de Youngman (1984).

Figura 3.4.- Estratigrafía de pozos (*)



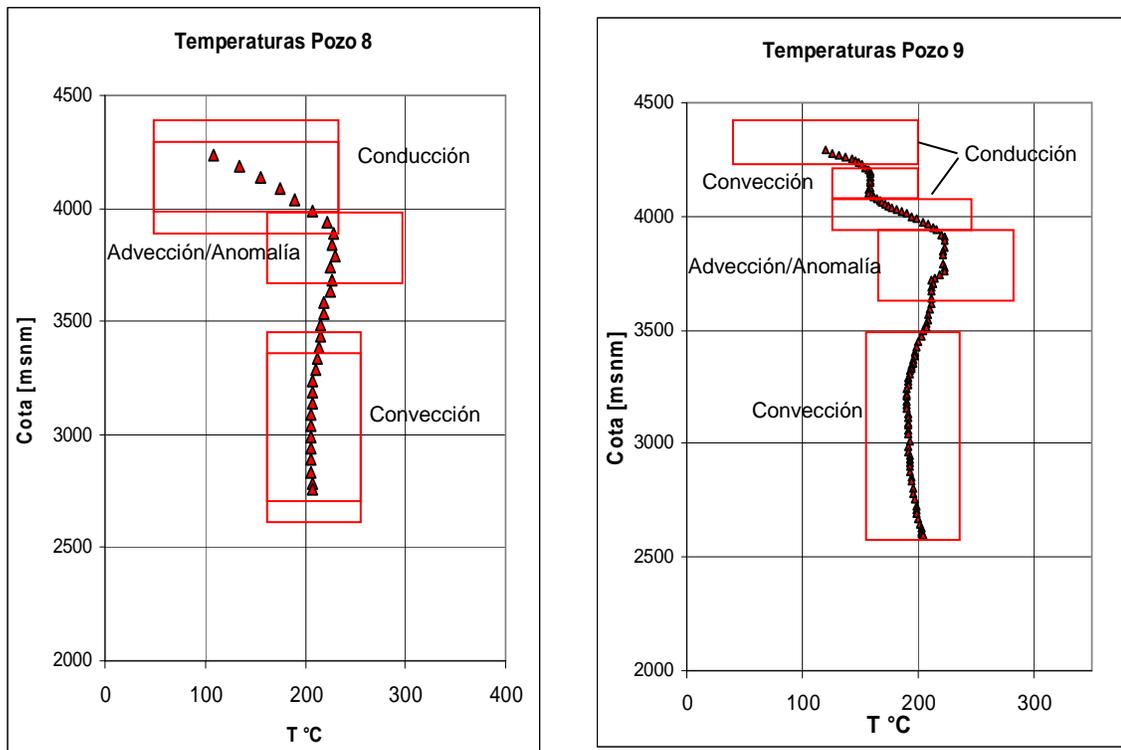
(*): Elaboración propia basado en Youngman, 1984.

3.2.3 Perfiles de temperatura

Los pozos de exploración perforados permitieron realizar perfiles de temperatura, consistentes en mediciones de temperatura en distintas profundidades del pozo. Estos fueron realizados bajo condiciones estáticas (sin flujo desde el pozo) y bajo condiciones dinámicas (con flujo desde el pozo). La Figura 3.6 muestra los perfiles de temperatura registrados en condiciones estáticas. Estos perfiles fueron registrados posteriormente a la ejecución de las perforaciones de forma que la temperatura de los fluidos de perforación no incidiera significativamente en la temperatura del reservorio. De acuerdo con esto, los perfiles presentados se consideran representativos de la condición natural del acuífero.

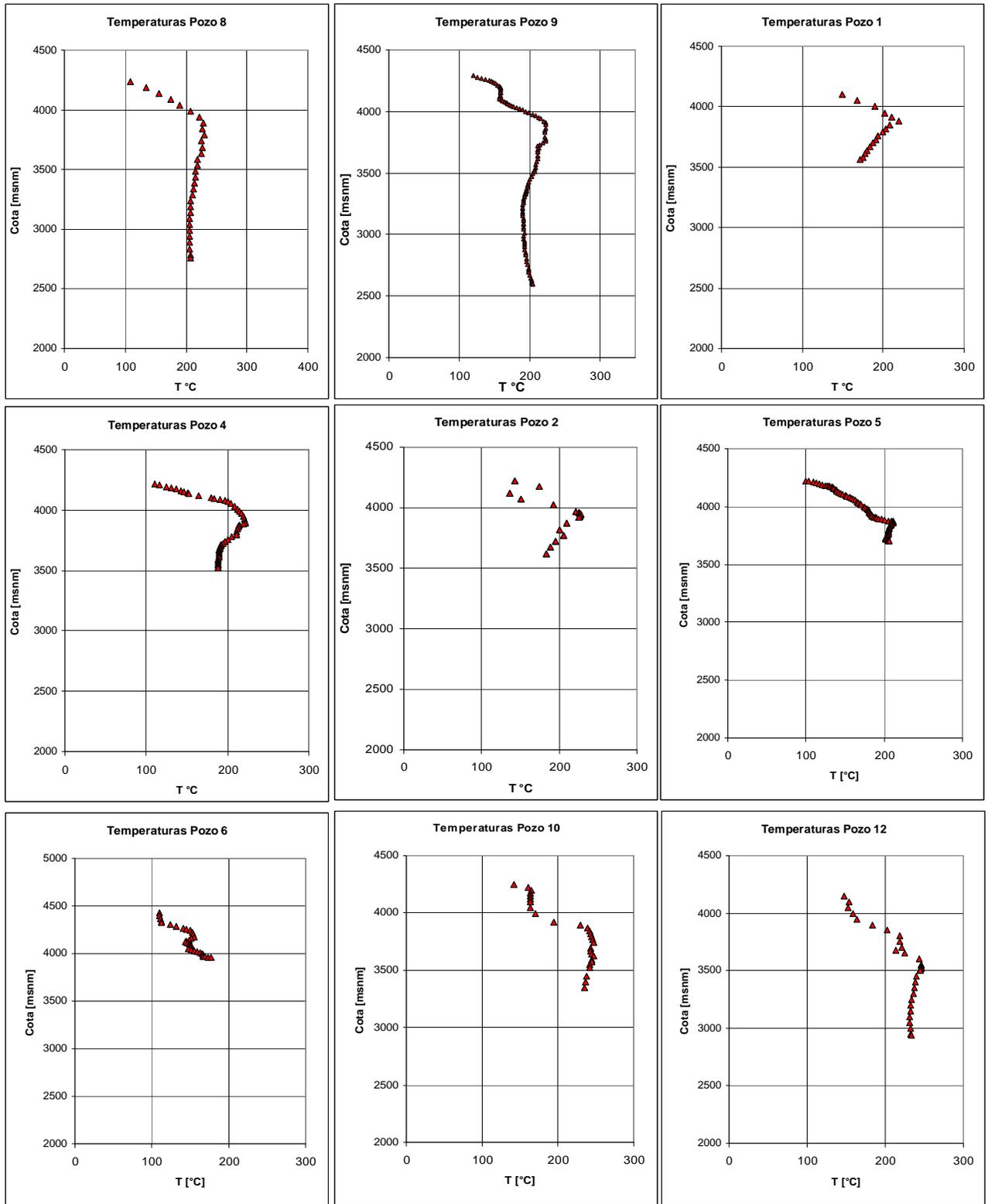
La forma de los perfiles de temperatura² indica que existiría transporte de calor por advección (representadas como anomalías en los perfiles) entre los 3500 y 4000 msnm aproximadamente, sector de mayor permeabilidad donde se concentran los acuíferos principales. La dirección del flujo es predominantemente SE-NW, disminuyendo la temperatura gradualmente en dicha dirección. Por sobre estas cotas, el transporte de calor sería fundamentalmente por conducción, ya que se observa que existe una variación aproximadamente lineal de la temperatura con la profundidad, lo que indica una baja permeabilidad en relación a las zonas señaladas anteriormente. Lo contrario ocurre por debajo de los 3500 msnm, observándose que la temperatura se mantiene aproximadamente constante con la profundidad, lo que respondería a la mezcla de fluidos convectivos, y por consiguiente a transporte de calor por convección. Lo anterior se muestra en la siguiente figura, la cual corresponde a los perfiles de temperatura registrados en los pozos 8 y 9.

Figura 3.5.- Ejemplo de transporte de calor en perfiles de temperatura



² Interpretación realizada a partir de lo señalado en "Geothermal Reservoir Engineering", 2011. Capítulo 4.4.

Figura 3.6.- Perfiles de temperatura registrados en pozos



3.2.4 Perfiles de presión

Adicionalmente a los perfiles de temperatura registrados, los pozos de exploración permitieron generar perfiles verticales de presión. Debe señalarse que las presiones registradas dependen de la habilitación de cada pozo. En este caso, los pozos fueron habilitados a partir de las unidades permeables y fueron sellados desde dicho sector hasta la superficie. Luego, los perfiles de presión registrados son representativos exclusivamente de las unidades hidrogeológicas principales del sistema geotermal. Las figuras siguientes muestran los perfiles de presión registrados en pozos.

Figura 3.7.- Perfiles de presión registrados en pozo 8

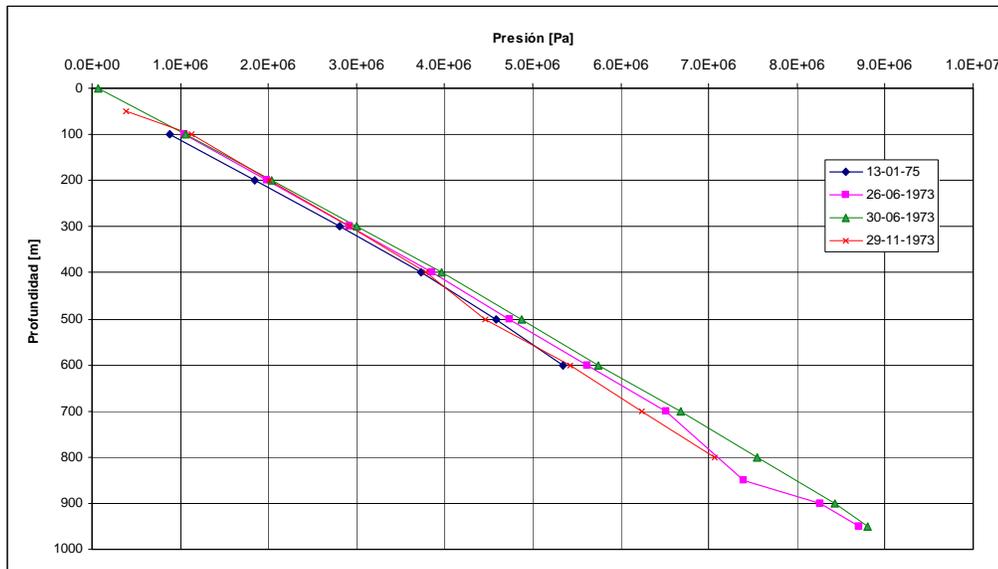


Figura 3.8.- Perfiles de presión registrados en pozo 9

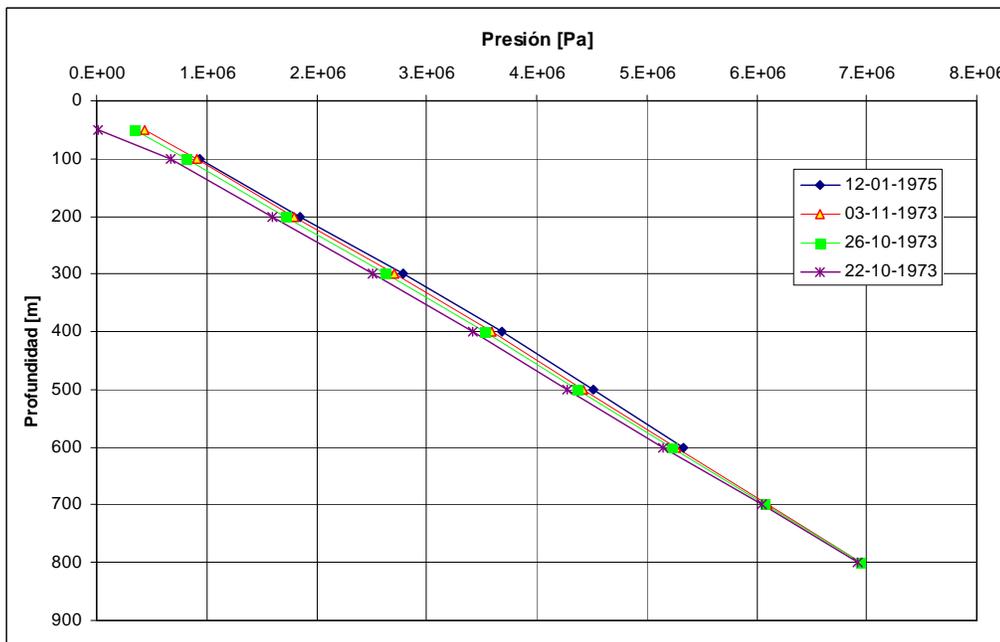


Figura 3.9.- Perfiles de presión registrados en pozo 2

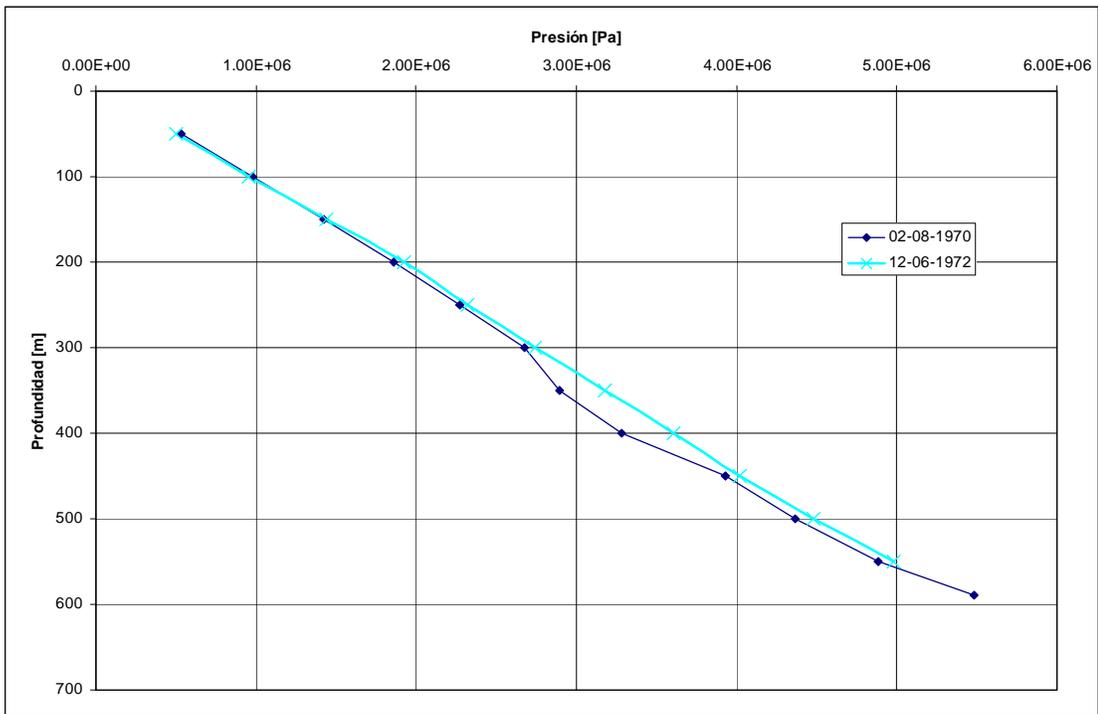
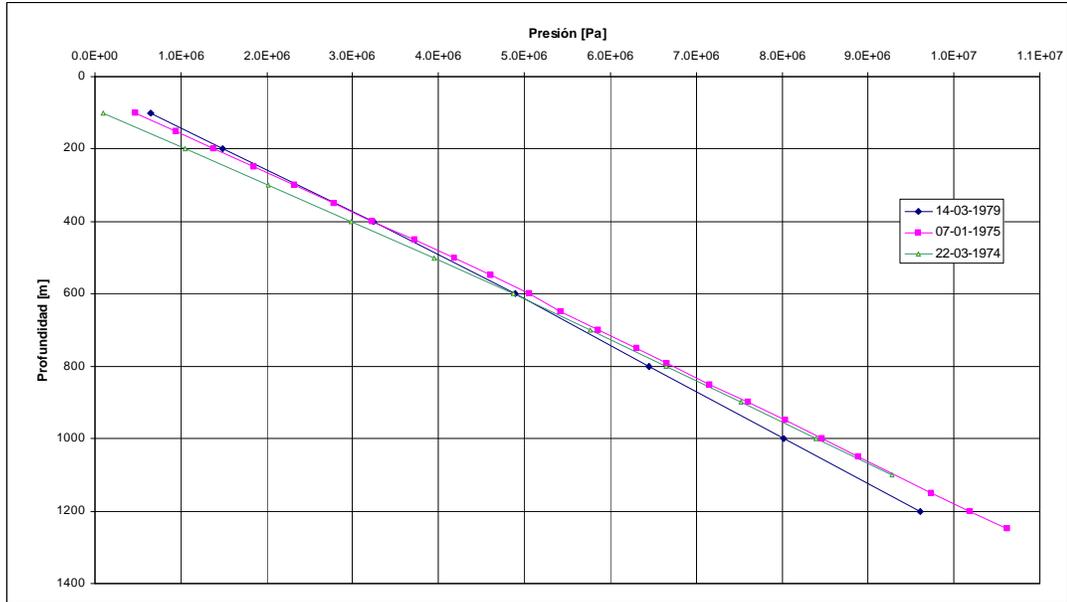


Figura 3.10.- Perfiles de presión registrados en pozo 12



Los perfiles permiten observar que existe un gradiente de presión entre los pozos 8, 9 y 2, lo que de acuerdo a la ley de Darcy (Ver Sección 2.2.3) permitiría deducir que existe un flujo con dirección predominantemente Sureste-Noroeste.

3.3 Hidrogeología

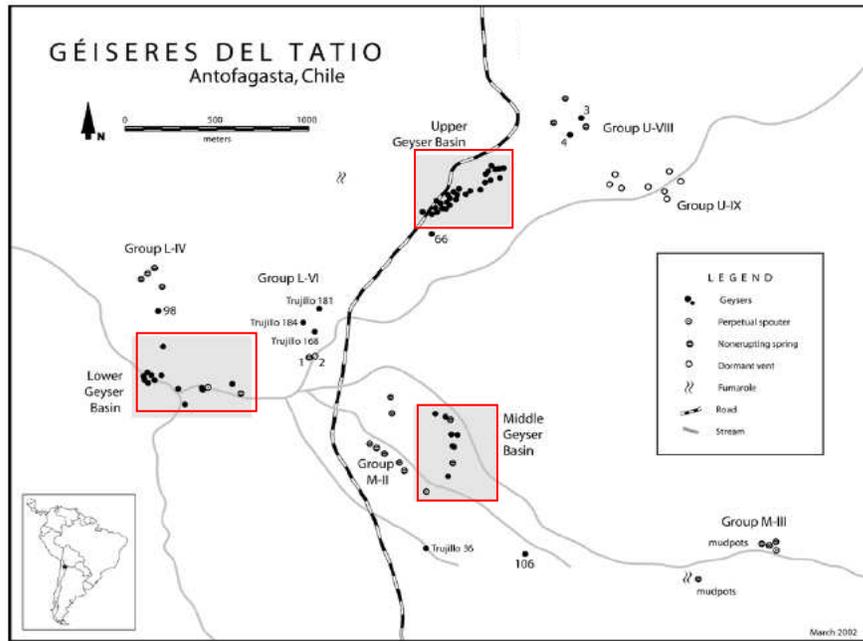
En la Figura 3.12 se muestran las unidades hidrogeológicas identificadas en los perfiles estratigráficos de pozos.

La Figura 3.13 muestra un esquema del modelo hidrogeológico conceptual que se utilizará como base para el trabajo de tesis, el cual fue modificado del estudio de Youngman (1984).

En líneas generales, y considerando la información proporcionada por la estratigrafía y perfiles de presión y temperatura en pozos, del modelo se desprende lo siguiente:

- Existiría un flujo en dirección SE-NW concentrado principalmente en las unidades Ignimbrita Puripicar e Ignimbrita Salado, que corresponderían a las unidades hidrogeológicas principales y de mayor temperatura del sistema. La temperatura en ambas unidades disminuye gradualmente en dirección del flujo.
- La unidad hidrogeológica Dacitas de Tucle sobreyace a la unidad Tobas de Tucle y constituye un acuífero de menor temperatura debido a mezcla de aguas meteóricas frías con aguas más calientes de la unidad Ignimbrita Puripicar. La mezcla entre ambos acuíferos se produciría por el ascenso vertical de flujo desde la Ignimbrita Puripicar hacia las Dacitas de Tucle por fracturas y/o vías preferenciales de escurrimiento.
- Las unidades Ignimbrita Tatio y Tobas de Tucle son impermeables o presentarían una permeabilidad muy baja en comparación con las unidades hidrogeológicas señaladas en el punto anterior, lo que generaría un confinamiento del acuífero conformado por las unidades Ignimbrita Puripicar e Ignimbrita Salado.
- Existen tres zonas principales donde se concentran las manifestaciones superficiales del sistema geotermal y que constituyen las descargas principales del sistema. Estas zonas corresponden a Norte (Cuenca Superior), Sur (Cuenca Media) y Oeste (Cuenca Baja) (Ver Figura 3.11). La falla normal que corta las unidades Ignimbrita Puripicar e Ignimbrita Tatio condiciona la descarga principal del sistema (descarga norte).

Figura 3.11.- Zonas de descarga principales (*)



(*)Modificado de Glennon & Pfaff "The extraordinary Thermal Activity of El Tatio Geothermal Field", 2003.

Figura 3.12.- Unidades Hidrogeológicas identificadas en los perfiles estratigráficos de pozos

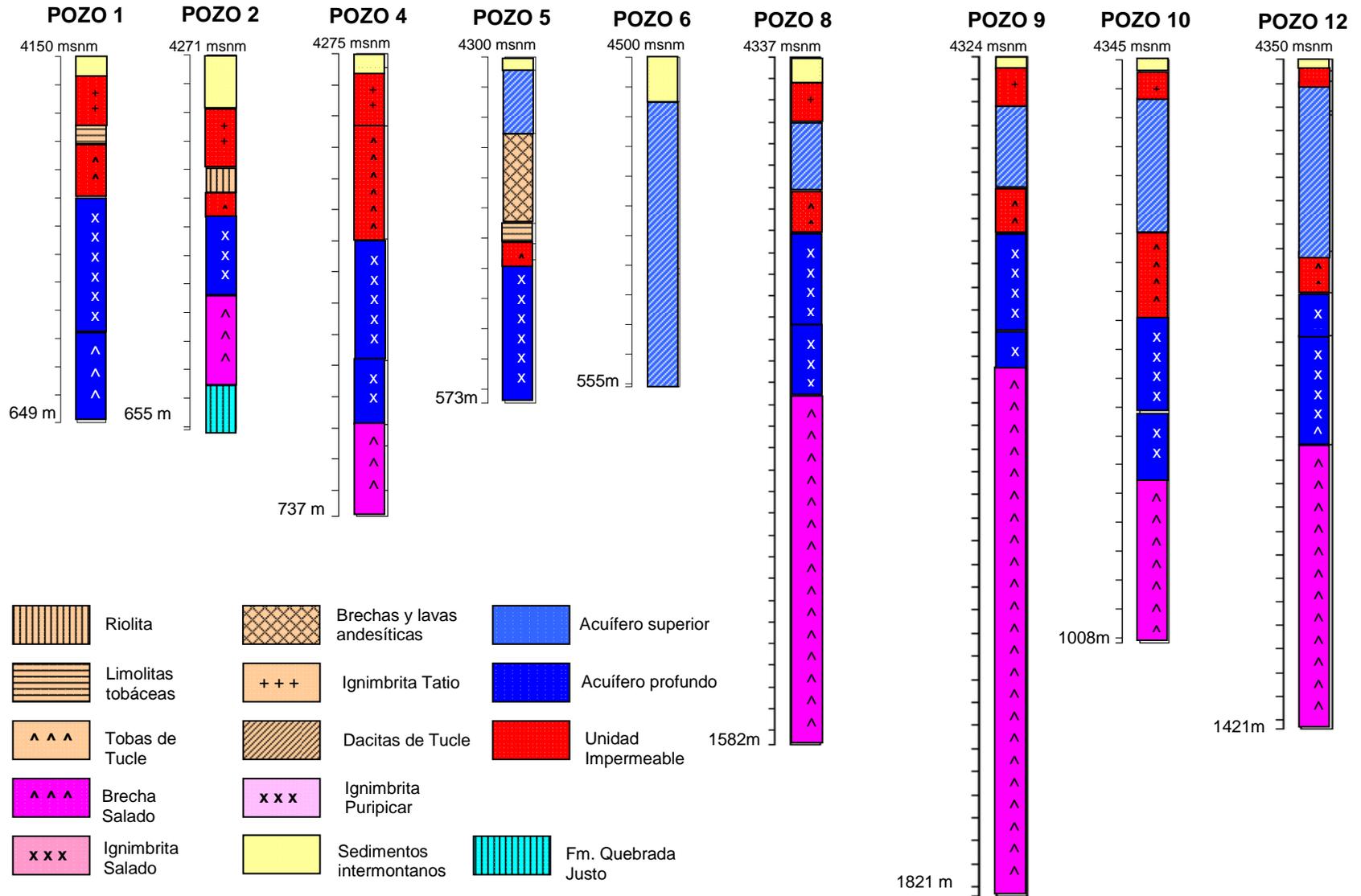
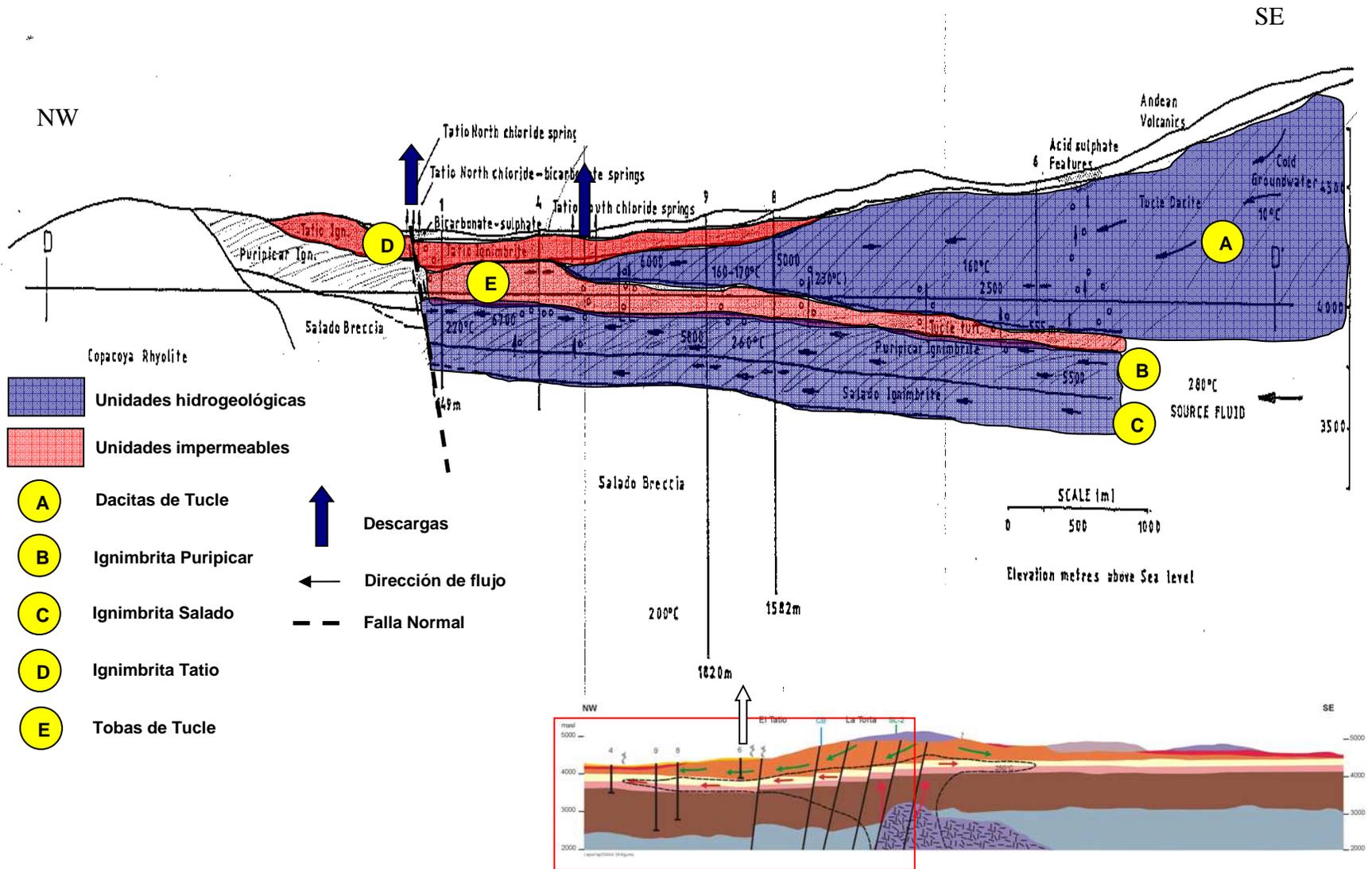


Figura 3.13.- Unidades Hidrogeológicas de la zona de estudio (*)



(*) Modificado de Youngman, 1984.

3.4 Hidrogeoquímica

Los estudios de caracterización hidrogeoquímica de las aguas del sistema geotermal el Tatio, han permitido mejorar la comprensión de la dinámica del acuífero y de las posibles fuentes de recarga.

De los antecedentes obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones;

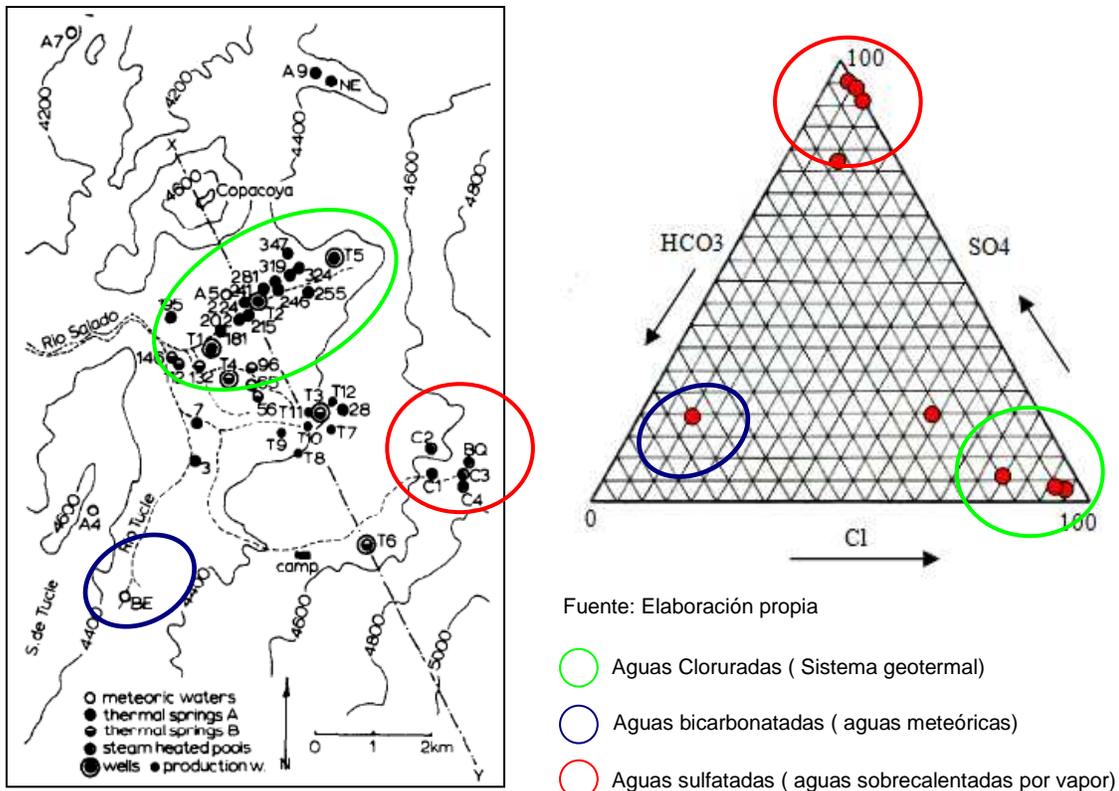
- ✓ Las manifestaciones superficiales de las zonas norte, sur y oeste del sistema geotermal presentan altos contenidos de cloruros, lo que estaría asociado al reservorio principal del sistema. Por otra parte, las vertientes de la zona este del sistema contienen menos cloruros que el resto de las manifestaciones superficiales, por lo que corresponderían a aguas meteóricas sobrecalentadas por vapor³, de acuerdo con lo señalado por Cusicanqui (1975).
- ✓ Parte del drenaje cerca de la superficie en el este se infiltra en un acuífero superficial ubicado bajo las zonas al sur y oeste, diluyendo las aguas con alto contenido de cloruro que vienen de niveles más profundos. Las aguas relativamente altas en cloruro hacia el Oeste en las cercanías del río Salado sugieren un flujo ascendente que ya considera los efectos de dilución.
- ✓ De acuerdo con los análisis isotópicos (Cusicanqui, 1975), aguas meteóricas frías, provenientes de lluvia o nieve, al este y/o al sureste del Tatio, (15-20 km desde el campo geotermal hasta el sector probable de recarga) penetran bajo los Andes hasta una profundidad desconocida y se mueven hacia el Oeste y el Noroeste con un gradiente hidráulico en dirección hacia el mar. Las aguas son calentadas por calor residual del volcanismo local y son desviadas hacia arriba a través de estructuras permeables. El agua caliente llega a la superficie y el vapor calienta aguas meteóricas justo al Este del Tatio. El agua entra a la cuenca a 800-1000 m de profundidad, donde es confinada a dos acuíferos, ambos confinados por rocas relativamente impermeables. Esto constituiría una recarga externa al sistema.
- ✓ La dilución en acuíferos profundos (Ign Puripicar, Ign Salado) es pequeña o no ocurre, particularmente en zonas donde el acuífero de las Dacitas de Tucle no está presente.
- ✓ Las Dacitas de Tucle contienen agua fría, que se originan por precipitaciones en los flancos de los Andes (constituye una recarga local al sistema), y que se mezclan con el agua caliente que asciende. La temperatura de la mezcla es controlada por las cantidades de agua fría y caliente y las temperaturas respectivas.
- ✓ Las concentraciones de cloruro y temperaturas en el centro de la cuenca sugieren que el agua caliente que asciende e ingresa a las dacitas de Tucle es el doble de las aguas frías que ingresan a las dacitas producto de la recarga local. Las temperaturas en las dacitas de Tucle están controladas por este mecanismo de mezcla, pero a profundidades equivalentes en otras partes de la cuenca las temperaturas son controladas por la permeabilidad entre la Ignimbrita Puripicar y la superficie y la pérdida de calor conductivo.

³ Steam-heated meteoric Waters (Cusicanqui, 1975).

- ✓ El contenido de Tritio de una muestra representativa de las aguas no diluidas de El Tatio corresponde a 3.2 UT, lo que refleja una recarga activa (Cusicanqui, 1975), posterior al inicio de pruebas nucleares iniciadas en la década de los 50.

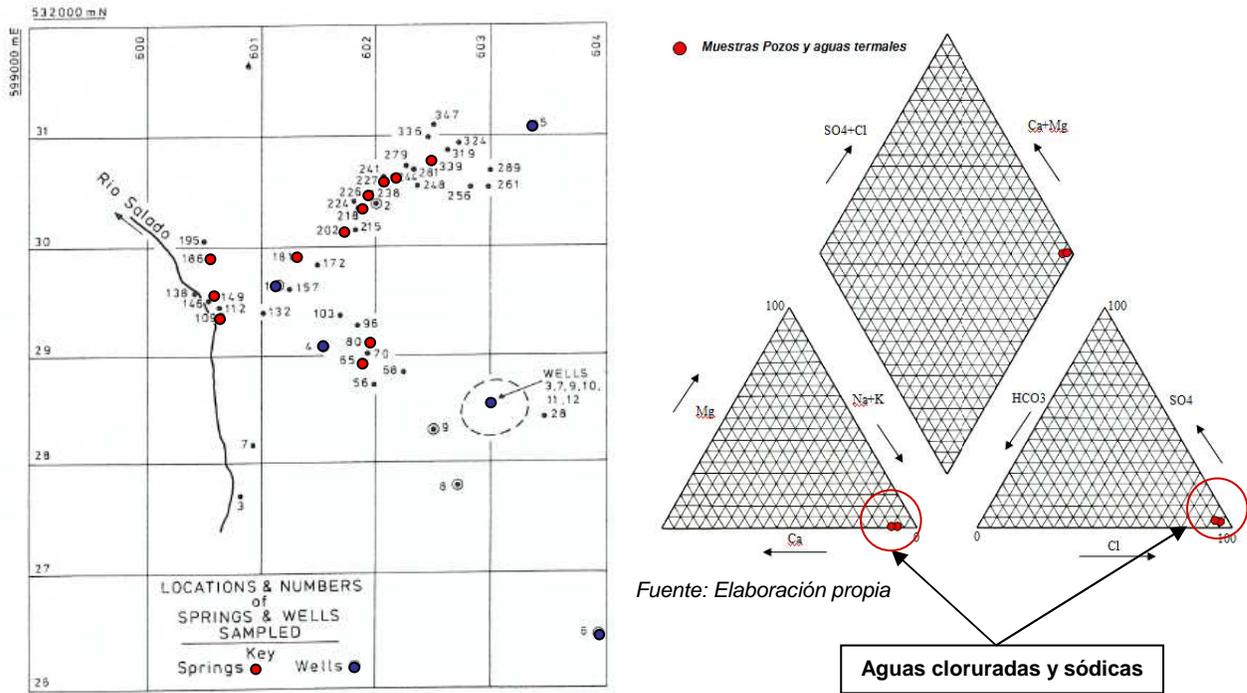
Las figuras siguientes muestran la ubicación de los puntos de muestreo utilizados en conjunto con los resultados obtenidos de la clasificación de aguas en distintos estudios. Estos estudios arrojaron resultados similares, lo que puede ser visualizado en los diagramas de Piper realizados. Se observa que las aguas meteóricas corresponden a aguas bicarbonatadas, a diferencia de las manifestaciones termales concentradas en la zona de descarga norte y las aguas de los pozos (Figura 3.15), las cuales corresponden a aguas cloruradas propias de un sistema geotermal. Las manifestaciones observadas en la zona este del sistema (Figura 3.14) corresponden a aguas sulfatadas sobrecalentadas por vapor.

Figura 3.14.- Ubicación de puntos de muestreo según Giggenbach (1978) y clasificación según diagrama de Piper



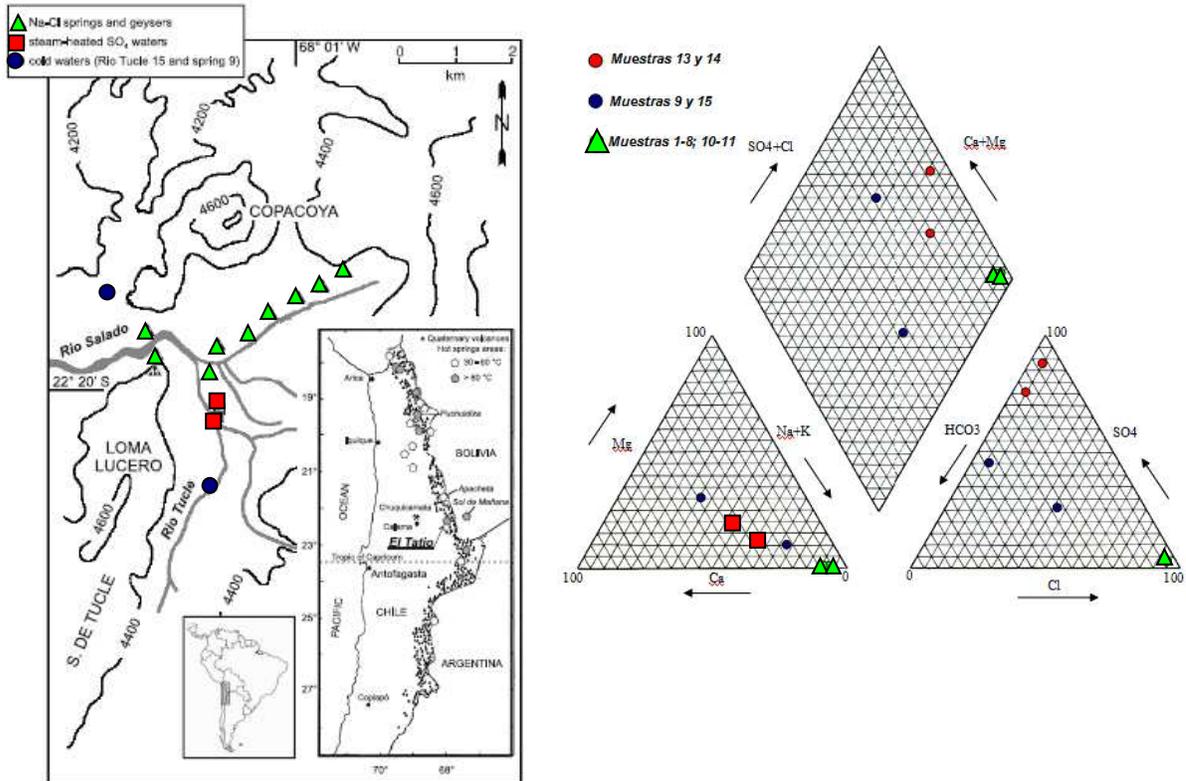
Fuente: Modificado de Giggenbach, 1978.

Figura 3.15.- Ubicación de puntos de muestreo según Cusicanqui (1975) y clasificación según diagrama de Piper



Fuente: Modificado de Giggenbach, 1975.

Figura 3.16.- Ubicación de puntos de muestreo según Cortecci (2005) y clasificación según diagrama de Piper



Fuente: Modificado de Cortecci, 2005.

3.5 Balance hídrico

Para establecer un balance hídrico estimativo del sistema, se recopilaron estadísticas de estaciones hidrometeorológicas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) en la zona de estudio, además del uso de estudios relacionados con recargas en zonas altiplánicas. El propósito de este balance fue estimar las entradas y salidas del sistema en el largo plazo, para lo cual se utilizaron todos los registros existentes para cada variable analizada de forma de reflejar en la medida de lo posible una condición media de la hidrología de la cuenca en estudio. Esto conlleva a utilizar información que no necesariamente se asocia a registros de períodos concurrentes, pero que sin embargo permite generar una estimación gruesa del balance del sistema.

3.5.1 Antecedentes hidrometeorológicos

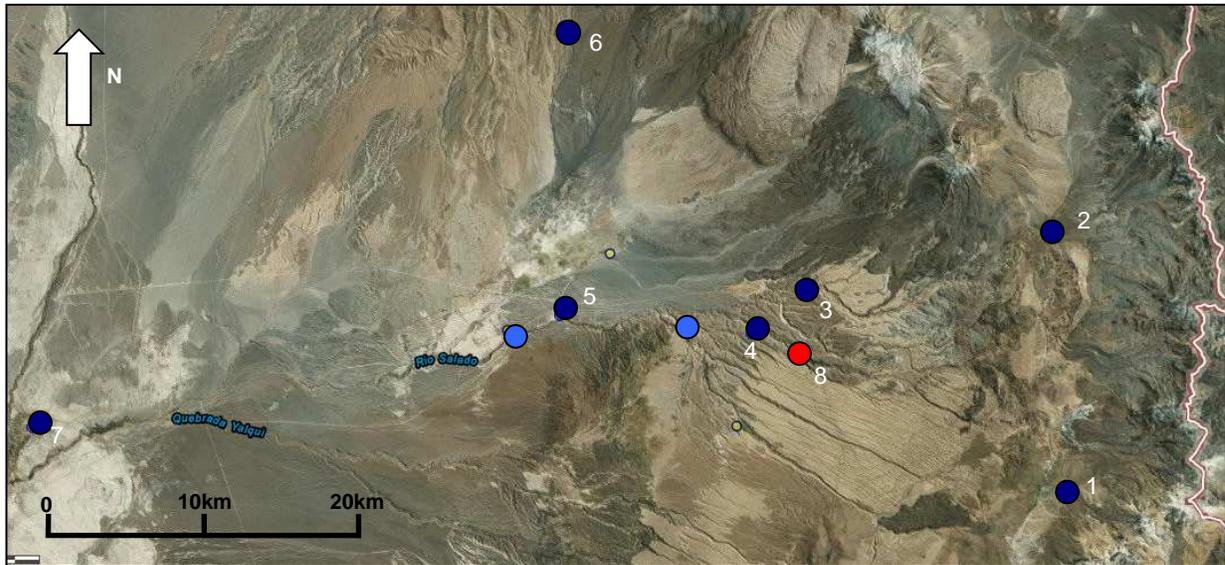
La Tabla 3.1 resume las características de las estaciones hidrometeorológicas consultadas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA), cuya ubicación se presenta en la Figura 3.17.

Tabla 3.1.- Características de las estaciones hidrometeorológicas

N°	CODIGO BNA	TIPO ESTACION	Nombre	UTM ESTE [m]	UTM NORTE [m]	Período registros	Cota [msnm]
1	02105022-9	Pluviométrica	El Tatio	601377	7525377	1977-2016	4370
2	02105016-4	Pluviométrica	Linzor-DCP	600506	7541035	1973-2016	4100
3	02105017-2	Pluviométrica	Toconce	584970	7537868	1972-2016	3310
4	02105020-2	Pluviométrica	Salado Embalse	581921	7534963	1975-2016	3200
5	02105018-0	Pluviométrica	Ayquina	570021	7536179	1967-2016	3031
6	02105014-8	Pluviométrica	Cupo-DCP	570273	7553931	1978-2016	3370
7	02104010-K	Pluviométrica	Chiu-Chiu	537208	7529354	1974-2016	2524
8	02105003-2	Fluviométrica	Río Salado antes represa Chilex	583836	7534431	1975-1979	3340

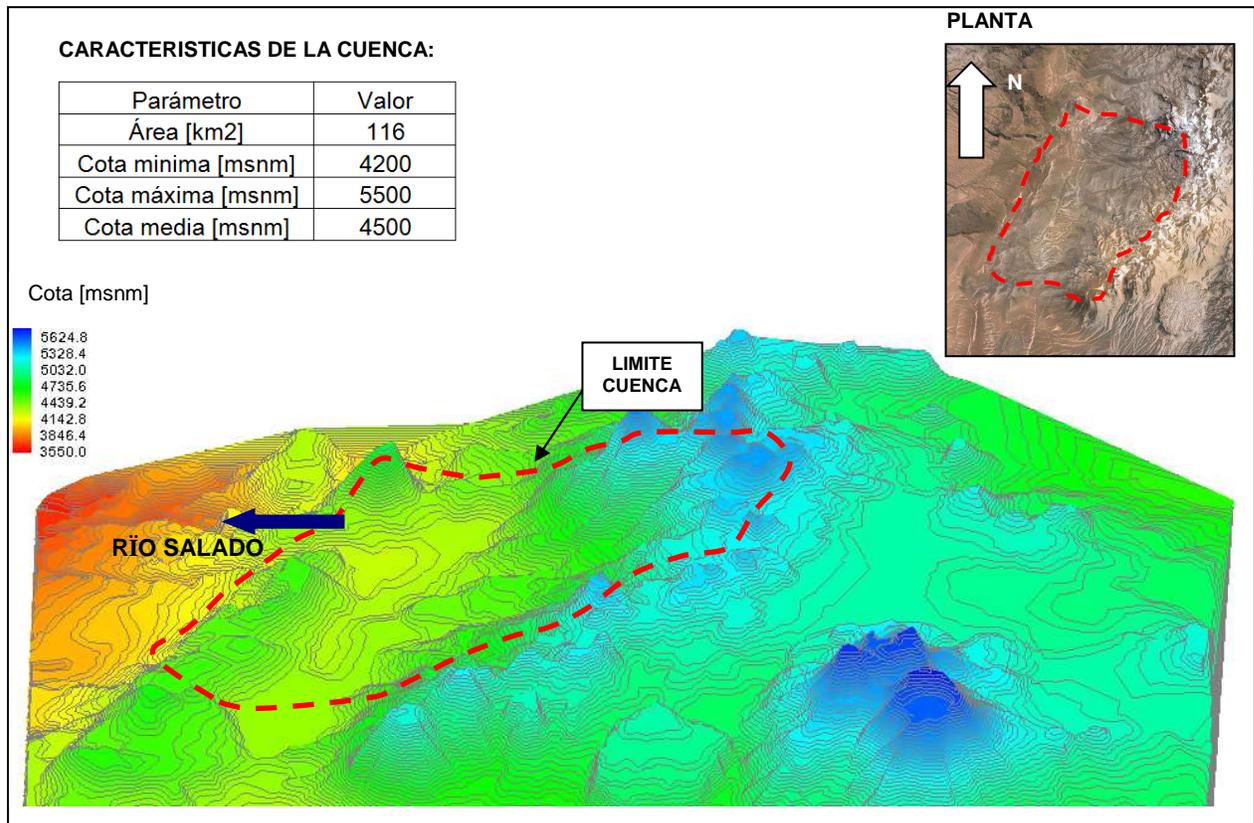
La Figura 3.18 muestra la cuenca hidrográfica utilizada para el análisis hidrológico, la cual está definida en el río Salado aguas abajo de la descarga del sistema geotermal. La base topográfica utilizada para delimitar la cuenca y sus características fue obtenida de las cartas IGM Cupo, Inacaliri, Linzor, Aiquina, Toconce y Cerro de Toporcuri, todas ellas con escala 1:50.000. La zona en estudio abarca la cuenca del Río Salado aguas abajo de la descarga del sistema geotermal.

Figura 3.17.- Ubicación de estaciones pluviométricas y fluviométricas



- Estaciones pluviométricas utilizadas
- Estaciones fluviométricas
- 1.-El Tatio 5.-Ayquina
- 2.-Linzor-DCP 6.-Cupo-DCP
- 3.-Toconce 7.-Chiu-Chiu
- 4.- Salado Embalse
- 8.- Río Salado antes represa Chilex
- Estaciones pluviométricas no utilizadas (Registro de datos escaso)

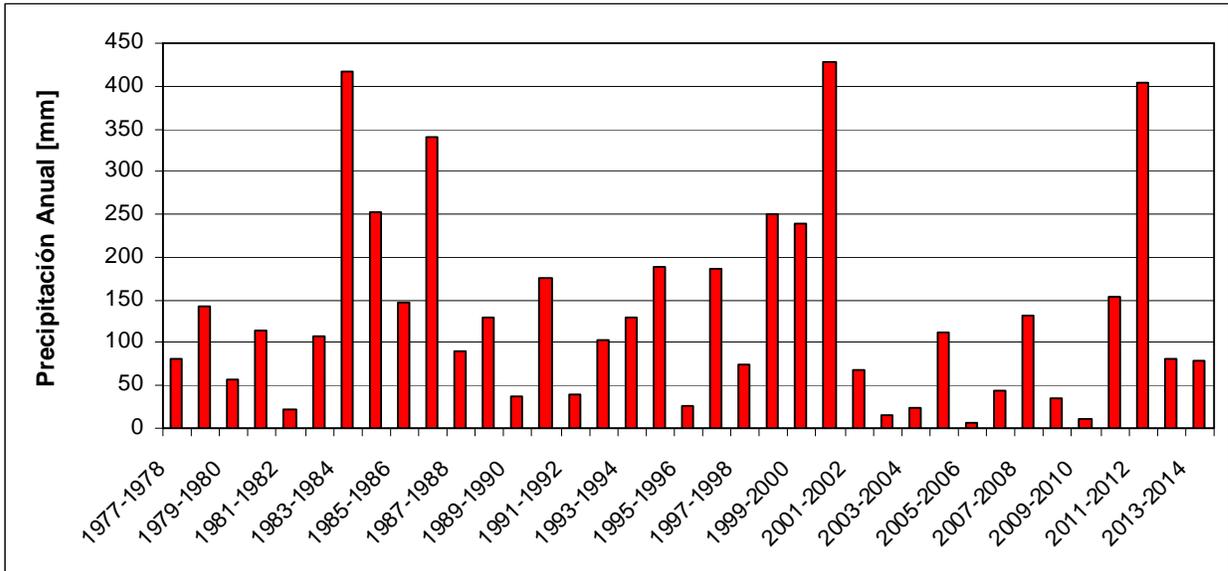
Figura 3.18.- Ubicación y características de la cuenca hidrográfica en estudio



3.5.2 Análisis de precipitaciones en la zona de estudio

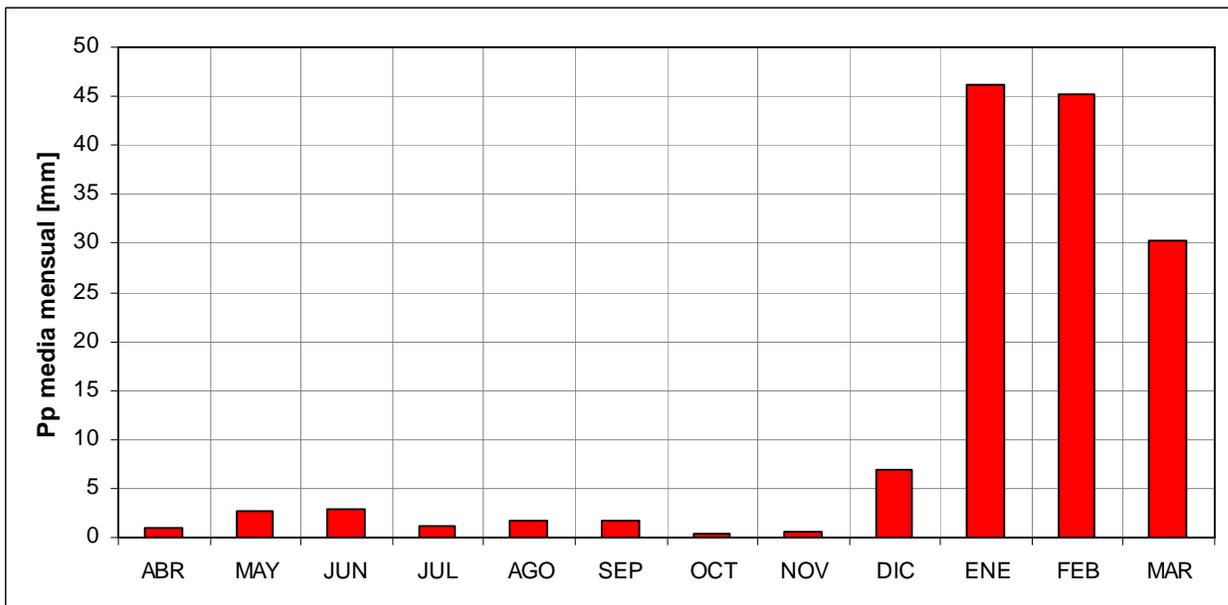
La Figura 3.19 muestra la evolución de las precipitaciones anuales en la estación pluviométrica El Tatio.

Figura 3.19.- Precipitaciones anuales en estación pluviométrica El Tatio (Período 1977-2014)



La Figura 3.20 muestra la variación estacional de las precipitaciones medias mensuales, observándose que las precipitaciones se concentran en el período de verano, lo que está asociado al fenómeno de “invierno boliviano”, propio de zonas altiplánicas.

Figura 3.20.- Precipitaciones medias mensuales Estación Pluviométrica El Tatio



Para estimar la precipitación media anual en la cuenca hidrográfica en estudio, se utilizó una relación de precipitación- altura considerando los datos de precipitación media anual registrados en otras estaciones de la zona. De esta forma, conociendo la cota media de la cuenca, se tendrá una estimación representativa de la precipitación media.

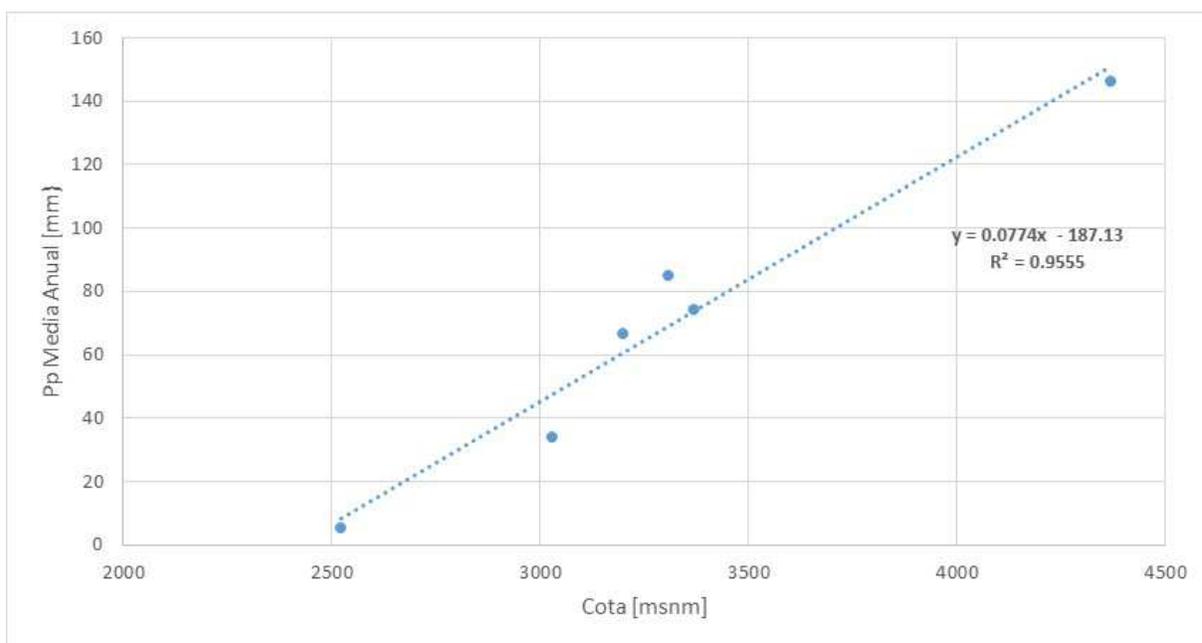
La Figura 3.21 muestra la relación de precipitación-altura obtenida. Los datos de precipitación anual de las estaciones utilizadas en el análisis se presentan en el Anexo B.

Tabla 3.2.- Precipitaciones medias anuales

ESTACION	Cota [msnm]	Pp Anual (*) [mm]
Linzor	4100	149
Toconce	3310	85
Salado Embalse	3200	67
Ayquina	3031	34
Cupo	3370	74
Chiu-Chiu	2524	5
El Tatio	4370	146

(*) Corresponden a precipitaciones medias anuales considerando el relleno de datos faltantes.

Figura 3.21.- Gradiente precipitación- altura en la zona de estudio (*)



(*) Estación Linzor fue descartada de la correlación ya que esta se ajusta mejor a la precipitación media anual de la estación El Tatio.

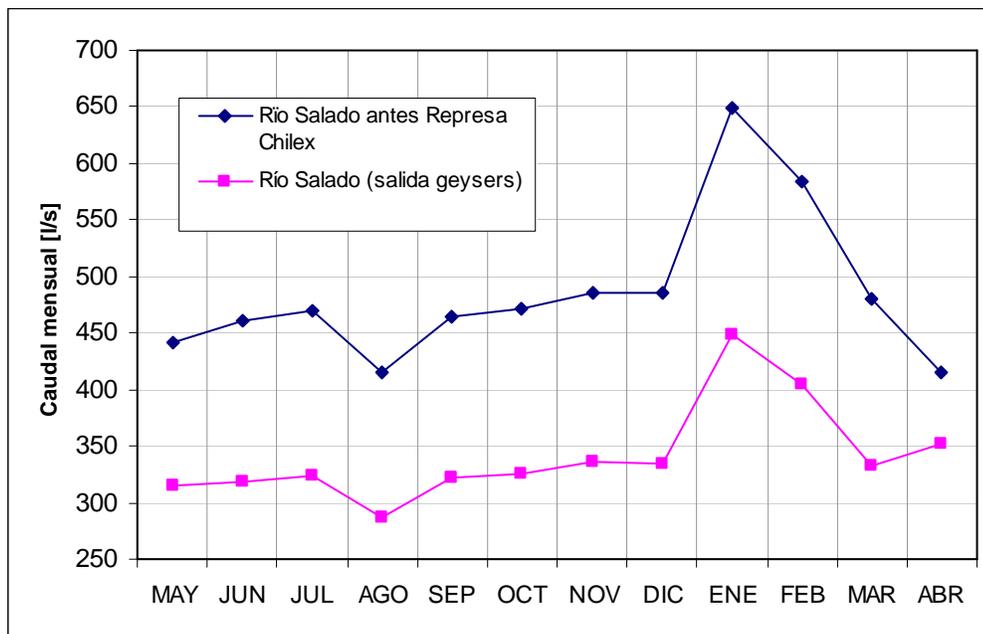
Utilizando la relación obtenida se obtiene una precipitación media anual estimada de 160 mm.

3.5.3 Análisis de caudales en la zona de estudio

Los caudales medidos en la cuenca del río Salado corresponden a aforos realizados en el período 1968-1976 en diversos puntos. Considerando que la mayor cantidad de información se concentra en la ubicación del río Salado antes de represa Chilex, se utilizaron estos caudales medidos para estimar los caudales de salida de la cuenca en estudio.

Utilizando un factor de transposición por unidad de área de cuenca hidrográfica aportante, se estimaron los caudales en la salida de la cuenca hidrográfica en estudio, los cuales se muestran en la Figura 3.22. A partir de estos valores se estima un caudal medio anual aproximado de 350 l/s, lo que correspondería a la suma de los aportes provenientes por una parte de la descarga del sistema subterráneo y, por otra, a los aportes superficiales y subterráneos propios de la cuenca. De la figura se desprende además, que los caudales mayores se concentran en los meses de verano producto del aumento de precipitaciones en dicho período. Debe tenerse en consideración que la información registrada es escasa, por lo que los caudales medios mensuales corresponden a una estimación gruesa.

Figura 3.22.- Caudales medios mensuales estación Río Salado



3.5.4 Estimación de la recarga

a) Metodología de estimación de la recarga

De acuerdo con lo señalado en la Sección 3.4, existiría una recarga proveniente desde el sureste del Tatio que entraría a la cuenca a aproximadamente 800-1000 m de profundidad. Esta recarga constituye un aporte externo que no es atribuible a recursos hídricos propios de la cuenca y correspondería a la recarga principal del sistema geotermal. En forma adicional a esta recarga, existiría un aporte local originado por las precipitaciones sobre la cuenca que genera una mezcla de agua fría con el agua caliente que asciende en la unidad correspondiente a las dacitas de Tucle. Para estimar ambas recargas se utilizará un balance hídrico global y subterráneo de la cuenca, estableciendo las entradas y salidas de cada sistema.

Al plantear un balance hídrico global de la cuenca se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\Delta V_T}{\Delta t} = P + R_{EXT} - E - Q_{ma}$$

donde:

- ΔV_T : Variación en el volumen de almacenamiento del sistema
- Δt : Variación en el tiempo
- P : Precipitación media anual
- R_{EXT} : Recarga externa
- E : Evaporación promedio
- Q_{ma} : Caudal medio anual Río Salado aguas abajo de geysers

Considerando que la situación promedio puede ser asimilable a un balance en el largo plazo, la variación en el volumen de almacenamiento tiende a ser nula, por lo que la expresión se reduce a lo siguiente:

$$R_{EXT} = E + Q_{ma} - P$$

Por otra parte, al plantear un balance hídrico del sistema subterráneo profundo, asociado al sistema geotermal, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\Delta V_S}{\Delta t} = R_{LOCAL} + R_{EXT} - Q_{AFS}$$

Donde:

- ΔV_T : Variación en el volumen de almacenamiento del sistema
- Δt : Variación en el tiempo
- R_{LOCAL} : Recarga local al sistema geotermal
- R_{EXT} : Recarga externa al sistema geotermal
- Q_{AFS} : Caudal medio anual de descarga del sistema geotermal

Análogamente al balance global de la cuenca, la variación en el volumen del almacenamiento en el acuífero tiende a ser nula, por lo que se obtiene la siguiente expresión:

$$R_{LOCAL} = Q_{AFS} - R_{EXT}$$

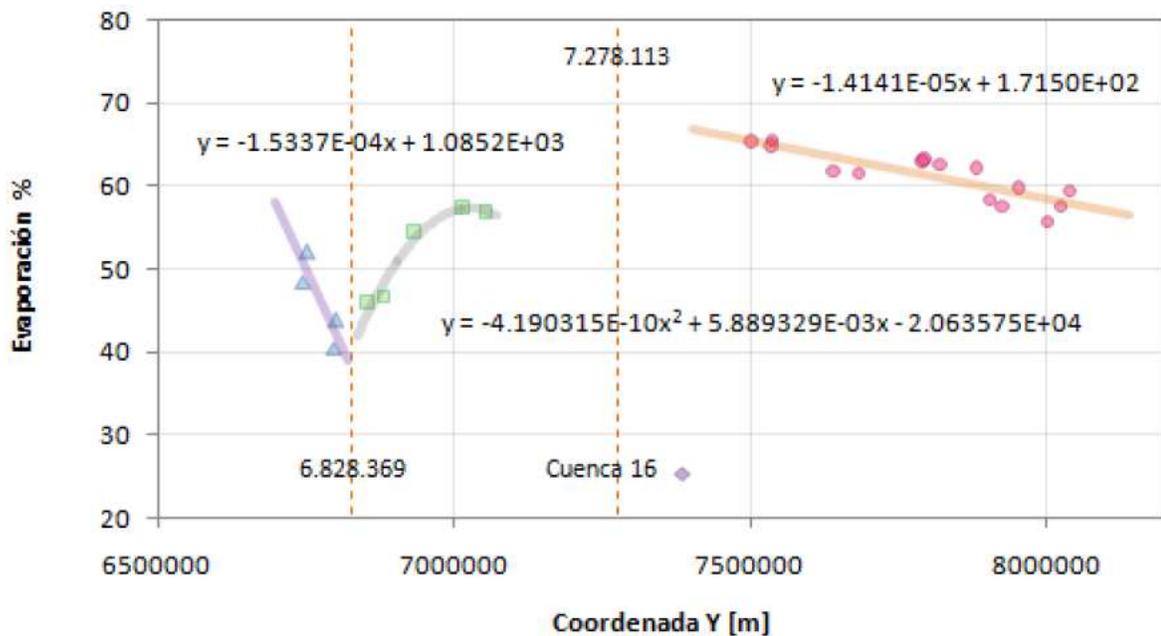
En resumen, el balance global de la cuenca permite estimar la recarga externa del sistema conocida la precipitación promedio de la cuenca y la evaporación promedio. Luego, el balance subterráneo permite estimar la recarga local conociendo el caudal subterráneo de salida del sistema en conjunto con la recarga externa.

Para estimar la evaporación promedio de la cuenca se utilizó el estudio “Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica”, elaborado por GCF Ingenieros el año 2010 para la Dirección General de Aguas (DGA). En dicho estudio, en base al análisis de diversas cuencas de características altiplánicas, se derivaron expresiones que relacionan el porcentaje de evaporación en relación a la precipitación anual con la ubicación de la cuenca, específicamente con la coordenada norte de esta.

La Figura 3.23 resume gráficamente las expresiones derivadas del estudio señalado, observándose que para la cuenca en estudio resulta aplicable la siguiente relación:

$$Ev [\%] = -1.4141 \cdot 10^{-5} \cdot Y + 171.5$$

Figura 3.23.- Expresiones utilizadas para evaluar el porcentaje de evaporación de una cuenca en función de su coordenada Norte (*)



(*) Fuente: Estudio “Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica”, GCF 2010 para la DGA.

El caudal de salida promedio del sistema geotermal, asociado a las manifestaciones propias de este, fue obtenido directamente de la fuente: “Estudio para el desarrollo geotérmico en el norte de Chile, Alcances Hidrogeología y Manifestaciones Termales (1969)”. En dicho estudio, a partir de mediciones obtenidas en distintas manifestaciones se obtuvo que el caudal total de salida del sistema fluctúa entre 200 y 250 l/s aproximadamente.

El análisis considera los siguientes supuestos:

- La evapotranspiración del sistema es despreciable en relación a la evaporación.
- Los sistemas subterráneos locales descargan a los escurrimientos superficiales existentes en la cuenca, lo que implica que el caudal de salida del río Salado refleja el aporte tanto de los recursos superficiales y subterráneos propios de la cuenca como el aporte de los flujos provenientes del sistema geotermal.

Para determinar el caudal superficial se consideró un coeficiente de escorrentía del 12%, el cual fue obtenido del estudio de GCF (2010).

b) Recarga estimada

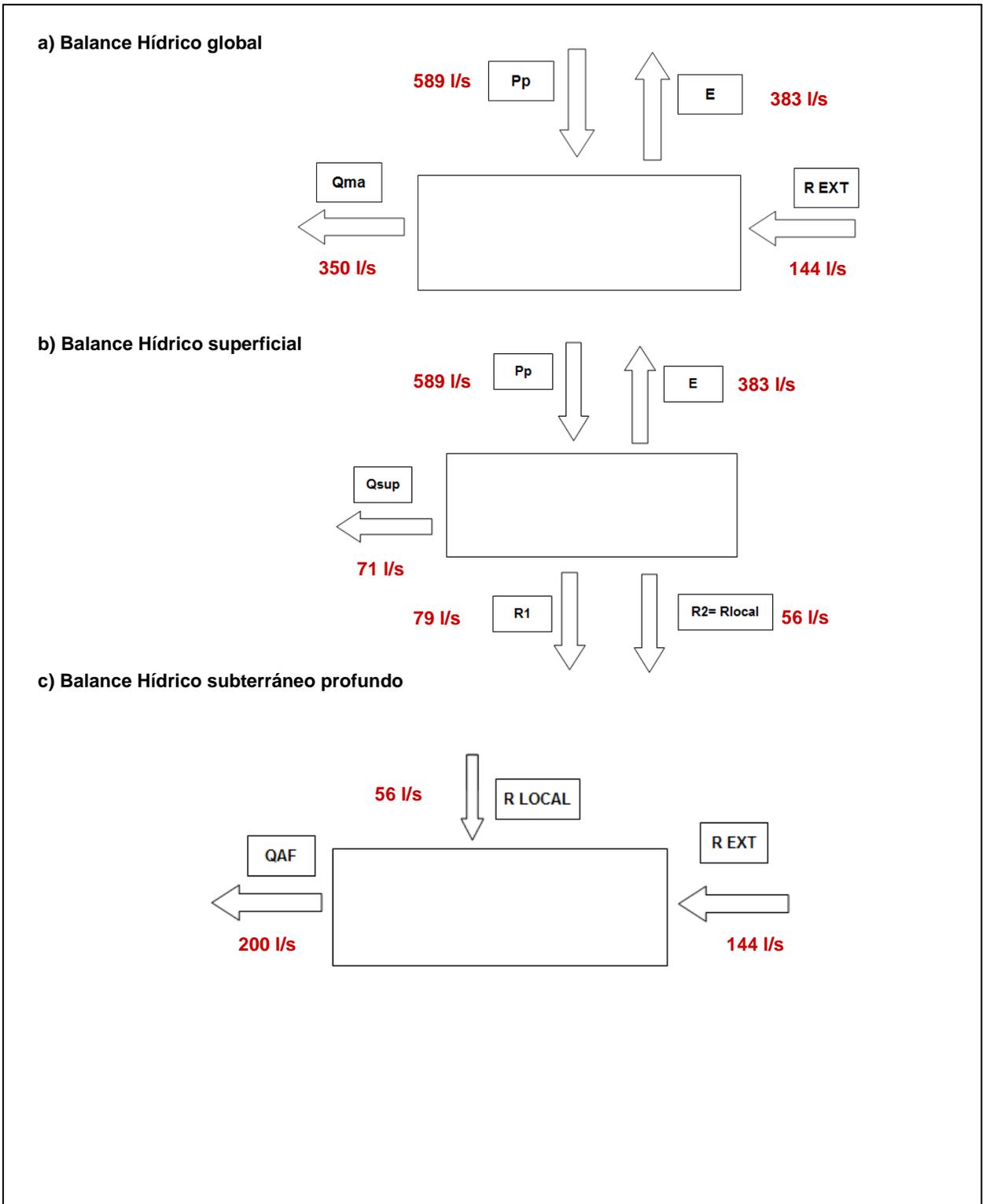
A continuación se presentan los resultados obtenidos:

- **Precipitación media anual (P):** Corresponde a 160 mm/año, equivalente a 589 l/s, de acuerdo a lo estimado en la Sección 3.5.2.
- **Evaporación media anual (E):** Considerando la coordenada Norte de la cuenca en estudio, al evaluar la expresión derivada del estudio de GCF, se obtiene un porcentaje de evaporación equivalente a 65% de la precipitación anual. Luego, la evaporación media anual en mm corresponde a 104 mm/año, equivalente a 383 l/s.
- **Caudal de salida Río Salado (Q_{ma}):** Corresponde a 350 l/s de acuerdo a lo estimado en la sección 3.5.3.
- **Caudal de salida sistema geotermal (Q_{afs}):** De acuerdo con lo señalado en la sección anterior este valor se encontraría en el rango 200-250 kg/s, adoptándose para el presente análisis un valor de 200 l/s.
- **Recarga externa (R_{ext}):** Utilizando la expresión derivada del balance hídrico del sistema se estima una recarga externa de 144 l/s. Se adopta un valor de 145 l/s.
- **Recarga local (R_{local}):** Utilizando la expresión derivada del balance hídrico del sistema se estima una recarga externa de 56 l/s. Se adopta un valor de 55 l/s.

c) Balance hídrico

La Figura 3.24 resume los balances realizados, incluyendo el balance hídrico superficial de la cuenca.

Figura 3.24.- Balance hídrico estimado



3.6 Fuente de calor

Desde el punto de vista geodinámico, el sistema geotermal El Tatio corresponde a un sistema controlado por un ambiente tectónico de convergencia de placas, donde existe subducción de una placa continental (Nazca) por debajo de otra placa continental (Sudamericana). Esto ha generado un arco magmático que a su vez ha derivado en una franja volcánica Pliocena-Cuaternaria desarrollada a lo largo de la Cordillera de los Andes. De acuerdo con Lahsen (1976), lo anterior permite suponer que la fuente de calor que genera la actividad geotermal proviene de este magmatismo reciente.

De acuerdo con lo señalado por Muñoz (1987), en el área del Tatio, el flujo de calor combinado debido a conducción y convección, corresponde a 1465 mW/m^2 con fluidos circulando en profundidad de hasta aprox. 1 km. Por otra parte, de acuerdo con lo señalado en el modelo conceptual establecido por Youngman (1984), existiría un flujo lateral ingresando a las unidades permeables con una temperatura estimada de 280°C .

Considerando lo anterior y teniendo en cuenta que el flujo de calor estimado por Muñoz corresponde a un flujo combinado, para efectos del modelo se utilizarán dos entradas de calor. La primera corresponde al flujo lateral establecido por Youngman y la segunda fuente corresponde a un flujo de calor basal de 60 mW/m^2 , de forma de considerar sólo los efectos asociados al flujo por conducción por la base. Este valor proviene de la revisión bibliográfica de diversos modelos en los cuales el rango de flujo basal varía entre 60 y 120 mW/m^2 (Kiryukhin, Jalininasrabady, Moulding, Clearwater, TOUGH2 Symposium 2012).

3.7 Exploración geofísica

Como parte de las labores de exploración del sistema geotermal, se efectuaron campañas de exploración geofísica entre los años 1968 a 1974. En particular, se utilizaron prospecciones basadas en métodos eléctricos para determinar la extensión en profundidad del reservorio geotermal. Se efectuaron tres levantamientos de resistividad empleando configuraciones del tipo Shlumberger con $AB/2 = 250, 550$ y 1000 m (AB: distancia entre electrodos de corriente).

De acuerdo con lo señalado por Lahsen y Trujillo (1975). Los resultados obtenidos indican que existe una anomalía de baja resistividad de aproximadamente $10 \Omega\text{-m}$ en una extensión de 30 km^2 , la cual se presenta alongada en sentido norte-sur, lo que estaría asociado a la presencia de flujos salinos y de alta temperatura.

3.8 Resumen del modelo conceptual

Se presenta a continuación un resumen de los antecedentes que constituyen la base del modelo conceptual del sistema geotermal El Tatio.

Hidrogeología: Las unidades Ignimbrita Puripicar e Ignimbrita Salado constituyen las unidades hidrogeológicas principales y de mayor temperatura del sistema. Ambos acuíferos disminuyen su temperatura gradualmente en la dirección principal del flujo, la cual es predominantemente SE-NW. La unidad hidrogeológica Dacitas de Tucle que sobreyace a la unidad Tobas de Tucle constituye un acuífero de menor temperatura debido a recarga local de aguas meteóricas frías, la cual se mezcla con aguas más calientes de la unidad Ignimbrita Puripicar. La mezcla entre ambos acuíferos se produciría por el ascenso vertical de flujo de la Ignimbrita Puripicar hacia las Dacitas

de Tucle por fracturas y/o vías preferenciales de escurrimiento. Las unidades Ignimbrita Tatio y Tobas de Tucle son impermeables o presentarían una permeabilidad muy baja en comparación con las unidades hidrogeológicas principales.

Zonas de descarga: Sistemas de fallas con orientaciones NW-SE y NE-SW condicionan la descarga del sistema y definen las zonas donde se concentra la actividad hidrotermal superficial (Lahsen y Trujillo, 1976). Estas zonas de descarga se pueden dividir en tres sectores: Zona Norte, Zona Sur y Zona Oeste.

Información de pozos: En la zona existen 13 pozos de exploración construidos en los años 70. Se cuenta con perfiles de temperatura registrados en los pozos 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10 y 12, y con perfiles de presión registrados en los pozos 2, 8, 9 y 12. Estos registros, que datan del período 1970-1975, constituyen la base para la calibración del modelo.

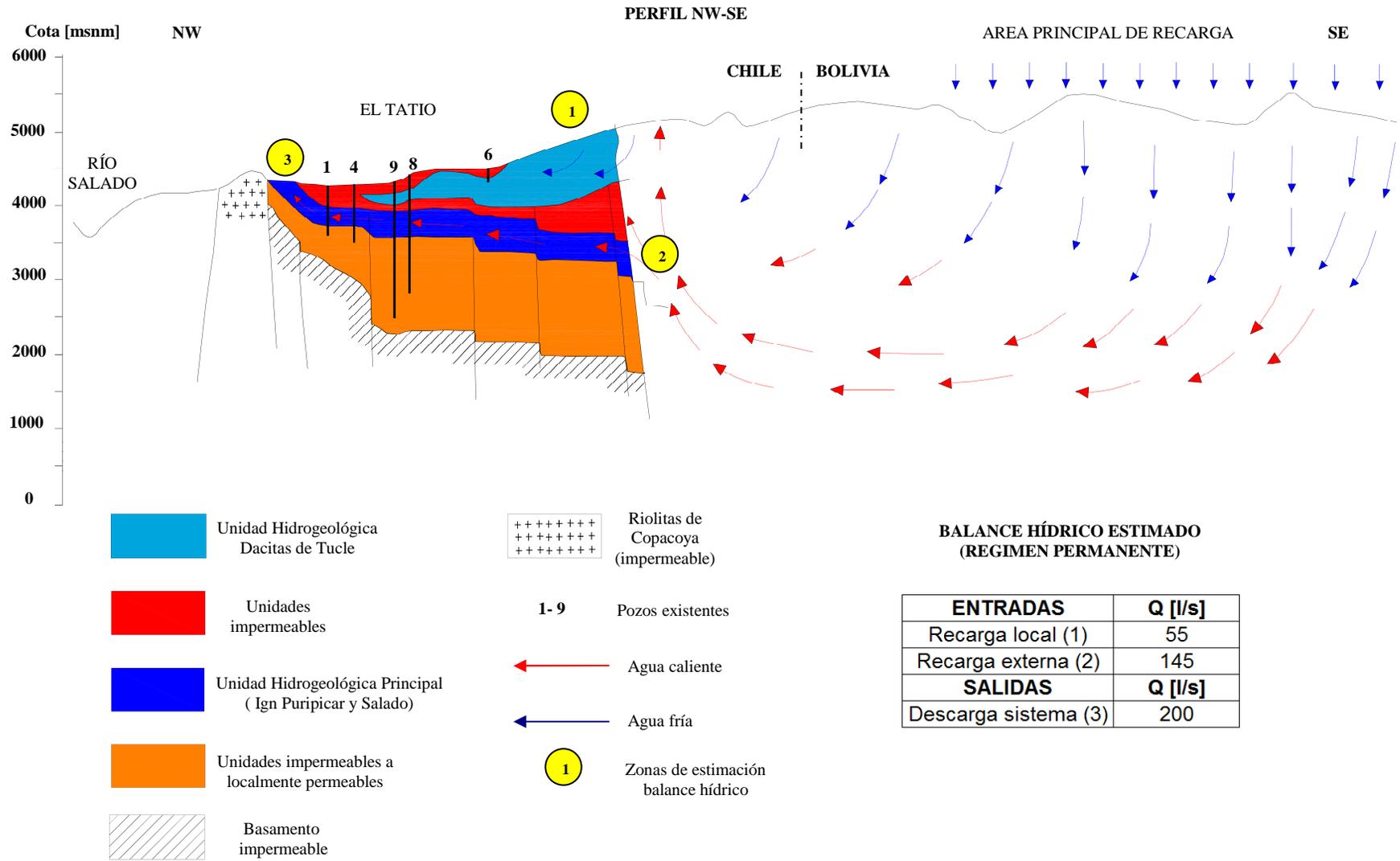
Hidrogeoquímica: Las manifestaciones superficiales de las zonas norte, sur y oeste del sistema geotermal presentan altos contenidos de cloruros, lo que estaría asociado al reservorio principal del sistema. Por otra parte, las vertientes de la zona este del sistema contienen menos cloruros que el resto de las manifestaciones superficiales, por lo que corresponderían a aguas meteóricas sobrecalentadas por vapor (Cusicanqui, 1975). Un muestreo de parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica y temperatura) realizado en mayo del 2014 como parte del presente trabajo, fue consistente con lo anterior.

Las dacitas de Tucle contienen agua fría originada por precipitaciones en los flancos de los Andes, que se mezcla con el agua caliente que asciende. La temperatura de la mezcla es controlada por las cantidades de agua fría y caliente y las temperaturas respectivas (Cusicanqui, 1975). Por otra parte, estudios isotópicos permiten estimar que las aguas meteóricas frías (lluvia o nieve) al este y/o al sureste del Tatio, penetran bajo los Andes hasta una profundidad desconocida y se mueven hacia el Oeste y el Noroeste siguiendo la dirección del gradiente hidráulico principal (Cusicanqui, 1975). Las aguas son calentadas por calor residual del volcanismo local y son desviadas hacia arriba a través de estructuras permeables, entrando a la cuenca a 800-1000 m de profundidad, donde es confinada a las unidades hidrogeológicas principales.

Balance Hídrico: Con el objetivo de estimar los caudales que entran y salen del sistema en un escenario de largo plazo (en el cual se considera que la variación en el almacenamiento tiende a ser nula), se elaboró un balance hídrico de la cuenca en estudio. Para esto se consideraron registros pluviométricos (estación El Tatio), registros fluviométricos (Estación Río Salado antes Represa Chilex) y datos existentes de aforos realizados en el punto de la salida de la cuenca y en las zonas de descarga del sistema geotermal (geysers y manifestaciones superficiales). Los resultados indican que existiría una recarga externa de aproximadamente 145 l/s al sistema subterráneo en estudio y una recarga local de aproximadamente 55 l/s, siendo el total de salida de las zonas de descarga equivalente a 200 l/s aproximadamente.

La Figura 3.25 resume los aspectos principales del sistema:

Figura 3.25.- Esquema del sistema Geotermal El Tatio (*)



(*) : Modificado de Estudio “Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica del campo geotermal ElTatio”, Figueroa 2013, basado en información proporcionada por Electroconsult (1975).

4. VISITA A TERRENO

Se efectuó una visita a terreno entre los días 25 y 27 de abril del 2014, en la cual se abordaron los siguientes aspectos:

- Reconocimiento general de la zona
- Identificación de pozos
- Muestreo de parámetros fisicoquímicos en manifestaciones superficiales.

4.1 Reconocimiento general de la zona

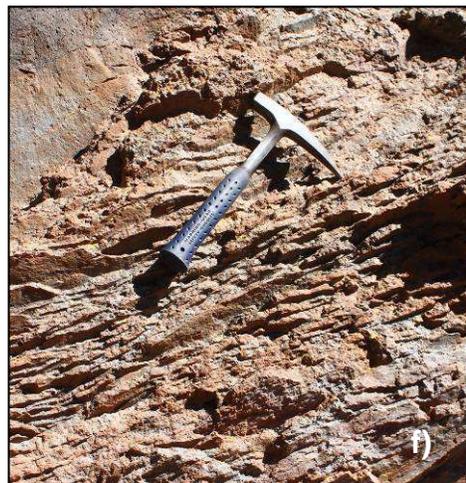
Se realizó una visita general de reconocimiento en la cual se identificaron y analizaron algunos afloramientos correspondientes a las unidades geológicas principales de la zona de estudio. En particular, se identificaron y se tomaron muestras asociadas a las unidades Ignimbrita Puripicar (unidad hidrogeológica principal), Ignimbrita Tatio (Unidad impermeable) y Dacitas de Tucle (unidad hidrogeológica secundaria). La Figura 4.1 muestra algunas fotografías de reconocimiento general, mientras que en la Figura 4.2 se muestran algunos de las unidades geológicas identificadas.

Figura 4.1.- Reconocimiento general de la zona de estudio



- a) Vista general de campo geotermal
- b) Vista general hacia el sureste.
- c) Manifestación superficial (sinter de sílice)
- d) Manifestación superficial (geyser)

Figura 4.2.- Reconocimiento de unidades geológicas principales



a, c) Afloramiento Ign. Puripicar
b) Muestra de mano Ign Puripicar
d) Muestra de mano Ign Tatio
e, f) Afloramiento Dacitas de Tucle

4.2 Identificación de pozos

Se identificó cada uno de los 13 pozos existentes con el objetivo de verificar coordenadas de ubicación para su representación en el modelo.

La Figura 4.3 muestra algunas de las fotografías tomadas en terreno. En general, se constató que las coordenadas de ubicación que se tenían como antecedentes coincidían con las tomadas en terreno con GPS. En aquellos casos en que había variaciones más significativas, se consideraron como válidas las coordenadas tomadas en terreno.

Figura 4.3.- Reconocimiento de pozos

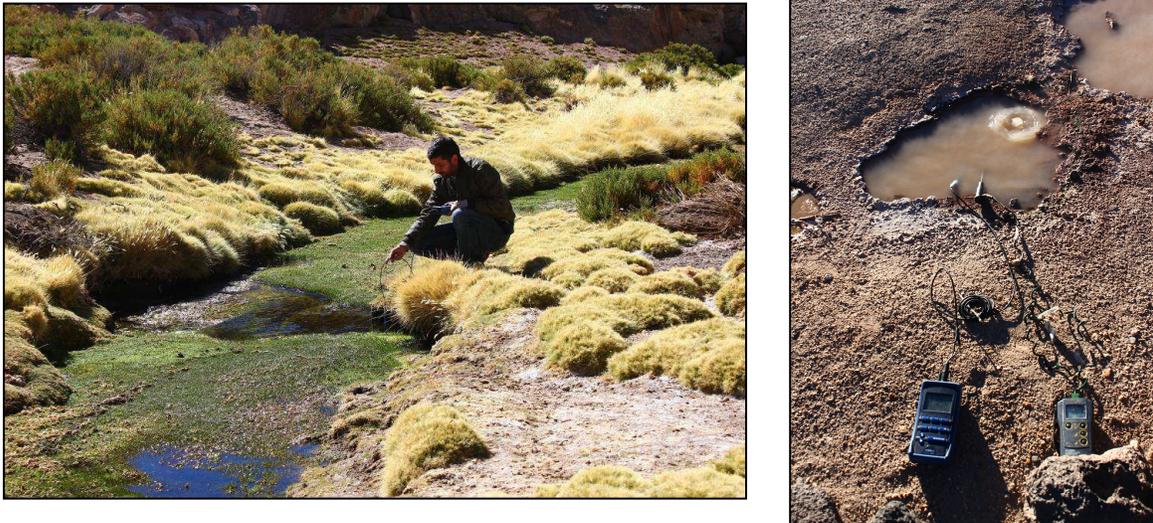


a) Pozo 1; b) Pozo 5; c) Pozo 6; d) Pozo 3; e) Pozo 4; f) Pozo 9; g) Pozo 7; h) Pozo 8

4.3 Muestreo de parámetros fisicoquímicos

Con el objetivo de verificar los resultados principales obtenidos en los diversos estudios hidrogeoquímicos analizados, se tomaron medidas de parámetros hidrogeoquímicos básicos (pH, temperatura y conductividad eléctrica) tanto en manifestaciones superficiales como en quebradas y escurrimientos superficiales. La Figura 4.4 muestra algunas de las fotografías tomadas en terreno, mientras que la Figura 4.5 resume la ubicación de los puntos muestreados y el rango de los datos obtenidos.

Figura 4.4.- Muestreo de parámetros fisicoquímicos

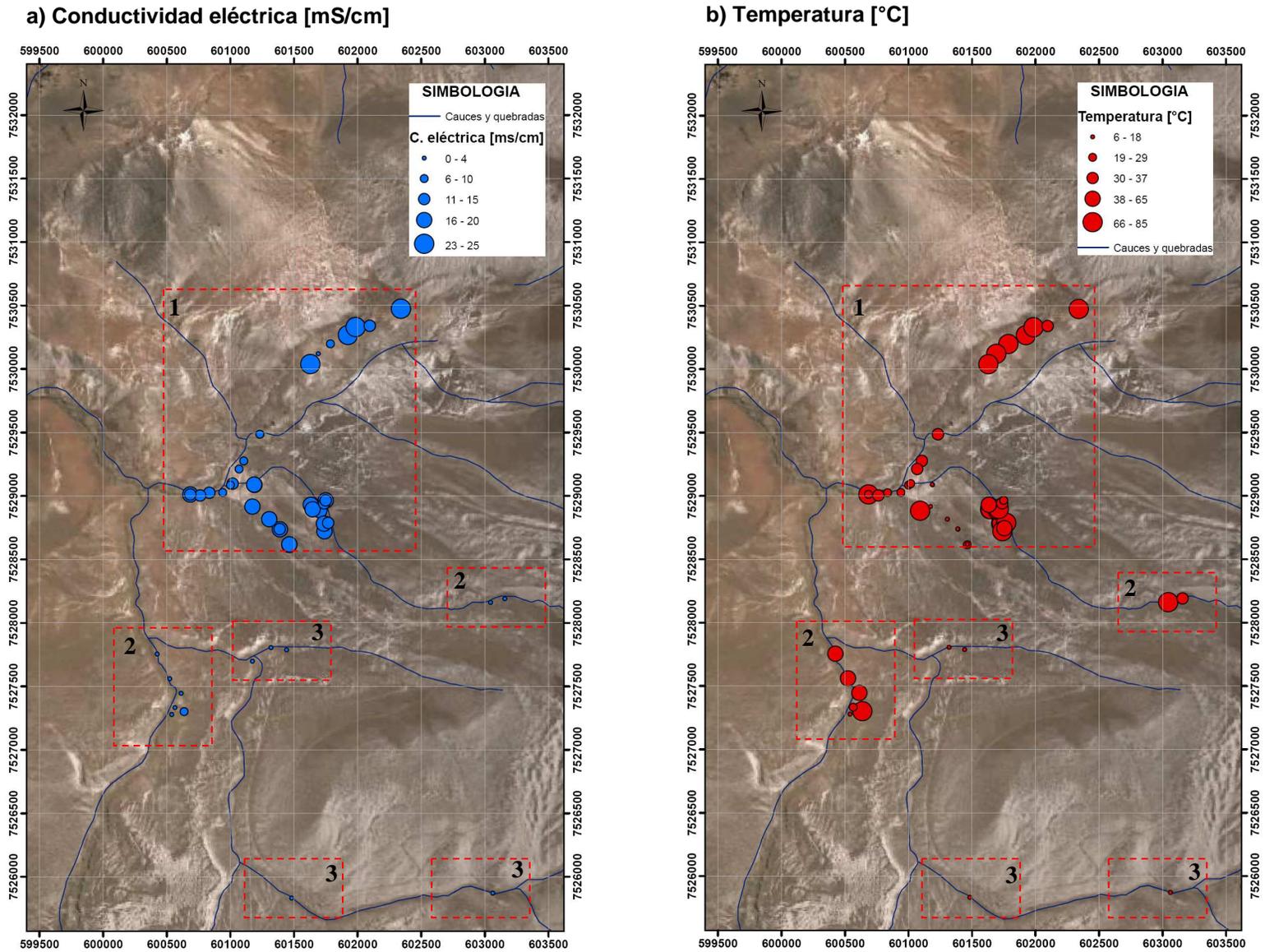


En líneas generales, y considerando que los datos tomados sólo corresponden a parámetros hidrogeoquímicos básicos, se puede concluir que existen tres tipos de aguas.

Las aguas muestreadas en la zona Centro-Norte (1) de la zona de estudio corresponden a aguas de altas temperaturas y alta conductividad eléctrica (CE). Las aguas muestreadas al Oeste y al Oriente (2) presentan temperaturas altas pero baja conductividad eléctrica. Finalmente, las aguas muestreadas hacia el sur y centro (3) presentan bajas temperaturas y baja conductividad. De acuerdo con esto y considerando los antecedentes hidrogeoquímicos las aguas tipo 1 corresponden a manifestaciones geotermales del acuífero profundo y a aguas superficiales con origen geotermal (manifestaciones geotermales que dan origen a escurrimientos superficiales). Las aguas tipo 2 corresponderían a aguas superficiales y manifestaciones geotermales sobrecalentadas por vapor y las aguas tipo 3 corresponden a aguas locales probablemente asociada al derretimiento de las nieve acumulada en la cuenca.

Los datos tomados en terreno se resumen en el Anexo C.

Figura 4.5.- Datos de Conductividad y Temperatura tomados en terreno



5. CONSTRUCCIÓN MODELO NUMERICO

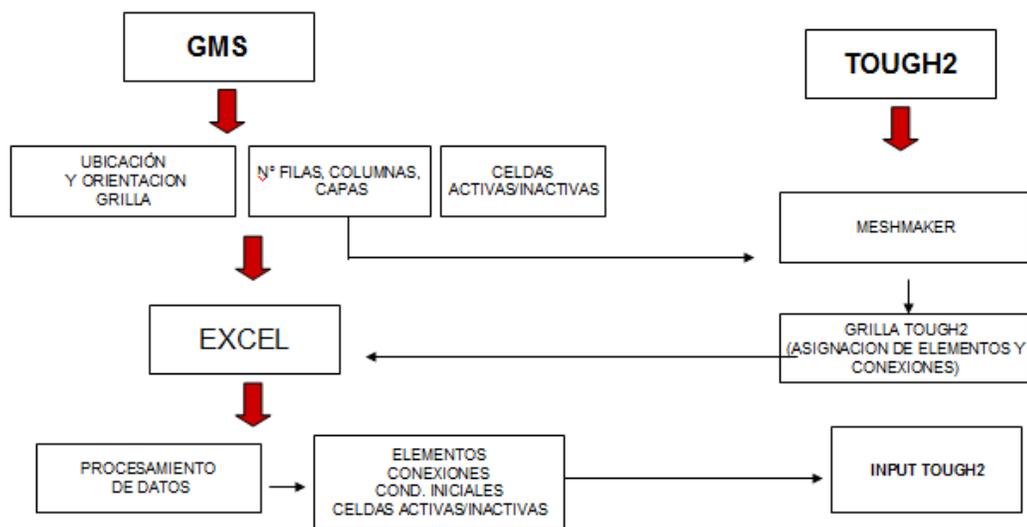
5.1 Metodología de construcción del modelo numérico

La construcción del modelo numérico se basó en la utilización del software GMS (Groundwater Modeling System, 8.0 Tutorial, desarrollado por Aquaveo) como herramienta de creación de la grilla numérica, en Microsoft Excel para el procesamiento de datos y en TOUGH2 (Pruess, 1999) para la resolución numérica del problema.

GMS es un software desarrollado por Aquaveo que permite construir y simular el flujo y transporte de masa en aguas subterráneas. Por otra parte TOUGH2 es una poderosa herramienta de modelación numérica, desarrollada por el LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) que permite calcular el flujo y transporte de masa y calor en sistemas hidrogeológicos y geotermiales.

La Figura 5.1 esquematiza los pasos utilizados para la construcción del modelo y la interacción entre las distintas plataformas consideradas.

Figura 5.1.- Esquema de construcción modelo numérico



5.2 Construcción grilla

La grilla de modelación se construyó utilizando el software GMS proporcionado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Este software tiene la ventaja de funcionar como sistema de información geográfica (SIG), en el sentido que permite ingresar distintas capas de información georeferenciada (base topográfica, ubicación de pozos, etc), lo que permite generar modelos conceptuales que luego pueden ser utilizados como base para la construcción de una grilla de modelación numérica. Además, el software permite incorporar columnas estratigráficas asociadas a pozos y definir unidades hidrogeológicas dependiendo de las características de cada estrato.

Para este estudio, se definió una zona de modelación rectangular que cubre una zona de aproximadamente 12 x 17 km, con una orientación NO-SE de forma que coincida con la dirección del flujo principal de aguas subterráneas.

La discretización horizontal de la grilla contempla 35 celdas en dirección x y 40 celdas en dirección y de dimensiones variables entre 100 y 600 m aproximadamente. Sobre la base de la grilla rectangular se definieron celdas activas e inactivas, donde las celdas activas abarcan la cuenca definida por el río Salado aguas abajo de la descarga de los geysers (Ver Figura 5.2).

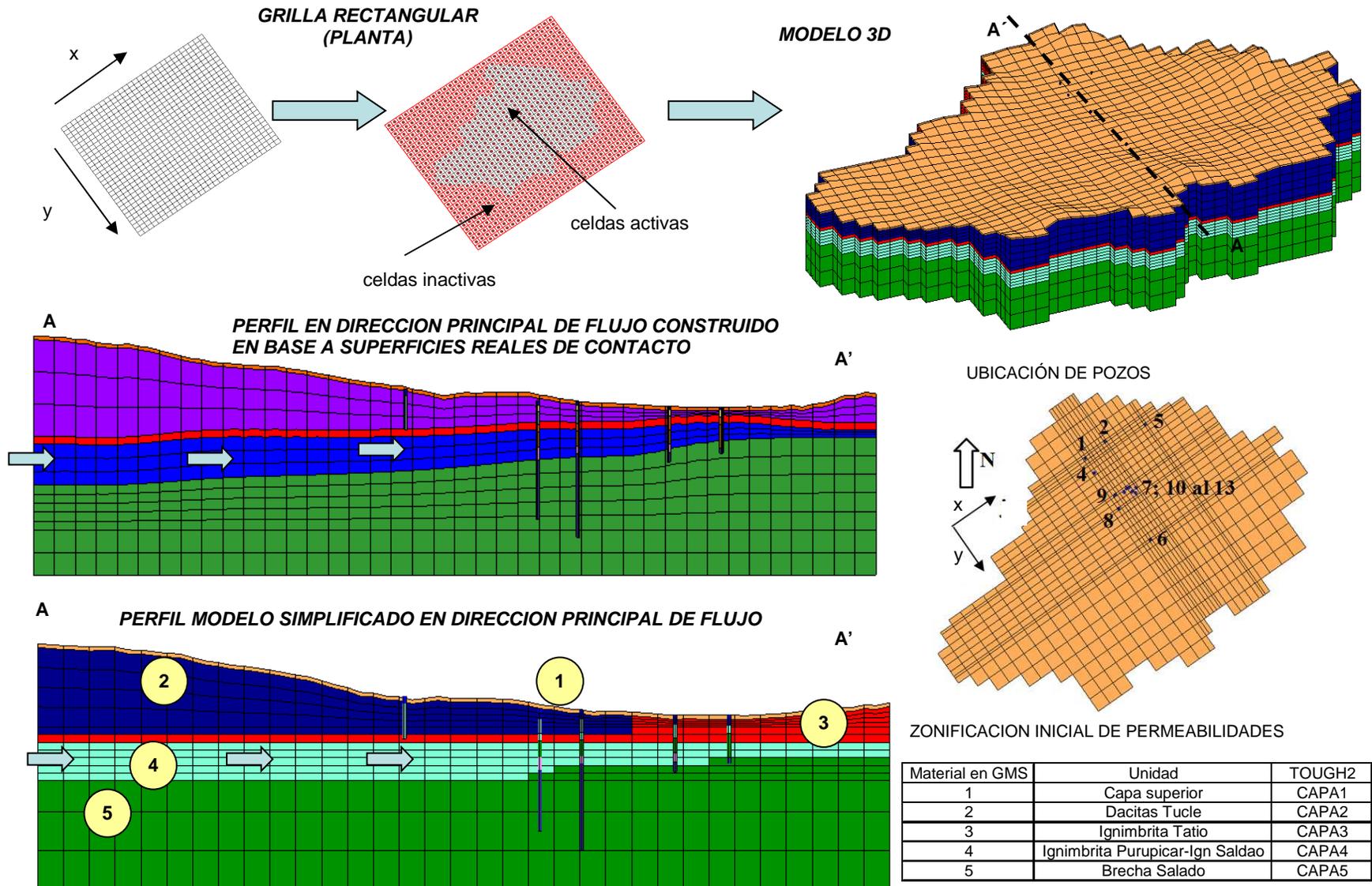
La discretización vertical considera 15 celdas de espesor variable. Esto, con el objetivo de representar aproximadamente la disposición de las distintas unidades geológicas y de poder representar adecuadamente las variaciones de temperatura en la vertical. Los espesores de las distintas celdas fueron determinados de forma de ajustarse a las potencias medias de las distintas unidades geológicas. Además, se procuró refinar las celdas en las zonas de mayor interés y que a la vez contaran con registros de presión y temperatura.

A modo de ejemplo, las unidades hidrogeológicas principales correspondientes a las Ignimbritas Puripicar y Salado, presentan celdas con espesores de 100m a diferencia de la unidad Brecha Salado, con celdas de 500 m donde además no existen diferencias significativas en la temperatura para un mismo perfil (Ver Figura 5.2).

En una primera instancia, la discretización vertical de la grilla consideró las superficies de contacto entre unidades, derivadas de la interpolación en GMS a partir de las columnas estratigráficas de pozos y de perfiles geológicos existentes, como se puede observar en la Figura 5.2. Esto permitió una representación más realista de la disposición de las unidades hidrogeológicas. No obstante lo anterior, a modo de simplificar la construcción del modelo y evitar posibles errores numéricos asociados a la variación del tamaño de las celdas, se optó por definir cotas superiores e inferiores fijas para las celdas asociadas a las capas 4 a la 15, numeradas desde arriba hacia abajo (Ver Figura 5.2).

Para diferenciar las distintas unidades hidrogeológicas en GMS se asignaron códigos a cada celda del modelo de forma de facilitar posteriormente la definición de materiales en TOUGH2. En la Figura 5.2 se muestra la zonificación inicial de permeabilidades utilizada.

Figura 5.2.- Construcción modelo numérico

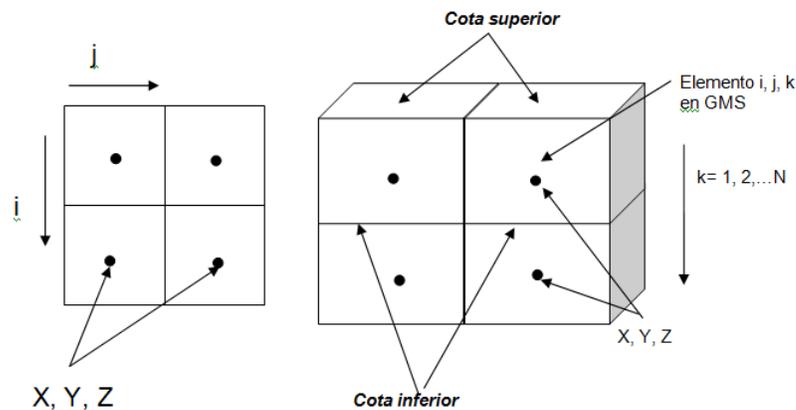


5.3 Procesamiento de datos para entrada TOUGH2

Una vez construida la grilla numérica en GMS, se exportó la información asociada a cada celda, tales como ubicación en coordenadas X, Y, Z Cota superior e inferior, material, celda activa/inactiva, a planillas de cálculo. La Figura 5.3 muestra los parámetros asociados a cada elemento.

De esta forma se procedió a procesar la información asociada a cada celda con el objetivo de generar fundamentalmente dos sets de datos: ELEMENTS y CONNECTIONS, con todos los parámetros necesarios (Ubicación, Volúmenes de elementos, distancia entre elementos, etc) y basándose en el formato requerido por TOUGH2. En esta etapa, también se definieron las celdas asociadas a condiciones de borde tipo Dirichlet, las cuales tienen un tratamiento especial en TOUGH2, por lo cual el elemento debe definirse con un volumen muy grande y con distancias a celdas adyacentes muy pequeña. Las otras condiciones de borde pueden ser editadas con mayor facilidad en el archivo de entrada a TOUGH2 o bien pueden ser generadas en planillas de cálculo independientes de las planillas principales de procesamiento de datos.

Figura 5.3.- Parámetros asociados a cada elemento



5.4 Condiciones iniciales

Como condición inicial se impuso presión atmosférica en la capa superior del modelo correspondiente a 0.6×10^5 Pa, y se corrió el modelo con flujo isotermal, adoptándose una temperatura para todas las celdas de 10°C . De esta manera se obtuvo una distribución inicial de presiones para el modelo.

Las ecuaciones asociadas a la determinación de las condiciones iniciales del modelo se presentan en el Anexo D.

5.5 Condiciones de borde

Una vez obtenidas las condiciones iniciales de presión para cada celda se fijaron las condiciones de borde del modelo, las cuales se detallan a continuación:

1.- Flujo de calor basal: Se utilizó un valor constante de 60 mW/m^2 , el cual fue obtenido a partir de la revisión bibliográfica de otros modelos numéricos de sistemas geotermales desarrollados en ambientes tectónicos similares (Kiryukhin, Jalininasrabady, Moulding, Clearwater, TOUGH2 Symposium 2012). Este valor se impuso en todas las celdas activas de la capa basal del modelo. Dado que la grilla fue refinada en ciertos sectores, fue necesario calcular este valor para cada celda.

2.- Recarga local: La recarga local está dada por los resultados obtenidos para el balance hídrico presentado en el Capítulo 3, la cual se estimó en 55 l/s (55 kg/s considerando una densidad del agua equivalente a 1000 kg/m^3). La temperatura del agua se fijó en 10°C , lo que equivale a una entalpía de $4.2 \times 10^4 \text{ J/kg}$. La recarga fue distribuida en 10 celdas en el sector SE del modelo, cada una con 5.5 kg/s .

3.- Temperatura capa superior: Se fijó una temperatura de 10°C en la capa superior del modelo. Por otra parte, para impedir que se generaran flujos no previstos de entrada o salida del modelo a través de la capa superior se desactivó la condición de presión constante en esta capa. Esto fue realizado imponiendo una densidad del medio muy grande ($1 \times 10^{50} \text{ kg/m}^3$) en la primera capa, lo que permite que se generen cambios de presión pero no cambios de temperatura (Ref: Documento Initial - Boundary Conditions, Stefan Finsterle, LBNL).

4.- Flujo lateral: De acuerdo con el modelo conceptual, existiría un flujo lateral entrando al sistema, lo que fue representado a través de una condición de borde tipo Dirichlet mediante el uso de valores constantes de presión. Esta condición fue impuesta en las capas 8 a las 12 del modelo, en la fila donde se ubican los pozos principales (8, 9, 4 y 1). De acuerdo con el modelo conceptual se fijó una temperatura de 280°C para dichas celdas.

Para estimar valores de presión representativos de la condición de borde se utilizaron los registros de perfiles de presión en los pozos existentes, generándose gradientes de presión en la dirección NW-SE, correspondiente a la dirección principal del flujo.

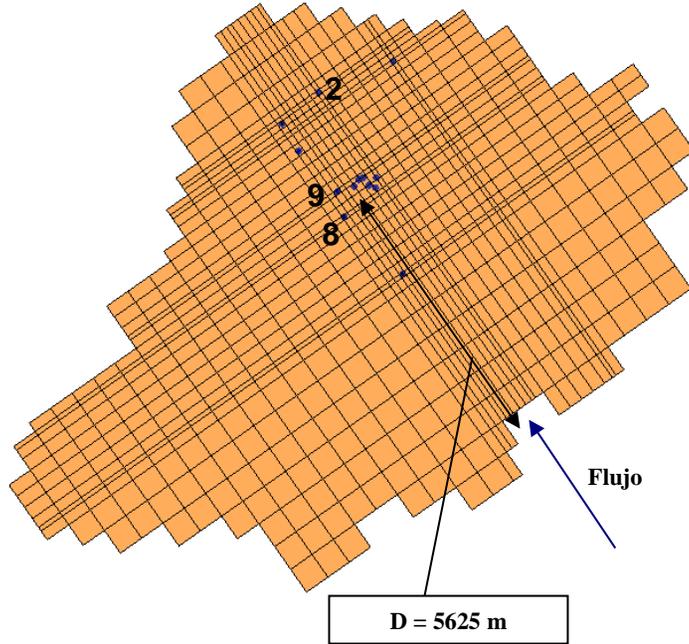
La Figura 5.4 muestra la ubicación de los pozos utilizados y los gradientes de presión estimados. Luego, la Tabla 5.1 muestra los valores de presión estimados en el borde del modelo y que fueron utilizados para representar el flujo de masa entrante al sistema.

Tabla 5.1.- Presiones estimadas en el borde del modelo

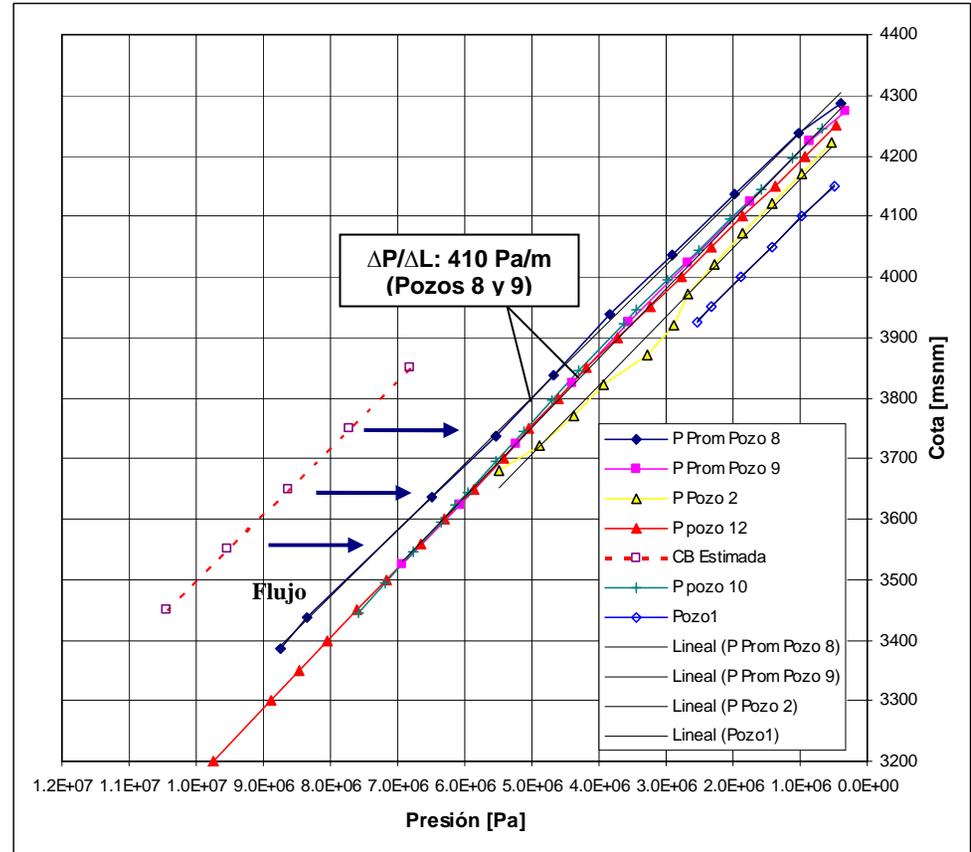
Capa [k]	Cota [msnm]	P estimada borde [Pa]
8	3850	6.82E+06
9	3750	7.73E+06
10	3650	8.63E+06
11	3550	9.54E+06
12	3450	1.05E+07

Figura 5.4.- Gradiente de presión en la dirección principal del flujo y condición de borde lateral estimada a partir de registros en pozos

a) Ubicación de pozos



b) Estimación de gradiente de presión en la dirección del flujo principal



5.- Descarga del sistema

Considerando lo señalado en el modelo conceptual, el sistema geotermal presenta tres zonas de descarga principales: Zona Norte, Zona Sur y Zona Oeste.

Estas zonas de descarga fueron modeladas en TOUGH2 utilizando pozos ficticios de entrega (*deliverability wells*) en cada celda definida como zona de descarga. Estos pozos permiten generar una salida de flujo siempre que exista una diferencia de presión entre el reservorio y la boca del pozo.

El flujo de salida de un pozo es calculado en TOUGH2 mediante la siguiente expresión:

$$q_{\beta} = \frac{k_{r\beta}}{\mu_{\beta}} \cdot \rho_{\beta} \cdot PI \cdot (P_{\beta} - P_{wb})$$

donde:

q_{β} : Flujo de salida de un pozo según fase [kg/s]

$k_{r\beta}$: Permeabilidad relativa según fase [m²]

μ_{β} : Viscosidad [Pa-s]

ρ_{β} : Densidad de la fase [kg/m³]

PI : Índice de productividad del pozo (Productivity Index) [m³]

P_{β} : Presión en el reservorio [Pa]

P_{wb} : Presión en la boca del pozo [Pa]

El índice de productividad de un pozo (*Productivity Index*) puede ser estimado utilizando la siguiente expresión (Ref: Manual TOUGH2, LBNL) :

$$PI = \frac{2\pi \cdot (k \cdot \Delta z)}{\ln(r_e / r_w) + s - 1/2}$$

donde:

k : Permeabilidad [m²]

Δz : Altura de la celda [m]

r_e : Radio efectivo del pozo [m]

r_w : Radio del pozo [m]

s : Factor de piel (Skin factor) que depende del entorno del pozo

En el caso de celdas rectangulares el valor de r_e se puede estimar con la siguiente expresión:

$$r_e = \sqrt{A/\pi}$$

donde A corresponde al área de la celda. Utilizando la expresión señalada anteriormente para PI, la Tabla 5.2 resume los valores iniciales estimados para su utilización en el modelo.

Tabla 5.2.- Estimación de PI (Productivity Index) inicial para las celdas definidas como zonas de descarga

Δz [m]	Δx [m]	Δy [m]	re [m]	s	k [m2]	rw [m]	PI [m3]
100	414.543	337.319	211	0	1E-13	2	1.51E-11

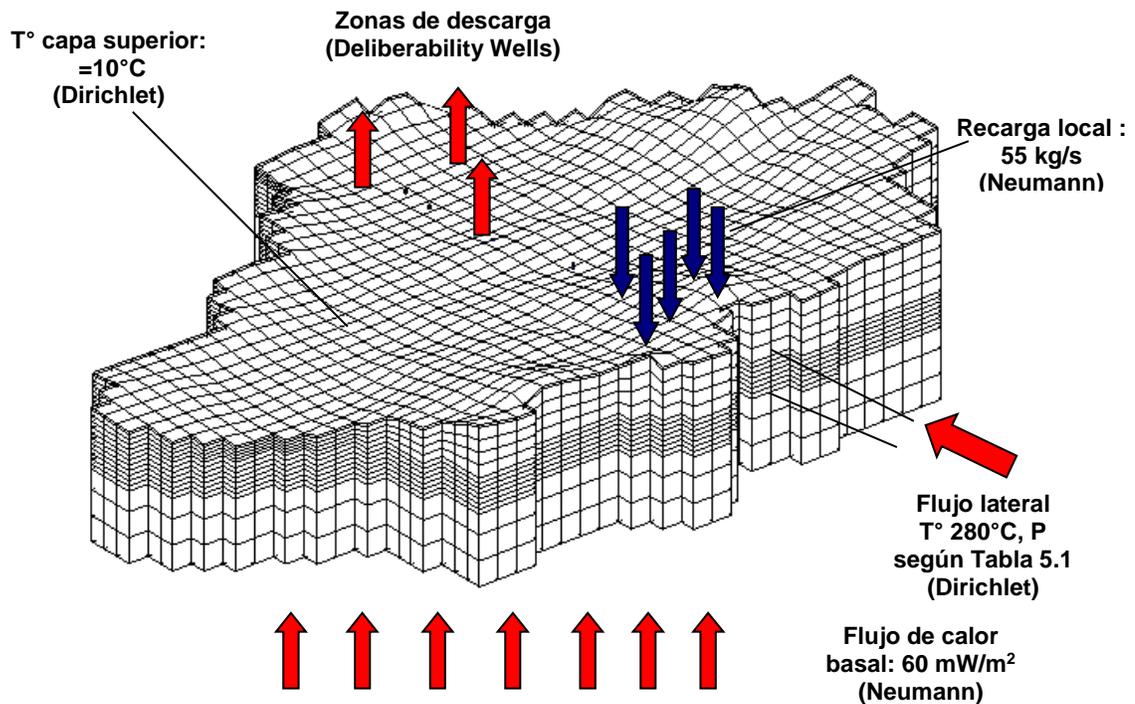
Para estimar los valores de Pw, se utilizaron los registros existentes de presión en pozos, lo que permite estimar en primer lugar las presiones del reservorio en las zonas de descarga del modelo. Para que exista un flujo de salida en las zonas de descarga, la presión del reservorio debe ser mayor a Pw. Luego, considerando que las estimaciones realizadas en las zonas de descarga corresponden a presiones estimadas del reservorio, necesariamente Pw debe ser menor que dichos valores estimados. En resumen, como valores iniciales se utilizaron valores estimados en función de los registros de presión en pozos, los que luego fueron modificados para ajustar el modelo a las presiones registradas.

La Tabla 5.3 resume las condiciones de borde impuestas, las que se muestran esquemáticamente en la Figura 5.5.

Tabla 5.3.- Condiciones de borde del modelo

CONDICION DE BORDE	TIPO CB	OBSERVACIONES
Recarga local	Neumann	Recarga total de 55 kg /s distribuidas en 10 celdas; 5.5 kg/s por celda, entalpía por celda 4.2E4 J/kg.
Flujo calor basal	Neumann	60mW/m2 aplicados sobre las celdas activas de la capa inferior
T° fija Capa superior	Dirichlet	10°C en cada celda activa de la capa superior
Flujo lateral	Dirichlet	Presión fija estimada en base a gradientes de P registrados en pozos, T=280 °C, aplicada verticalmente en la capa 8 a la 12 en filas de ubicación de pozos principales (6, 8, 9, 4, 1)
Descarga del sistema	Productivity Index	Definición de celdas de descarga según 3 zonas principales de descarga; se fija la presión por sobre la cual existirá descarga y se calibra PI (Productivity Index)

Figura 5.5.- Esquema de condiciones de borde del modelo

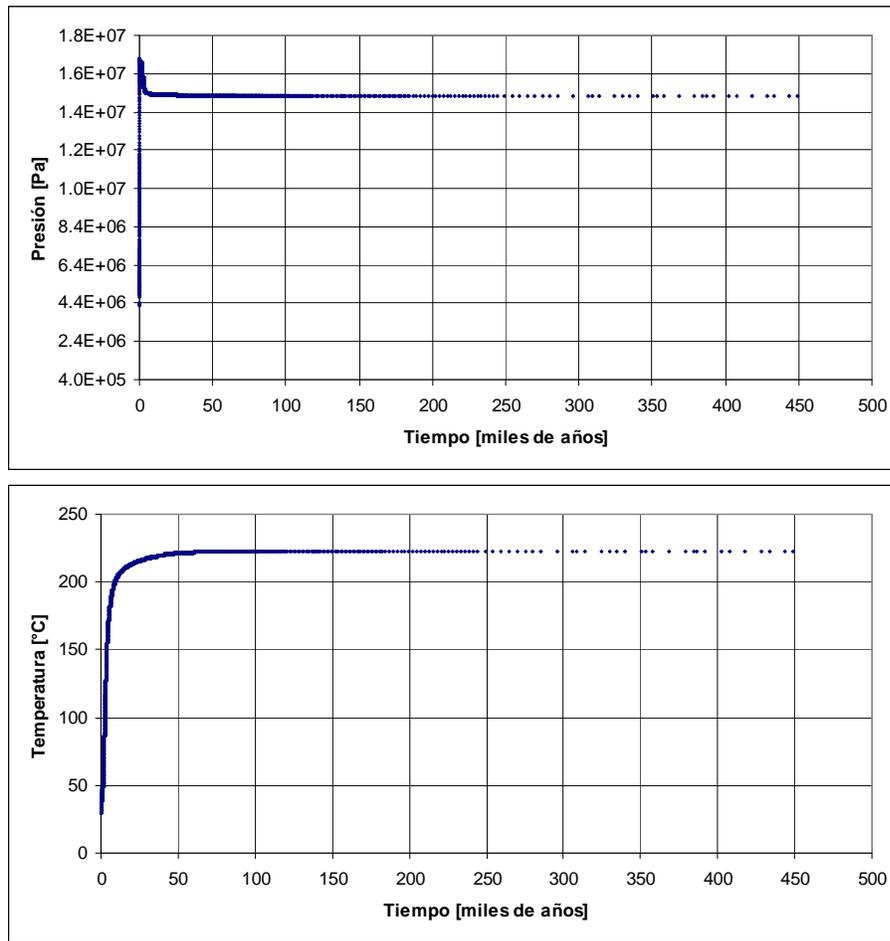


5.6 Proceso de pruebas y obtención de régimen permanente del modelo

TOUGH2, a diferencia de otros softwares de modelación numérica (por ej: Modflow) no permite al usuario elegir si la simulación a efectuar será en régimen permanente o en régimen transiente. El modelo siempre opera en régimen transiente, por lo que para simular situaciones de régimen pseudo-estacionario es necesario simular largos períodos de tiempo en los que las condiciones de borde y las zonas de recarga y descarga del sistema son constantes.

Los criterios que definen el tiempo de cálculo en TOUGH 2 están dados por el tiempo máximo definido para la simulación y el número máximo de iteraciones definido. Considerando lo anterior, las primeras corridas del modelo fueron realizadas exclusivamente con el objetivo de alcanzar un régimen permanente, de forma de determinar el número de pasos de cálculo mínimo requeridos y de utilizar un método de cálculo que permitiera minimizar el tiempo requerido en cada simulación. A modo de ejemplo de los resultados obtenidos en este proceso, la Figura 5.6 muestra la estabilización de la temperatura en una celda arbitraria del modelo, después de aproximadamente un millón de años.

Figura 5.6.- Ejemplo de estabilización de variables



Como conclusión de este análisis se puede señalar que el número de pasos de tiempo (*time steps*) requeridos para la obtención del régimen permanente depende de las características particulares del problema a resolver, lo que determina la rapidez de convergencia. Como resultado importante de este proceso, se determinó que una forma eficiente de disminuir el tiempo de simulación consiste en utilizar un método de cálculo que permite aumentar al doble el paso temporal (*time step*) en la medida que se alcance la convergencia en el número predefinido de iteraciones de cálculo de cada paso. Lo anterior implica que el paso de tiempo utilizado en la simulación va variando constantemente dependiendo de la convergencia en cada paso de cálculo, haciéndose paulatinamente mayor en caso de que la convergencia se de en un número de iteraciones menor al definido, o haciéndose menor en caso contrario, lo que eventualmente puede llevar a que la simulación finalice sin éxito.

En relación con lo señalado en el párrafo anterior, debe señalarse que para evitar la no convergencia numérica del modelo, se introdujeron condiciones para el cálculo de permeabilidades relativas. Esto ocurre en aquellas celdas ubicadas en las capas superiores del modelo que en caso de baja de presión tienden a desaturarse, generando cambios de estado (de líquido a gaseoso) que no permiten continuar normalmente con el cálculo, a menos que se introduzcan parámetros para el cálculo de permeabilidad relativa entre los distintos estados. En este caso, como función de cálculo para la permeabilidad relativa se utilizaron las Curvas de Corey (Appendix G TOUGH2 User's Guide, Pruess, 1999).

6. CALIBRACION DEL MODELO

En este capítulo se presentan los criterios utilizados y los resultados obtenidos para el proceso de calibración del modelo tanto en régimen permanente como en régimen transiente.

6.1 Parámetros cuantitativos y cualitativos de calibración

Con el objetivo de contar con herramientas de análisis de la calidad de las simulaciones obtenidas en comparación con los datos observados se optó por la utilización de los siguientes indicadores.

- **Análisis gráfico:** Consiste en comparar gráficamente los perfiles de temperatura/presión simulados y observados para cada pozo. Además, para analizar en forma global los resultados se utilizó un gráfico de temperatura/presión observadas versus calculadas donde se utiliza como indicador visual de la calibración una recta de 45 ° que pasa por el origen.

- **Obtención de parámetros cuantitativos de calibración:** Consiste en la utilización de indicadores basado en el cálculo de residuales utilizando la siguiente expresión:

$$r = T_{calculada} - T_{observada}$$

Luego, a partir de los residuos obtenidos se calcula el error cuadrático medio (Root Mean Squared, RMS) mediante la siguiente fórmula:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad n : \text{número de datos de la muestra}$$

Finalmente, se calcula un valor normalizado como el cociente entre el RMS y la diferencia entre las temperaturas o presiones máximas y mínimas observadas. Este valor puede ser expresado como porcentaje:

$$RN [\%] = \frac{RMS}{T_{\max} - T_{\min}} \cdot 100$$

Como criterio adicional, se incorporó el método de los mínimos cuadrados para determinar el grado de correlación entre los datos observados y simulados. En este caso, la pendiente de la recta de correlación entre los datos debe acercarse a uno al igual que el coeficiente de correlación de mínimos cuadrados (R^2).

6.2 Calibración en régimen permanente

6.2.1 Datos y criterios utilizados en la calibración

El proceso de calibración utilizado consiste en el método de prueba y error, es decir se parte con una distribución inicial de permeabilidades y conductividades térmicas para cada zona definida y se corre el modelo hasta que se alcance el régimen permanente. Luego, se exportan los resultados obtenidos desde el archivo de salida de TOUGH2 y se procesan de forma de comparar los datos simulados con los observados. Las permeabilidades y conductividades térmicas son luego modificadas y se repite el proceso hasta que se logre una calibración satisfactoria.

Como criterio de calibración se incluyó también el caudal de salida del sistema y los perfiles de presión registrados. Es decir, el modelo busca reproducir, además de los perfiles de temperatura registrados, los perfiles de presión registrados y el caudal de salida del sistema estimado de acuerdo con el balance hídrico.

Para la calibración de temperatura del modelo se utilizaron los datos de temperatura obtenidos en los pozos 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10 y 12. Con respecto a la presión, los datos utilizados correspondieron a los perfiles de presión registrados en los pozos 2, 8, 9 y 12. Debe señalarse que a diferencia de la temperatura, los datos de presión utilizados se asocian exclusivamente a los observados en el acuífero principal, dado que los pozos fueron habilitados en esta zona.

El caudal de salida del sistema fue estimado en 200 l/s, de acuerdo con lo señalado en el Capítulo 3. Luego, se espera que la suma de los caudales de salida generados en las distintas zonas de descarga del modelo sea similar al valor estimado.

6.2.2 Resultados de la calibración

La Figura 6.1 muestra los perfiles de temperatura simulados y observados en el proceso de calibración en régimen permanente. Análogamente, la Figura 6.2 muestra los perfiles de presión simulados y observados.

Figura 6.1.- Perfiles de temperatura simulados y observados por pozo

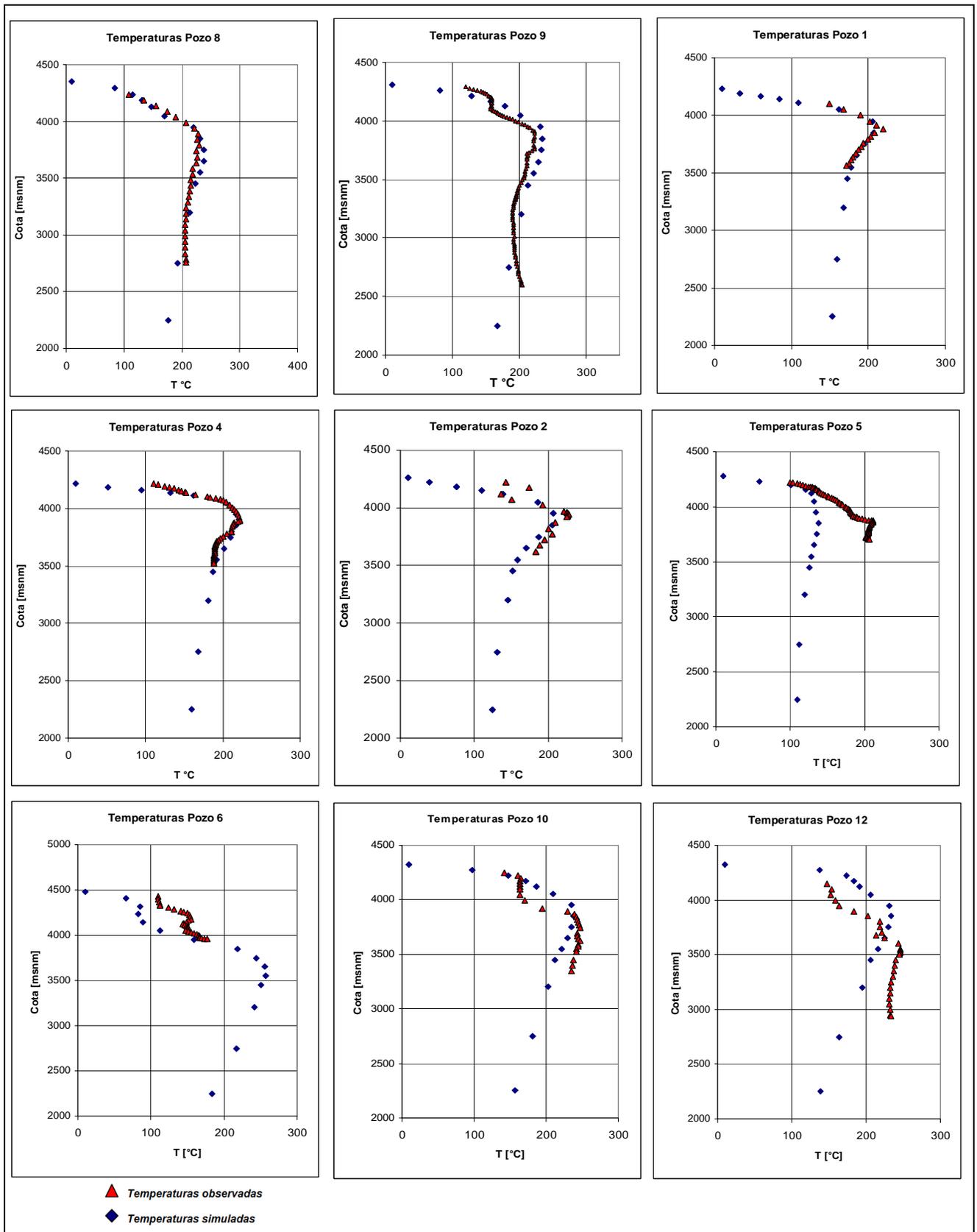
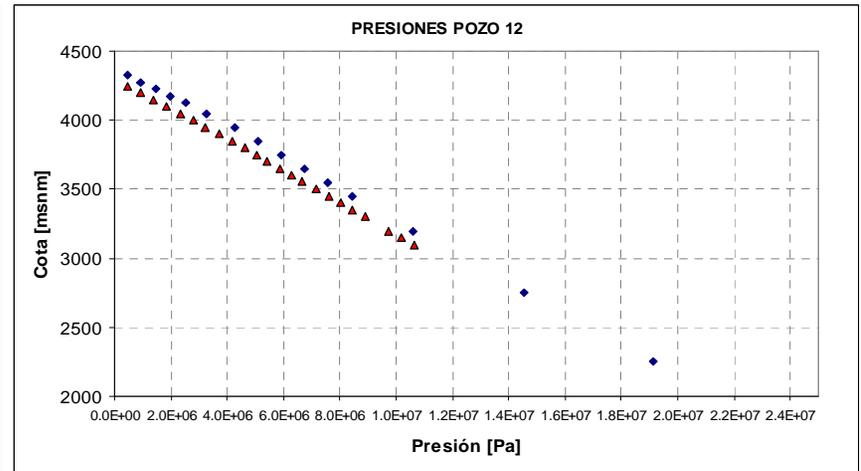
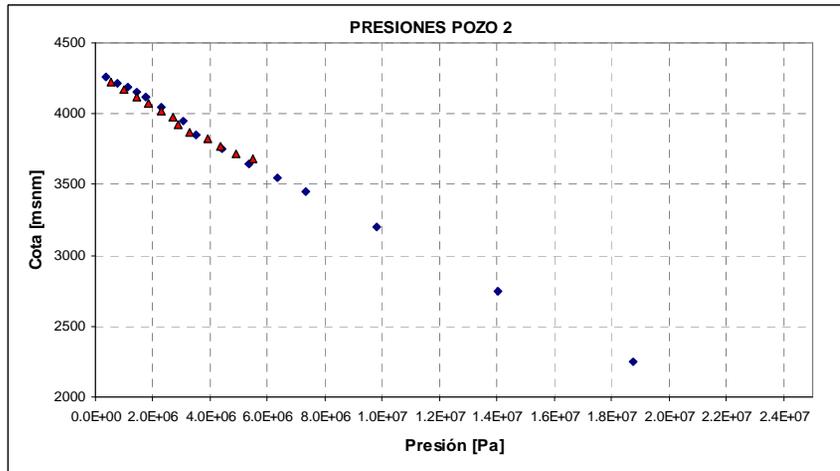
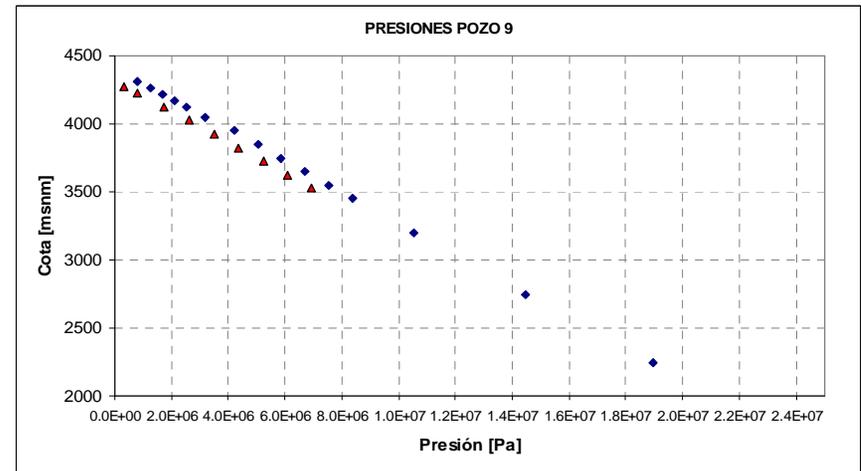
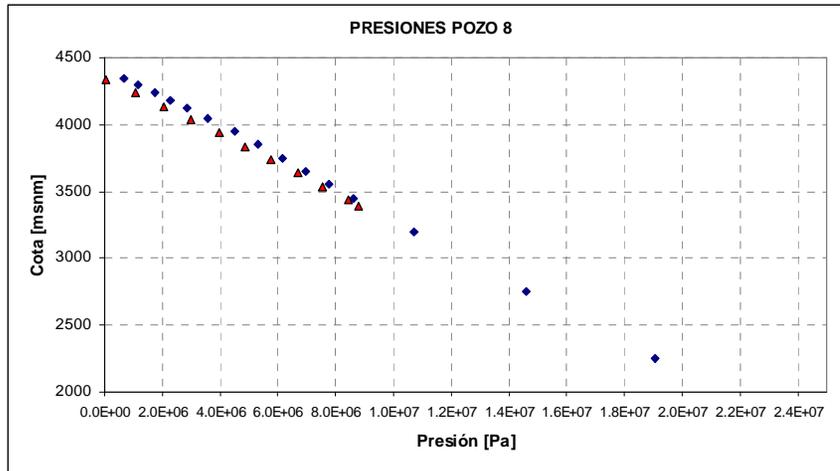


Figura 6.2.- Análisis gráfico comparativo entre los perfiles de presión simulados y observados por pozo



- ▲ Presiones observadas
- ◆ Presiones simuladas

De los resultados obtenidos en el proceso de calibración en régimen permanente se puede concluir lo siguiente:

- La calibración obtenida indica que las temperaturas simuladas se ajustan en buena medida a las temperaturas observadas en los pozos del sistema, principalmente en a lo largo de la dirección media del flujo. Los resultados en los pozos, 5, 6 y 12 se alejan de los valores observados, lo que indica que la calibración podría ser mejorada o que la entrada de calor al sistema podría ser más amplia que la empleada en el modelo numérico.
- Los valores de RMS (Root Mean Square) y RN (RMS Normalizado) obtenidos de la comparación de las temperaturas observadas y simuladas (ver Figura 6.3) corresponden a 31,3 ° y 23,4 %, lo que se considera aceptable. Por otra parte, las presiones calculadas por el modelo sobreestiman en aproximadamente un 10% las presiones registradas (ver Figura 6.2) lo que sin embargo, está dentro de los márgenes de error aceptables para la calidad y cantidad de la información disponible y la escala del modelo numérico.
- El balance hídrico del modelo calibrado entrega como resultado un flujo de entrada lateral de 146 kg/s y uno de salida de 201 kg/s, lo que es consistente con el balance hídrico estimado del sistema. La recarga local, que cierra el balance se estimó en 55 l/s.
- Los parámetros calibrados en base a la definición de 10 zonas de permeabilidad y conductividad térmica (Tabla 6.1) son coherentes tanto con la bibliografía como con el modelo conceptual, lo que de alguna forma valida el modelo numérico. Se observa que las mayores permeabilidades se concentran en las unidades Ignimbrita Puripicar y Salado (Capas 4 y 6), correspondientes al acuífero principal, Dacitas de Tucle correspondientes al acuífero superior (Capa 2) y en el entorno de las manifestaciones superficiales (capas 7, 8 y 9). Por otra parte, las permeabilidades más bajas se concentran en las unidades Ignimbrita Tatio y Tobas de Tucle, las que constituyen las unidades impermeables del sistema de acuerdo a lo señalado en el modelo conceptual.
- De los perfiles de temperatura simulados (Figura 6.1) y de la Figura 6.3 se observa que las temperaturas observadas en las primeras capas del modelo en general son bastante mayores que las simuladas. Lo anterior puede ser atribuible a la determinación de la condición de borde de temperatura constante en la capa superior del modelo, que condiciona la temperatura de las capas subyacentes. El pozo N° 4 constituye un ejemplo de lo señalado.
- El acuífero principal o profundo, presente en las unidades Ignimbrita Puripicar y Salado es mejor representado que el acuífero superficial, conformado por las Dacitas de Tucle. Esto se refleja en la baja calidad de representación del modelo de las temperaturas registradas en el pozo 6, el cual se puede considerar representativo de dicho acuífero. Esto podría deberse al efecto generado por la inclusión de una recarga concentrada en pocos elementos, lo que estaría generando una predominancia de temperaturas más bajas en el acuífero.
- Las isothermas generadas en la dirección principal del flujo (SE-NW) obtenidas a partir de los resultados de la calibración (Figura 6.4), permiten visualizar que las mayores temperaturas se concentran entre los 3500 y 4000 msnm aproximadamente y que existe un

gradiente de temperatura en dirección SE-NW. Esto es coherente con los datos observados y con la dirección predominante del flujo. Por otra parte, se observa que el acuífero correspondiente a las Dacitas de Tucle muestra temperaturas menores a 50°C lo que se debería al efecto de la recarga meteórica local. Las isotermas obtenidas en una sección transversal a la dirección predominante del flujo (SW-NE) permiten observar la distribución lateral de temperatura.

- Las condiciones de presión y de temperatura del sistema hacen que el reservorio sea de tipo líquido dominante, lo que es reflejado en los resultados del modelo, donde no se observan cambios de fase de líquido a gaseoso en el acuífero principal.

Figura 6.3.- Temperaturas simuladas vs observadas

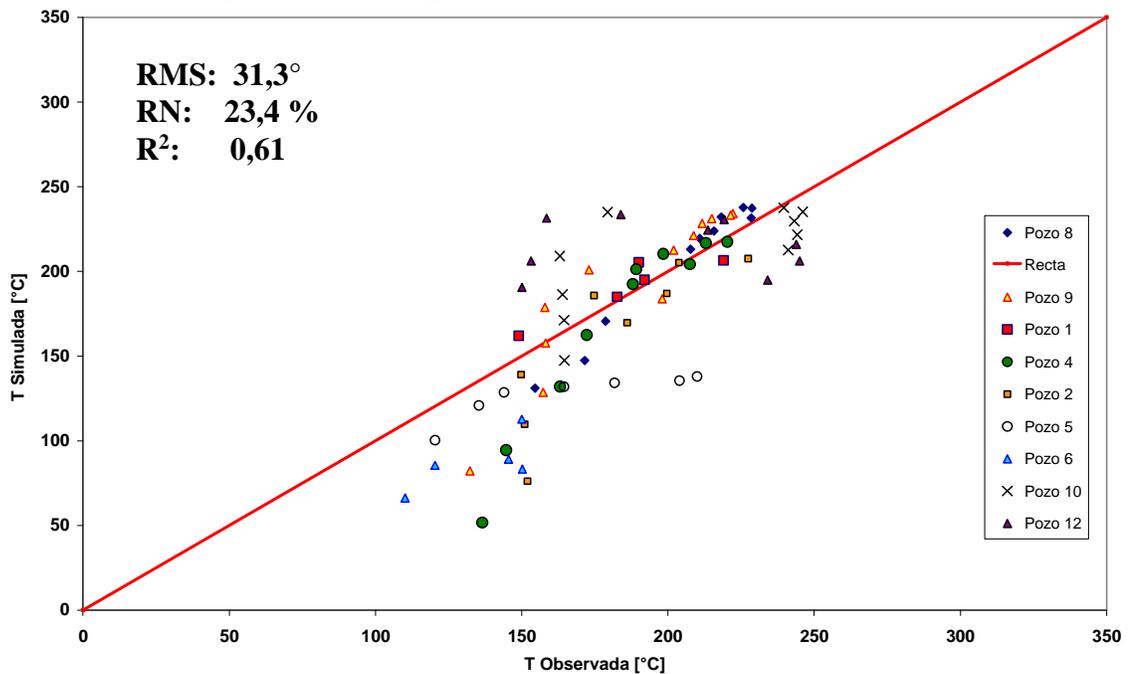
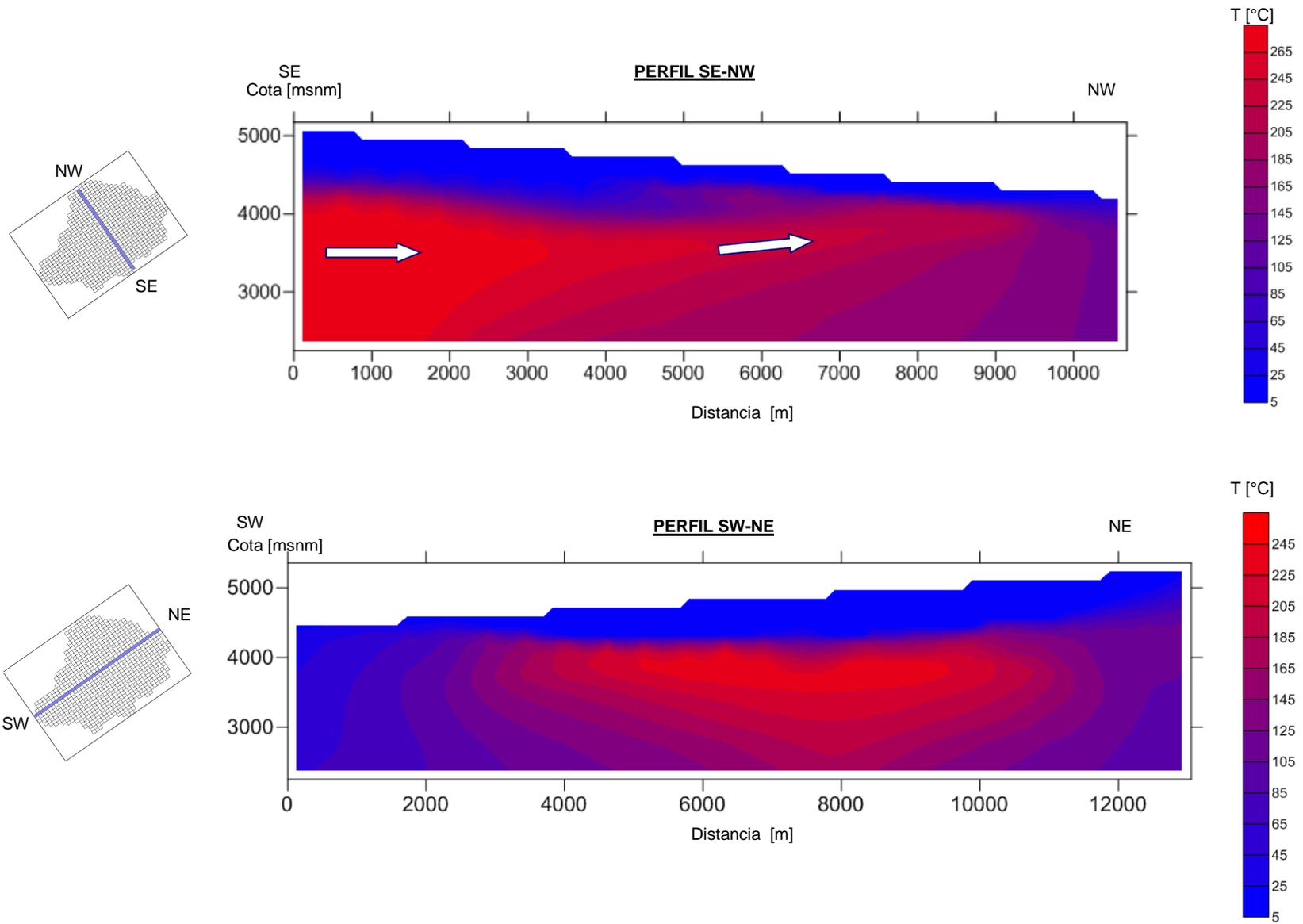


Tabla 6.1.- Parámetros calibrados por capa

ZONA	UNIDAD	Kx [m2]	Ky[m2]	Kz [m2]	COND. TÉRMICA [W/(m°C)]
1	SUPERFICIAL	1.0E-16	1.0E-16	1.0E-16	0.5
2	DACITAS TUCLE	1.0E-14	1.0E-14	0.1E-14	0.5
3	IGN TATIO + TOBAS DE TUCLE	2.0E-15	2.0E-15	1.0E-16	0.2
4	IGN PURIPICAR +IGN SALADO	1.0E-14	1.0E-14	0.6E-14	1.0
5	BRECHA SALADO	6.5E-15	6.5E-15	6.5E-15	2.0
6	IGN PURIPICAR +IGN SALADO	0.6E-14	0.6E-14	0.6E-14	2.0
7,8,9	ENTORNO MANIF. SUPERFICIALES	2.0E-13	2.0E-13	0.3E-13	1.0
10	TOBAS DE TUCLE	3.0E-15	3.0E-15	0.5E-15	0.2

Figura 6.4.- Isotermas obtenidas como resultado de la calibración en régimen permanente



6.3 Calibración en régimen transiente

Una vez calibrado el modelo en régimen permanente, se procedió a realizar una calibración en régimen transiente con el objetivo de mejorar la representatividad de los resultados del modelo ante eventuales escenarios de explotación.

6.3.1 Datos y criterios utilizados en la calibración

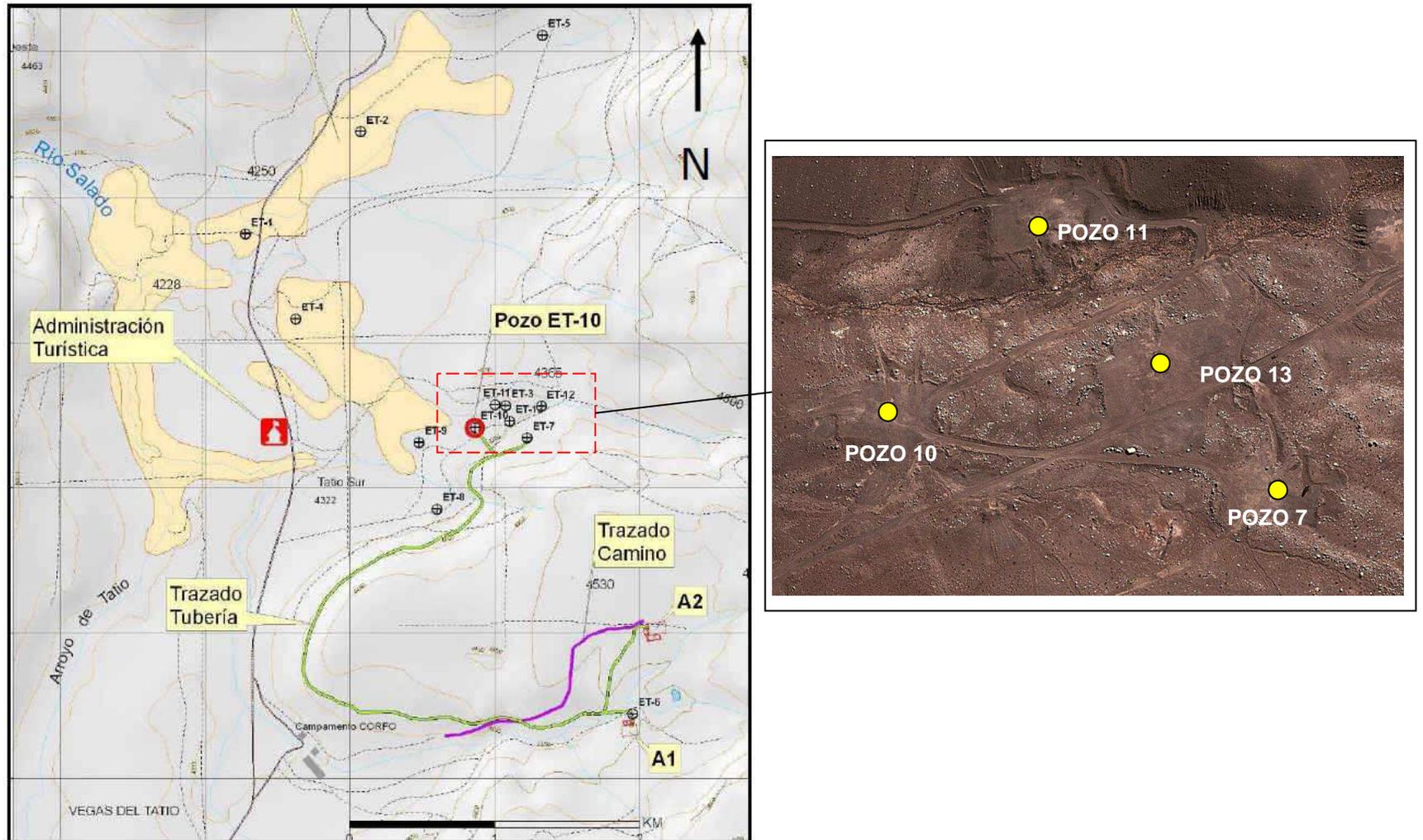
Los datos utilizados para la calibración del régimen transiente fueron obtenidos a partir de las pruebas realizadas en septiembre del año 2009, como parte del proyecto “Perforación Geotérmica profunda El Tatio Fase I”. De acuerdo con lo señalado en el estudio “Revisión de la ejecución del proyecto perforación geotérmica profunda El Tatio Fase 1” elaborado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en octubre del 2010, se realizaron pruebas de producción e inyección utilizando los pozos DT1 (producción) y los pozos 7 y 10 (inyección). En líneas generales, parte del caudal extraído por el pozo DT-1 fue conducido mediante tuberías al pozo 7 donde se producía la reinyección. Durante las pruebas, las labores de reinyección fueron transferidas al pozo 10, el cual, al abrirse la válvula de control hacia la tubería de reinyección, generó un flujo inmediato hacia dicha tubería, por encontrarse con el nivel de agua en lo alto del pozo y en condiciones cercanas a la ebullición. La alta temperatura de los fluidos en la tubería de reinyección ocasionó una expansión de esta, la cual, al estar enterrada, generó que el cabezal del pozo 10 se moviera originando la ruptura de la tubería del pozo 10 originando una filtración (erogación) que produjo una significativa emisión de vapor en el cabezal del pozo y hacia el entorno. La Tabla 6.2 resume la cronología de los eventos acontecidos.

Tabla 6.2.- Cronología de eventos

Fecha	Eventos
01-sep-09	Inicio prueba de bombeo en pozo DT1 e inyección en pozo 7
08-sep-09	Ocurre evento de erogación en pozo 10, no hay reinyección de aquí en adelante
04-oct-09	Control de erogación en pozo 10

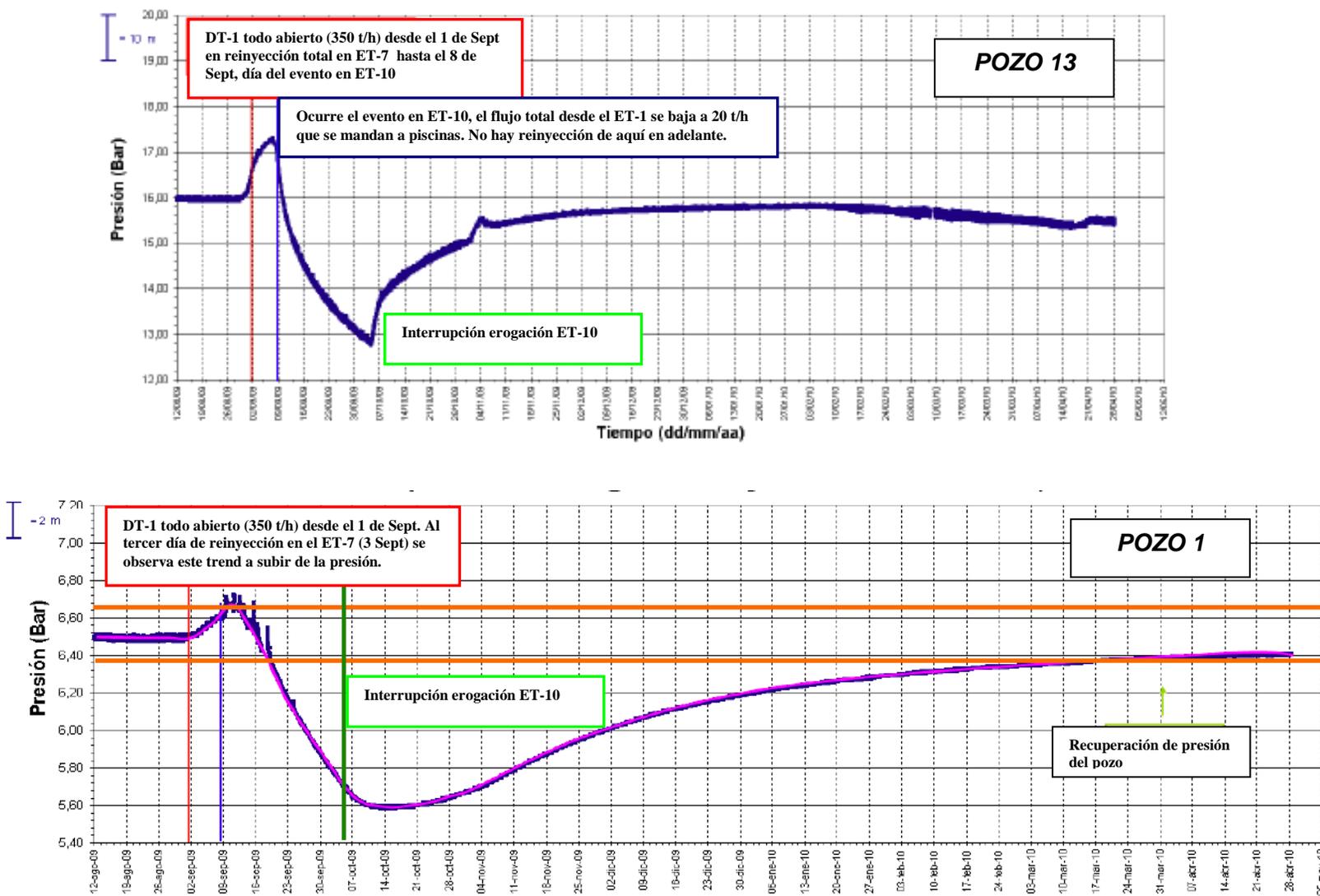
La Figura 6.5 muestra la ubicación en planta de los pozos involucrados en las pruebas. La Figura 6.6 muestra los datos de presión registrados en los pozos 13 y 1. La Figura 6.7 muestra los datos de presión registrados en los pozos 2 y 11.

Figura 6.5.- Ubicación en planta de los pozos utilizados en las pruebas



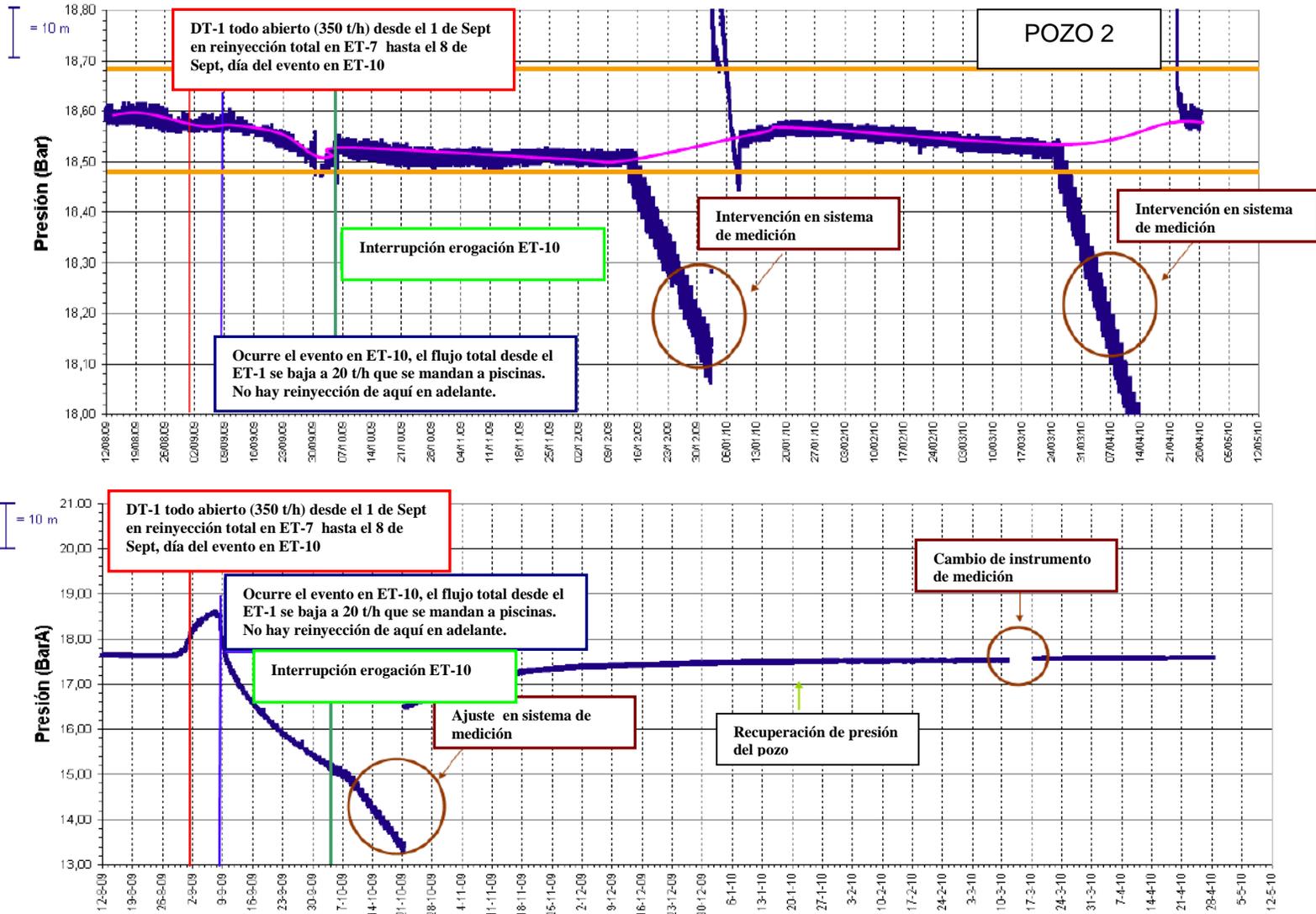
Fuente: Documento "Revisión de la ejecución del proyecto perforación geotérmica profunda El Tatio Fase 1" (PNUD, 2010).

Figura 6.6.- Datos de presión registrados en pozos 13 y 1 durante las pruebas (*)



(*) Antecedentes obtenidos del estudio Revisión de la ejecución del proyecto perforación geotérmica profunda El Tatio Fase 1” (PNUD, 2010).

Figura 6.7.- Datos de presión registrados en pozos 2 y 11 durante las pruebas (*)



(*) Antecedentes obtenidos del estudio Revisión de la ejecución del proyecto perforación geotérmica profunda El Tatio Fase 1" (PNUD, 2010).

De acuerdo con la información del documento “Revisión de la ejecución del proyecto perforación geotérmica profunda El Tatio Fase 1”, la operación de los pozos durante la ejecución de las pruebas y el incidente se resume en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3.- Operación de pozos considerada en la calibración en régimen transiente

POZO	Fecha	12-ago-09	01-sep-09	08-sep-09	04-oct-09
DT-1	Tiempo [días]	0	20	27	53
	Producción [kg/s]	0	97.2	5.6	0
7	Tiempo [días]	0	20	27	53
	Inyección [kg/s]	0	66.0	0.0	0
10	Tiempo [días]	0	20	27	53
	Producción [kg/s]	0	0.0	100.0 (*)	0

(*) Caudal de erogación estimado en la referencia “ Revisión de la ejecución del proyecto perforación geotérmica profunda El Tatio Fase 1” (PNUD, 2010).

6.3.2 Criterios utilizados en la calibración

Los siguientes criterios fueron utilizados para la calibración del modelo en régimen transiente:

- Se utilizaron los datos registrados en el pozo 13 para calibrar el modelo en régimen transiente.
- En un reservorio geotermal, la respuesta del sistema ante la producción o inyección de fluidos está asociada a la compresibilidad de poros, la cual se define como el cambio en el volumen de poros de la roca ante un cambio en la presión, según se muestra en la siguiente ecuación diferencial, la cual puede ser escrita también en términos de la porosidad (ϕ).

$$C_p = \frac{1}{V_p} \cdot \left(\frac{\partial V_p}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial p}$$

Considerando lo anterior, los parámetros a calibrar corresponden a la compresibilidad de poros de las unidades hidrogeológicas principales (Ignimbrita Puripicar, Ignimbrita Salado y Brecha Salado), que corresponde a las capas 4, 5 y 6 del modelo numérico.

- Los valores de porosidad empleados en las distintas unidades geológicas fueron obtenidos del estudio “Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica del campo geotermal El Tatio” elaborado por Carolina Figueroa (Universidad de Chile, 2013), el cual a su vez obtuvo las porosidades de diversos autores. La Tabla 6.4 resume las porosidades adoptadas.

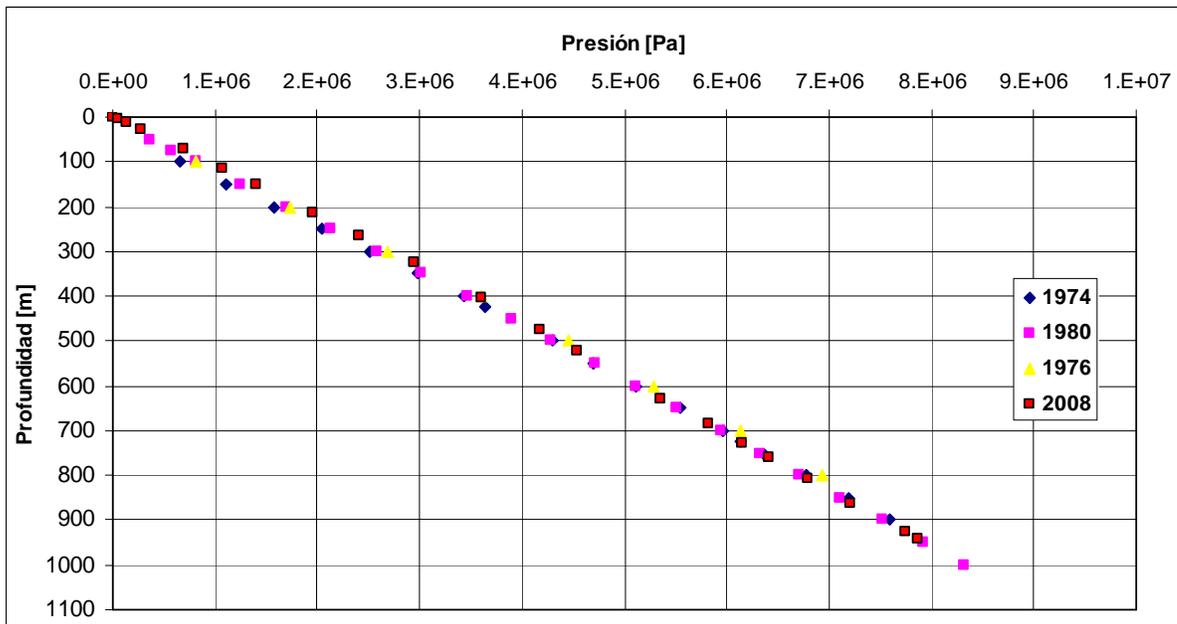
Tabla 6.4.- Porosidades de las unidades utilizadas

Formación	Φ promedio (*) [%]	Capa Modelo
Ignimbrita Tatio	33,1	10
Ignimbrita Tatio silicificada	12,3	3
Dacitas de Tucle	17,3	2, 9
Tobas de Tucle	30,8	-
Ignimbrita Puripicar	13,7	4 ,6, 7, 8
Brechas Salado	32,3	5

(*) Fuente: Estudio “Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica del campo geotermal ElTatio”, Figueroa 2013, basado en Hoshstein 1970, 1971 y Healy, 1974.

- Se utilizó un valor de calor específico de las unidades de 850 J/(Kg°C) (Fuente: Physical and Chemical Hydrogeology, Domenico and Schwarz).
- El caudal inyectado en el pozo 7 entra al reservorio a aproximadamente 800 m de profundidad, considerando que en esta zona es donde se obtuvieron mayores pérdidas de fluido durante la perforación del pozo. Esto implica que en el modelo numérico el flujo es inyectado en la capa 11.
- Se considera que el caudal de salida del pozo 10 es extraído aproximadamente entre los 660 y 800 m de profundidad debido a que en esta zona es donde se obtuvo mayores permeabilidades durante la perforación. Esto implica que en el modelo numérico el flujo es extraído del reservorio en la capa 10.
- Con respecto al tiempo de simulación, aunque el registro de presión en los pozos durante las pruebas se prolongó por aproximadamente 260 días, se consideró un período de 365 días, con el objetivo de analizar el tiempo que se demora el sistema en volver a su estado inicial. Se utilizó un paso de tiempo igual a 1 día.
- Considerando que las pruebas fueron efectuadas durante septiembre y que la variación estacional de precipitaciones muestra que estas se concentran en el período estival, se adoptó una recarga local nula para todo el período de análisis. Aunque en esta época la recarga local al sistema puede darse por deshielo, no se cuenta con antecedentes concretos que permitan estimar dicha recarga para el período específico de calibración. Debe aclararse que la recarga externa al sistema, dada por la condición de borde lateral (Condición de borde tipo Dirichlet) se mantiene para todo el período de simulación.
- Las condiciones iniciales del modelo fueron obtenidas de los resultados de la calibración en régimen permanente. Esto se justifica a partir de la información histórica disponible de los perfiles de presión registrados en el pozo 10, observándose que no existen variaciones significativas entre las presiones observadas en distintos períodos. Esto se puede observar gráficamente en la Figura 6.8.

Figura 6.8.- Evolución histórica de perfiles de presión en Pozo 10



- Para comparar los datos observados en el pozo de observación con los datos simulados, se utilizó la variable ΔP , correspondiente a la diferencia de presión obtenida con respecto a la situación natural (régimen permanente). De esta forma, no se toman en cuenta las diferencias obtenidas entre las presiones calibradas y observadas.
- Como valores iniciales de compresibilidad de poros se utilizó la relación de Hall (1953) que correlaciona la compresibilidad de poros con la porosidad, lo que se puede visualizar gráficamente en la Figura 6.9.

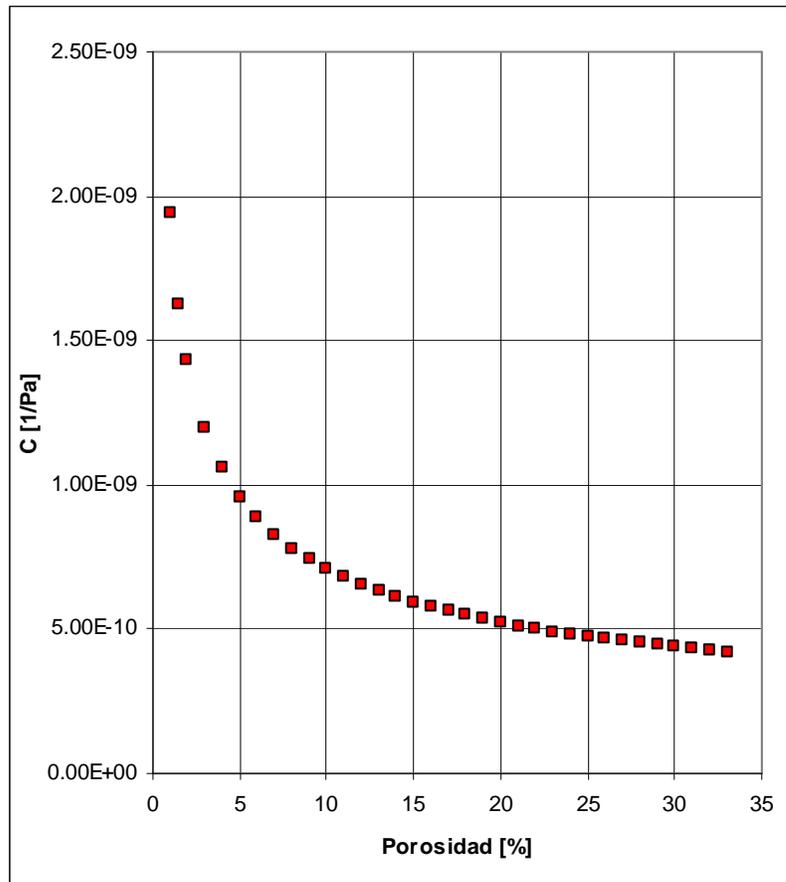
$$C_f = \frac{1.782}{\phi^{0.438}} \cdot 10^{-6} [1/psi]$$

donde:

C_f : Compresibilidad de poros [1/psi]

ϕ : Porosidad [-]

Figura 6.9.- Compresibilidad de poros en función de la porosidad del medio



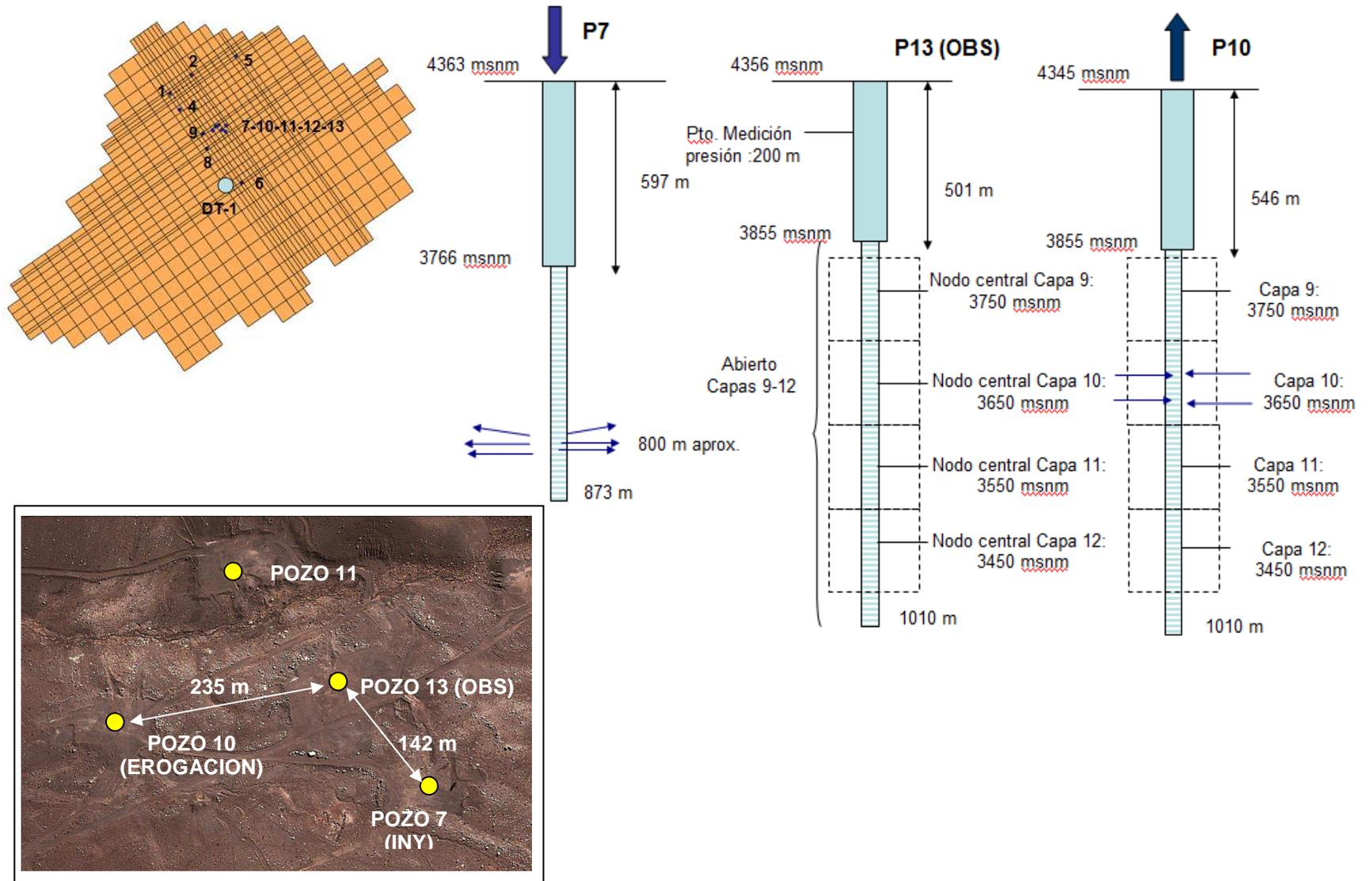
Considerando los valores de porosidad de las unidades resumidos en la Tabla 6.4, la tabla siguiente muestra los valores iniciales de compresibilidad de poros utilizados en el modelo.

Tabla 6.5.- Valores iniciales de compresibilidad de poros

CAPA	Porosidad [%]	Cf [1/Pa]
1	30,0	4.38E-10
2	17,3	5.57E-10
3	12,3	6.47E-10
4	13,7	6.17E-10
5	32,3	4.24E-10
6	13,7	6.17E-10
7	13,7	6.17E-10
8	13,7	6.17E-10
9	17,3	5.57E-10
10	33,1	4.19E-10

La Figura 6.10 muestra un perfil esquemático de los pozos involucrados en las pruebas.

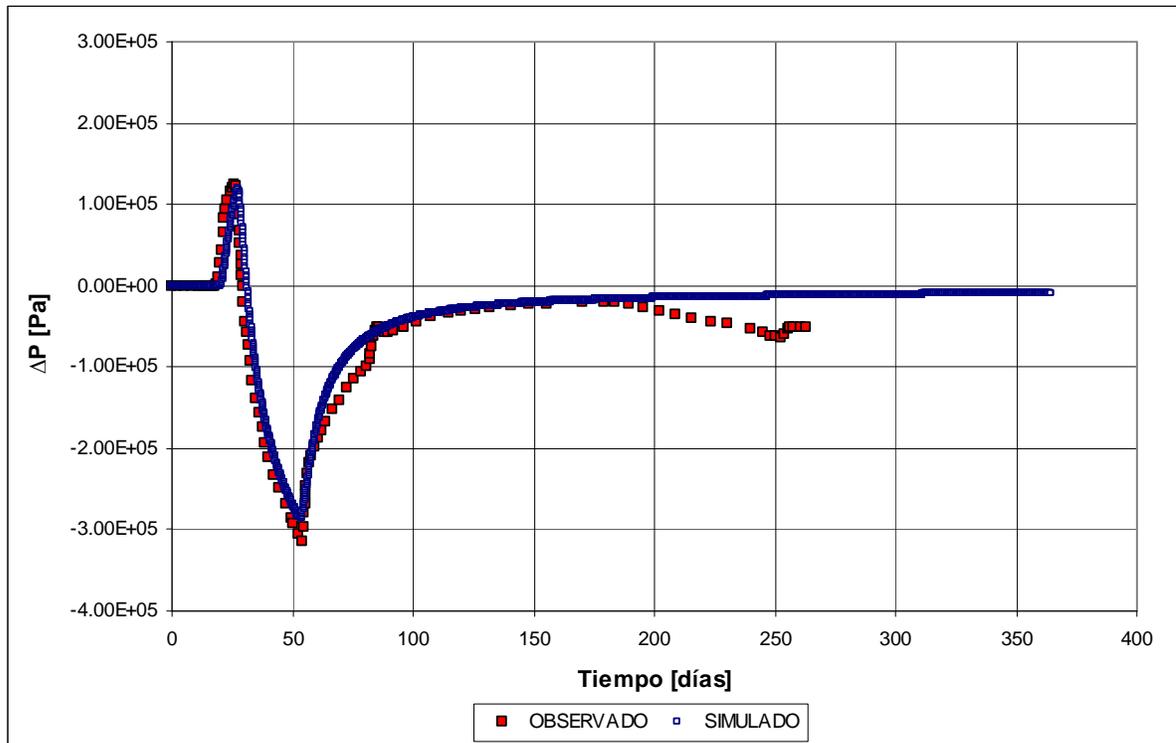
Figura 6.10.- Ubicación en planta y perfil esquemático de los pozos utilizados en las pruebas



6.3.3 Resultados de la calibración en régimen transiente

La Figura 6.11 muestra los resultados del proceso de calibración en régimen transiente, en donde se muestra la evolución temporal de ΔP (lo cual corresponde a la diferencia de presión obtenida con respecto al resultado de presión luego de la calibración en régimen permanente). Este valor fue obtenido a partir del promedio de los resultados de presión resultante en todas las capas del modelo coincidentes con la habilitación real del pozo de observación. El detalle de los resultados obtenidos en cada capa se muestra en la Figura 6.12.

Figura 6.11.- Datos de ΔP observada y simulada (promedio) en pozo 13 (*)



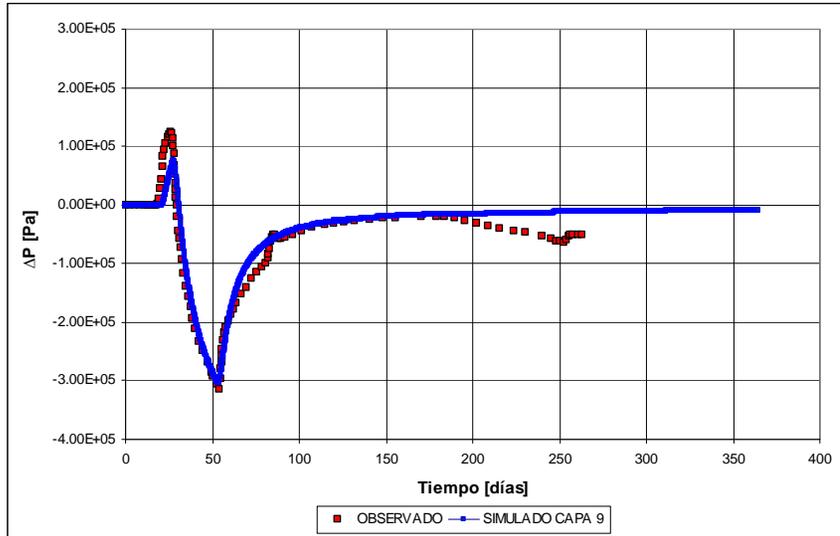
El valor promedio simulado en función del tiempo se calcula como $\bar{P}_t = 1/4 \cdot \sum_{i=1}^4 P_{it}$; donde P_{it} corresponde a la presión simulada en la capa i en el tiempo t .

Los valores de compresibilidad calibrados se resumen en la Tabla 6.6. Los resultados obtenidos indican que los valores de compresibilidad calibrados para las zonas 4, 5 y 6 del modelo que agrupan a las unidades hidrogeológicas principales reproducen bastante bien los valores de ΔP registrados en el pozo 13. No obstante lo anterior, al comparar los valores observados con los simulados en el pozo 1 (ver Figura 6.13), se observa que no existe respuesta del sistema en ese sector del modelo. Una posible solución a esto sería analizar una nueva zonificación para la asignación de compresibilidad de poros, de modo de aumentar la sensibilidad del modelo en ese sector.

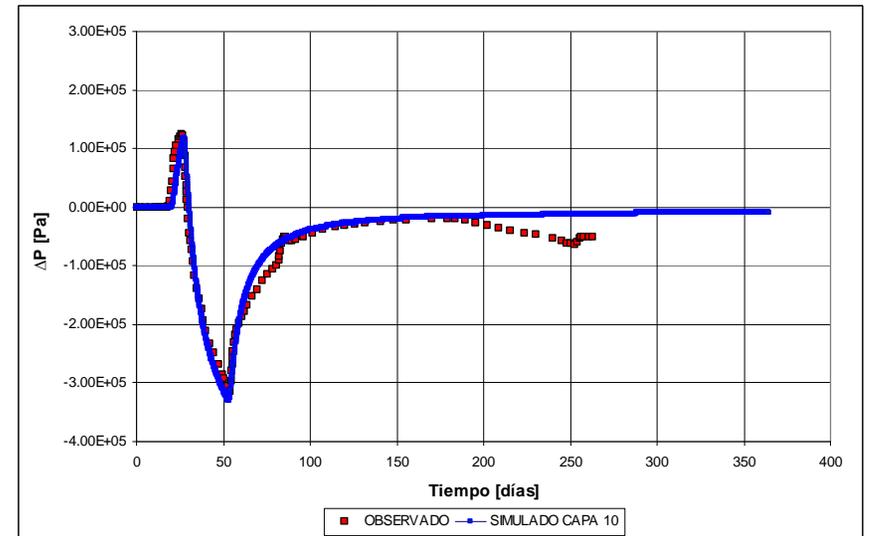
Al observar los resultados simulados en el pozo 4, ubicado más cerca de los pozos utilizados en las pruebas en relación al pozo 1, se observa que en esta zona el modelo presenta una respuesta ante la inyección y la posterior erogación del pozo 10, sin embargo, estas son menores en relación a los observados en el pozo 1, ubicado aguas abajo.

Figura 6.12.- Datos de ΔP observada y simulada en pozo 13 según capas del modelo

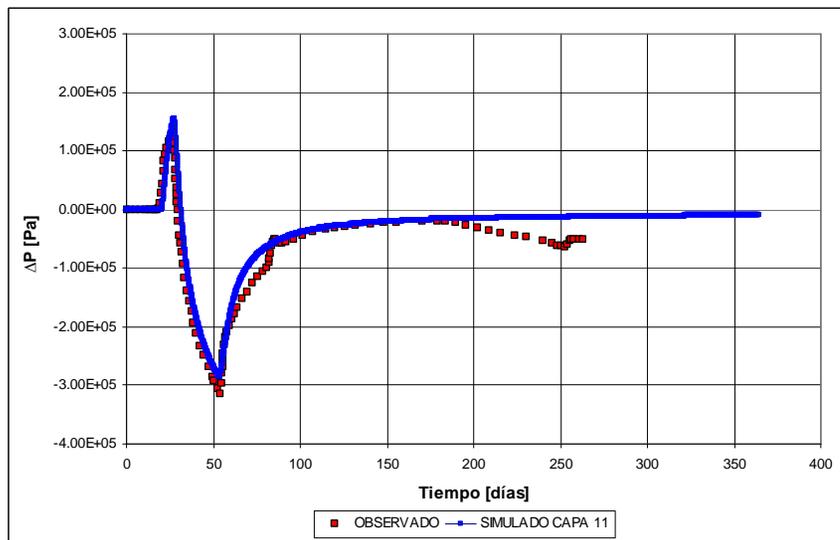
a) Resultados obtenidos en capa 9 del modelo



b) Resultados obtenidos en capa 10 del modelo



c) Resultados obtenidos en capa 11 del modelo



d) Resultados obtenidos en capa 12 del modelo

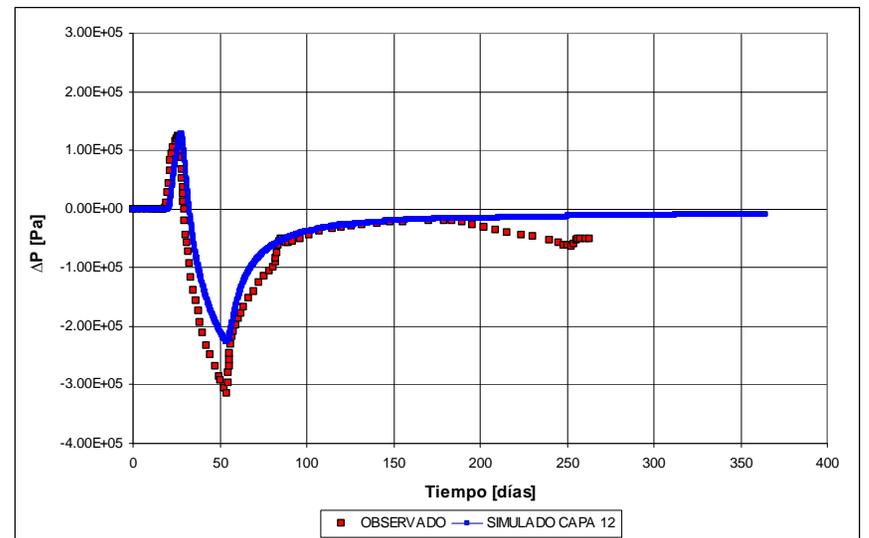


Tabla 6.6.- Parámetros de compresibilidad de poros calibrados

ZONA	UNIDAD	Compresibilidad de poros [1/Pa]
1	SUPERFICIAL	4.38E-10
2	DACITAS TUCLE	5.57E-10
3	IGN TATIO + TOBAS DE TUCLE	6.47E-10
4	IGN PURIPICAR +IGN SALADO	1.50E-09
5	BRECHA SALADO	1.50E-09
6	IGN PURIPICAR +IGN SALADO	1.50E-09
7,8	ENTORNO MANIF. SUPERFICIALES	6.17E-10
9	ENTORNO MANIF. SUPERFICIALES	5.57E-10
10	TOBAS DE TUCLE	4.19E-10

Figura 6.13.- Datos de ΔP observada y simulada en pozo 1

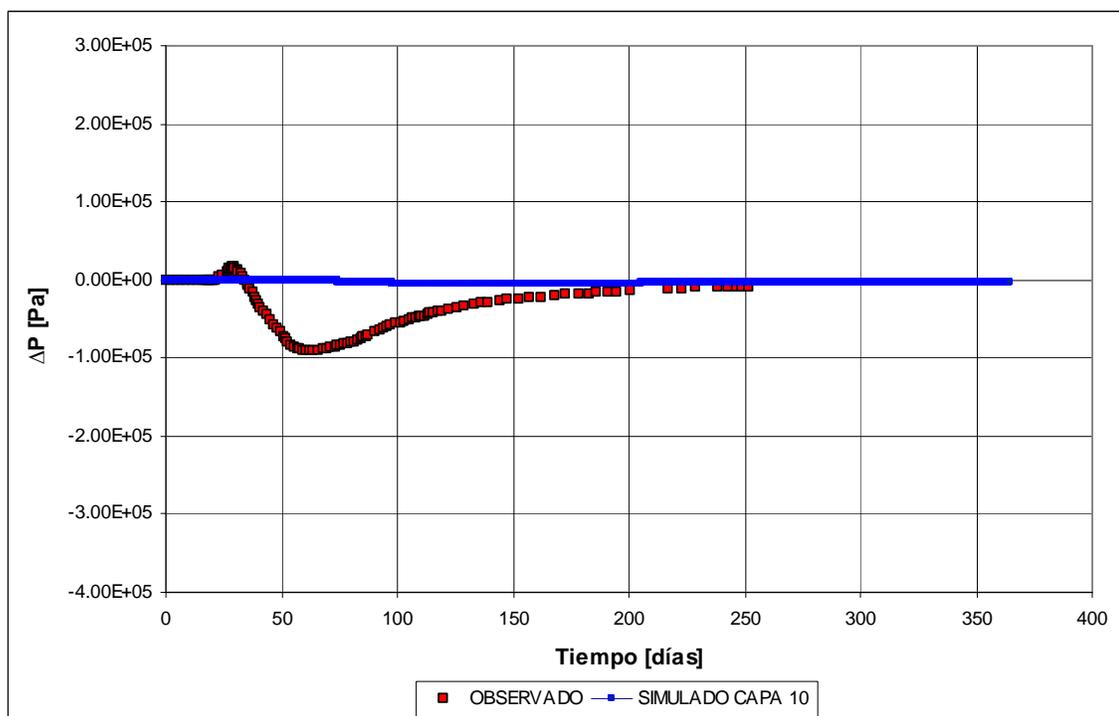
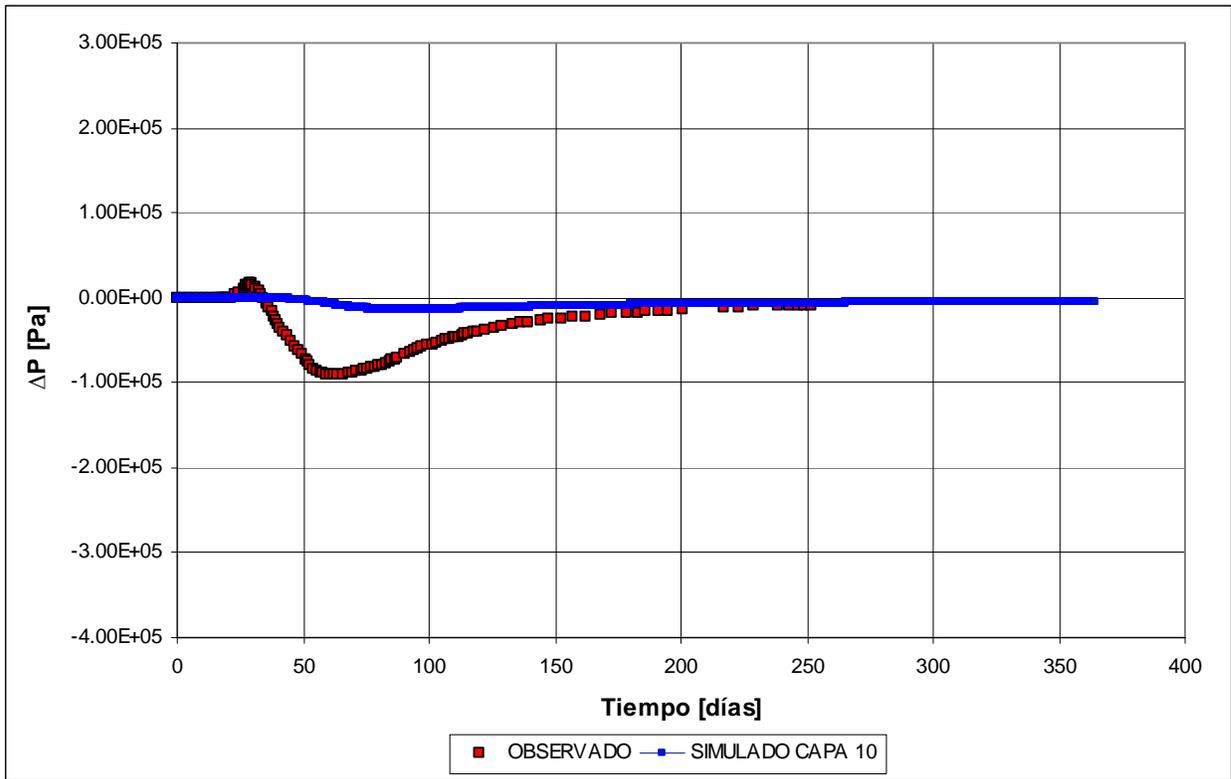


Figura 6.14.- Datos de ΔP simulada en pozo 4 (*)



(*) Datos observados corresponden a pozo 1, son incluidos como referencia.

7. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

En el presente capítulo se discuten los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad de parámetros para el modelo tanto en régimen permanente como transiente.

7.1 Régimen permanente

Con el objetivo de determinar aquellos parámetros que resultan más sensibles en los resultados del modelo en régimen permanente, se realizó un análisis de sensibilidad manual considerando los siguientes casos:

1. Variación de permeabilidades horizontales en las unidades hidrogeológicas principales.
2. Variación de permeabilidades verticales en la unidad Tobas de Tucle.
3. Variación del flujo de calor basal.
4. Variación de la magnitud de la recarga local.
5. Variación de conductividades térmicas en las unidades Tobas de Tucle e Ignimbrita Tatio.

La metodología utilizada consistió en variar porcentualmente cada parámetro de interés en régimen permanente y obtener los indicadores cuantitativos de la calibración (RMS, RN). Además se obtuvo en cada caso el caudal de salida del sistema. Luego, se graficaron los resultados obtenidos lo que permite analizar cuales son los parámetros que resultan más sensibles para los resultados del modelo.

La Tabla 7.1 resume los resultados obtenidos para cada escenario, los que se pueden visualizar gráficamente en las figuras siguientes.

Tabla 7.1.- Resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad

ESCENARIO	Parámetro	Variación porcentual [%]	Valor	RMS T° [°C]	RN T [%]	Q descarga [kg/s]
1	Kx-Ky Acuif. Principal [m ²]	-50	5.0E-15	38,39	28,22	165
		0	1.0E-14	31,89	23,44	201
		50	7.5E-16	34,03	25,02	234
2	Kz [m ²]	-50	2.5E-16	34,50	25,36	204
		0	5.0E-16	31,89	23,44	201
		50	7.5E-16	32,29	23,74	201
3	Flujo de calor basal [mW/m ²]	-50	30	32,84	24,14	196
		0	60	31,89	23,44	201
		50	90	31,62	23,25	205
		100	120	32,05	23,57	208
4	Recarga [kg/s]	-100	0	53,02	38,98	212
		-50	27.5	41,56	31,51	207
		0	55	31,89	23,44	201
		50	82.5	55,55	40,84	180
		100	110	92,26	67,83	147
5	Cond. Termica Capas 3 y 10 [W/(m ² °C)]	0	0.2	31,89	23,44	201
		150	0.5	34,02	25,01	201
		400	1	36,60	26,91	200

Figura 7.1.- Resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad (RMS)

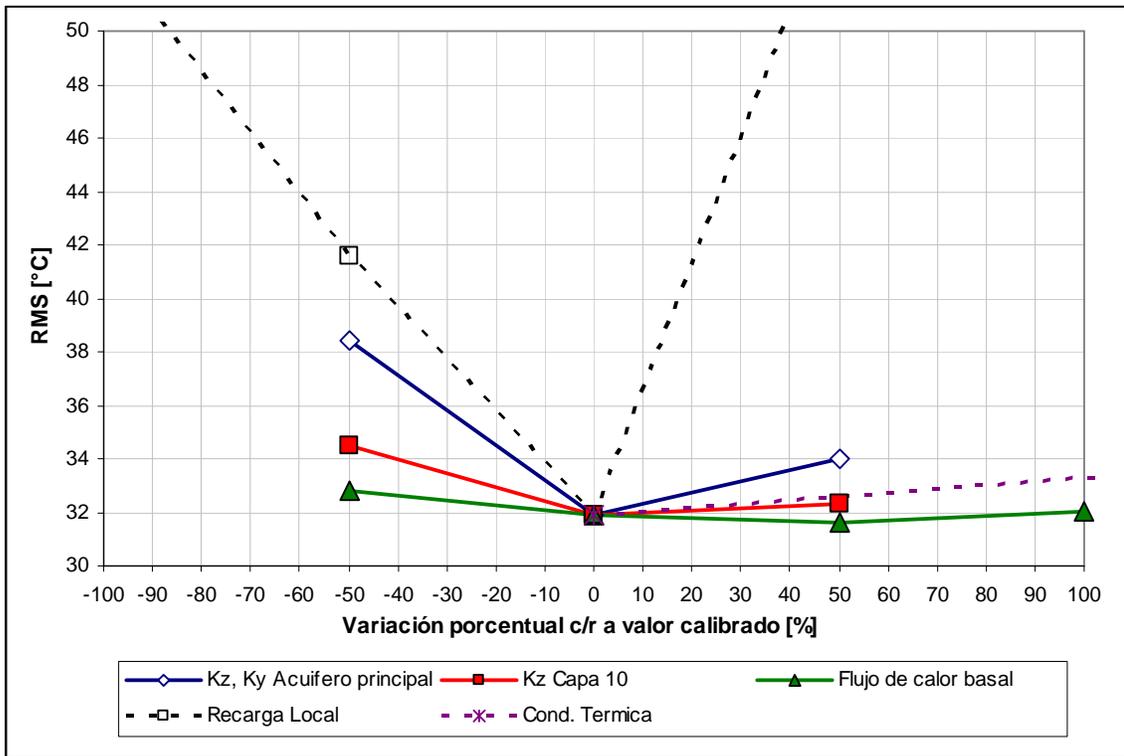
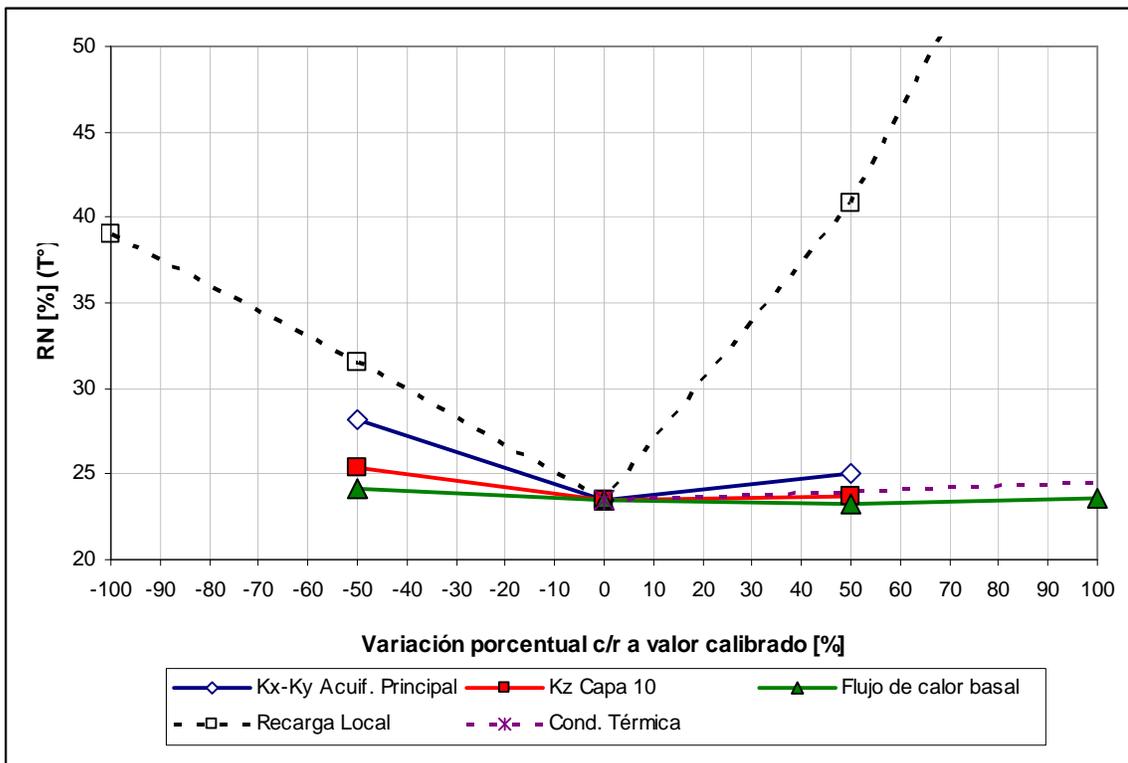
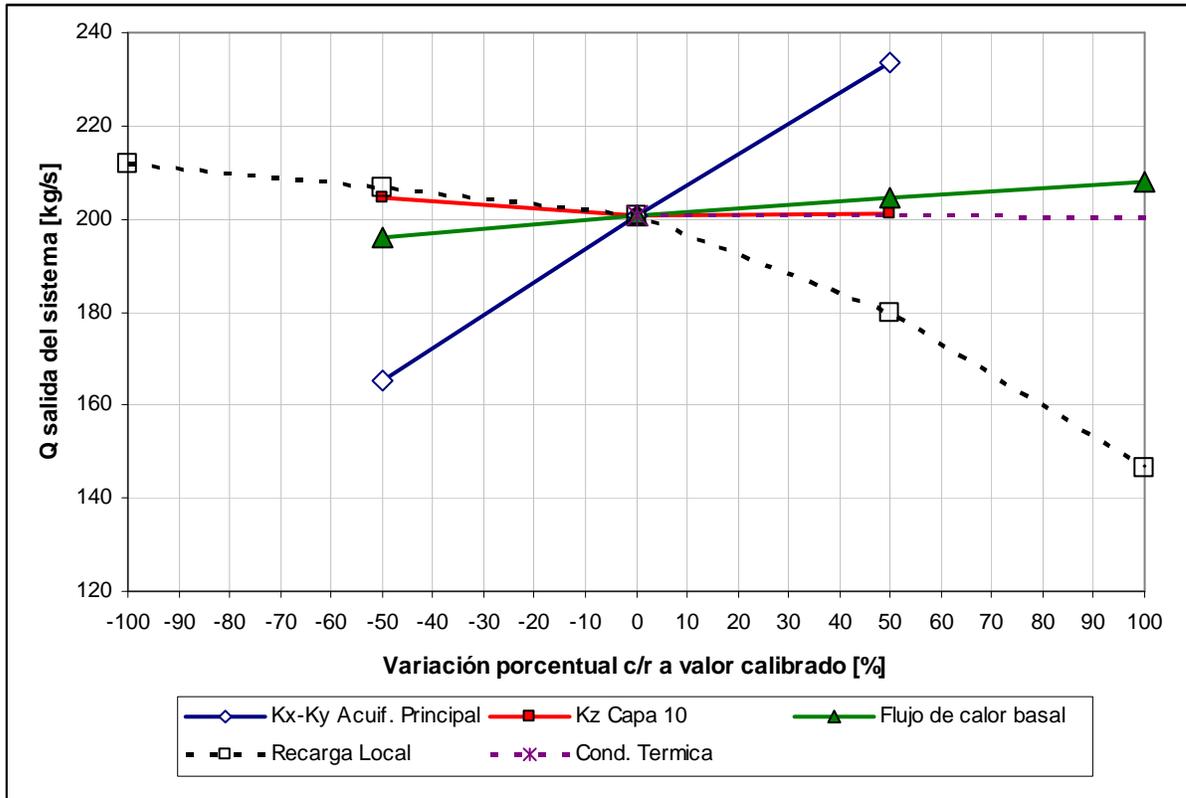


Figura 7.2.- Resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad (RN)



**Figura 7.3.- Resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad
(Caudal de salida del sistema)**



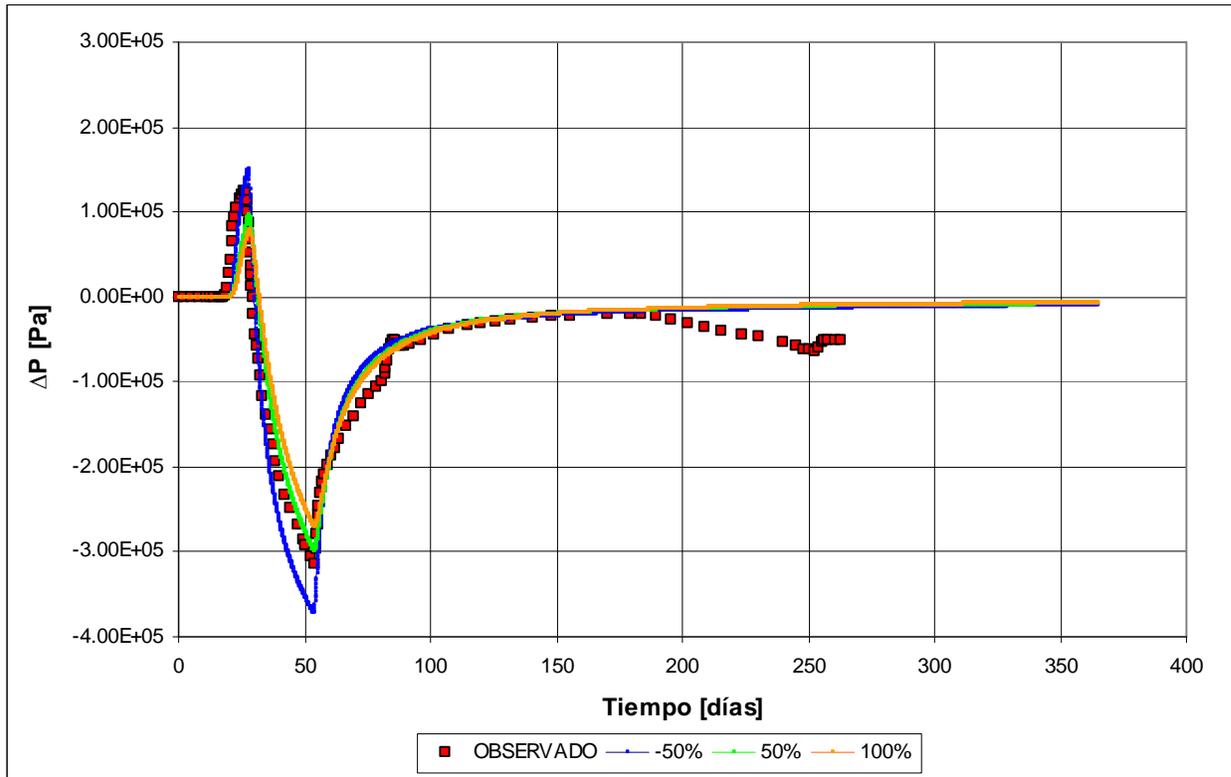
Los resultados permiten concluir que:

- El modelo numérico es muy sensible a los valores de recarga local utilizados.
- Los resultados del modelo son sensibles a la variación en la permeabilidad horizontal del acuífero principal, dado que condiciona tanto el caudal de salida del sistema como el transporte del calor por convección, lo que genera cambios apreciables en los perfiles de temperatura.
- Los resultados del modelo son muy poco sensibles al flujo de calor basal y a las conductividades térmicas analizadas, lo que indicaría que el sistema está dominado por un régimen convectivo.
- Las variaciones en permeabilidad vertical de las Tobas de Tucle que condiciona la interacción entre el acuífero principal y el acuífero más superficial contenido en las Dacitas de Tucle, no resultan demasiado relevantes en los resultados globales del modelo.

7.2 Régimen transiente

Para el caso del régimen transiente, se presenta un análisis de sensibilidad de la compresibilidad de poros, considerando una variación porcentual entre -50 y 100 % respecto de los valores calibrados. Los resultados se pueden visualizar gráficamente en la Figura 7.4.

Figura 7.4.- Resultados obtenidos de la variación de la compresibilidad de poros



De los resultados obtenidos se puede concluir que a medida que la compresibilidad de poros aumenta, menores son los efectos producidos tanto por la inyección como por la producción.

8. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Considerando el valor de los parámetros resultantes de la calibración del sistema tanto en régimen permanente como en régimen transiente, se generaron simulaciones del modelo con el objetivo de analizar la respuesta del sistema geotermal ante diversos escenarios de producción en pozos.

Se utilizaron dos escenarios para analizar la respuesta del sistema:

1.- Sustentabilidad ambiental: En este caso, para representar la producción desde los pozos, el caudal de extracción de cada pozo fue definido en función del rango real de tasas de producción observados en pozos existentes, correspondiendo a un valor fijo por pozo para cada escenario de simulación. Los valores utilizados, por lo tanto, corresponden a valores impuestos que no responden a las condiciones variables de presión en el reservorio ni a los índices de productividad de cada pozo, como si ocurre en realidad en un sistema geotermal. Luego, en este caso, se busca analizar la respuesta del sistema geotermal ante escenarios hipotéticos de explotación más que a representar en detalle el comportamiento de los pozos de producción y su capacidad de generación de energía. En particular se busca analizar las variaciones de presión y temperatura del sistema en sectores cercanos a la descarga del sistema.

2.- Sustentabilidad de producción: En este caso, a diferencia del caso anterior, la producción de los pozos depende de las condiciones variables de presión en el reservorio y de los índices de productividad de cada pozo, lo que es más representativo de la operación real de una central geotérmica. En particular se busca analizar las variaciones de presión y temperatura del sistema en los sectores cercanos a los pozos productivos, con el fin de estimar las condiciones generales de operación necesarias para la sustentabilidad de la producción.

8.1 Antecedentes de producción de pozos existentes

La Tabla 8.1 presenta a un resumen de los datos registrados de producción en pozos existentes, lo que permite definir caudales de producción acordes con lo observado en el sistema.

Tabla 8.1.- Resumen de datos registrados de producción en pozos (*)

POZO	WHP [atm] (1)	Masa Total [kg/hr]	Masa Total [kg/s]
7	5	278000	77,2
	9	276000	76,7
	11	274500	76,3
	14	267500	74,3
	17	255000	70,8
	20	236000	65,6
	23	198000	55,0
11	5	265650	73,8
	8	264370	73,4
	11	261270	72,6
	14	255170	70,9
	17	244330	67,9
	20	225510	62,6
	23	189350	52,6
10	2.08	155637	43,2
	11.94	111677	31,0
	7.35	167763	46,6
	8.9	209975	58,3
	8.97	206691	57,4
	13.17	346610	96,3
	8.54	328890	91,4
	7.93	314120	87,3
8	-	270000	75,0
9	-	200000	55,6

(*) Información obtenida de Informe "Pozos Tatio General" elaborado por el Comité para el aprovechamiento de la energía geotérmica-CORFO, 1975.; (1) WHP: Presión en la cabeza del pozo.

De la tabla anterior se observa que los caudales de producción medidos fluctúan entre 31 y 96 kg/s. De acuerdo con La tabla siguiente muestra la producción estimada en pozos en caso de la operación de una central:

Tabla 8.2.- Estimación de producción en pozos durante operación de central (*)

Pozo	Masa Total [kg/hr]	Masa Total [kg/s]
7	270000	75.0
10	330000	91.7
11	250000	69.4

(*) Información obtenida de Informe "Pozos Tatio General" elaborado por el Comité para el aprovechamiento de la energía geotérmica-CORFO, 1975.

8.2 Escenario de sustentabilidad ambiental

Considerando los antecedentes presentados, se definieron tres escenarios base (1, 2, 3) en los cuales se sometió al sistema a distintas configuraciones de producción mediante la inclusión de pozos de bombeo, correspondientes a pozos existentes no operativos en la actualidad. En cada escenario se definieron 4 subescenarios (a,b,c, d) correspondientes a distintos porcentajes de reinyección en relación al caudal total de producción, de forma de analizar la respuesta del sistema en términos de presión y temperatura. Para todos los escenarios se consideró un período de simulación de 100 años, utilizando los pozos N° 1 y N° 2 como pozos de observación, dado que se ubican cerca de los sectores de las manifestaciones principales del sistema geotermal.

Los escenarios de simulación analizados se presentan en la Tabla 8.3:

Tabla 8.3.- Resumen de escenarios de simulación considerados

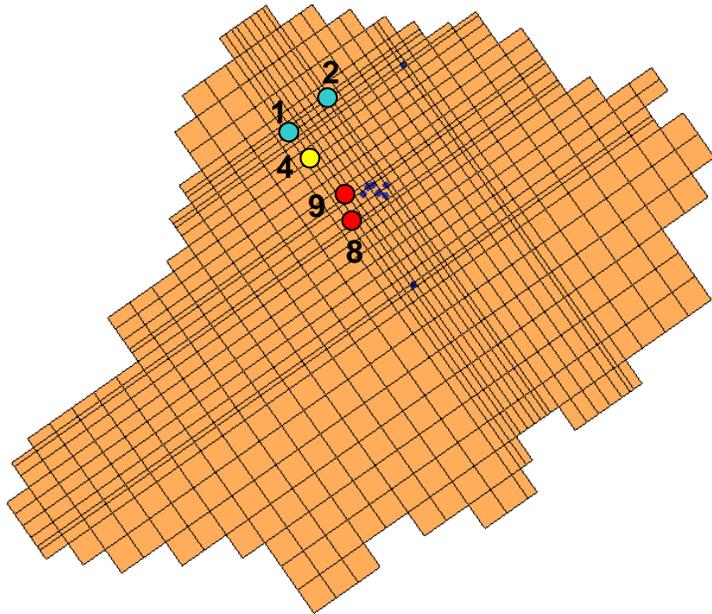
ESCENARIO	SUB ESCENARIO	Pozos Bombeo	Pozos Inyección	Pozo Observación	Q bombeo /pozo [k/s]	% Reinyección	Q total bombeo [kg/s]	Q Inyección [kg/s]	T° iny [°]
1	a	8 y 9	4	1 y 2	50	90	100	90	65
	b	8 y 9	4	1 y 2	50	70	100	70	65
	c	8 y 9	4	1 y 2	50	50	100	50	65
	d	8 y 9	4	1 y 2	50	0	100	0	65
2	a	DT-1(*)	7	1 y 2	100	90	100	90	65
	b	DT-1	7	1 y 2	100	70	100	70	65
	c	DT-1	7	1 y 2	100	50	100	50	65
	d	DT-1	7	1 y 2	100	0	100	0	65
3	a	8-9-DT1	4 y 7	1 y 2	DT1: 100; 8-9: 50	90	200	180	65
	b	8-9-DT1	4 y 7	1 y 2	DT1: 100; 8-9: 50	70	200	140	65
	c	8-9-DT1	4 y 7	1 y 2	DT1: 100; 8-9: 50	50	200	100	65
	d	8-9-DT1	4 y 7	1 y 2	DT1: 100; 8-9: 50	0	200	0	65

(*) Corresponde al pozo de producción utilizado en las pruebas efectuadas en el año 2008.

Los resultados obtenidos se presentan en las figuras siguientes.

Figura 8.1.- Resultados de variación temporal de ΔP en pozos de observación N° 1 y 2 (Escenario de simulación N° 1)

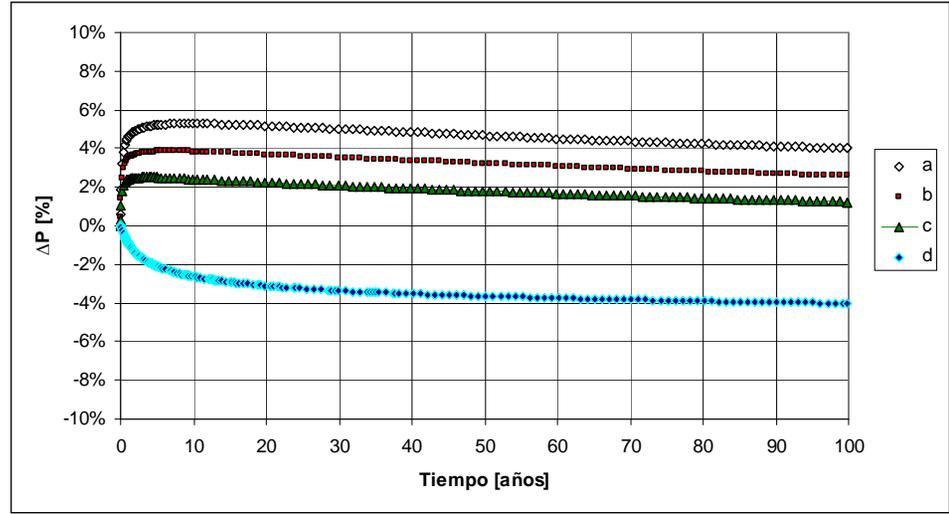
Distribución en planta de pozos en el modelo



Simbología:

- Pozo de bombeo/producción
- Pozos de inyección
- Pozos de observación
- Otros pozos

Pozo de observación N° 1



Pozo de observación N° 2

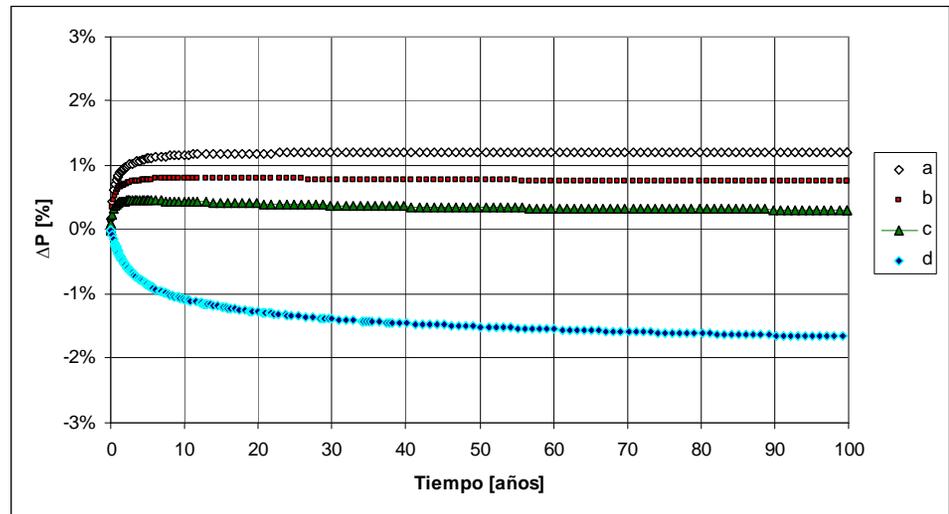
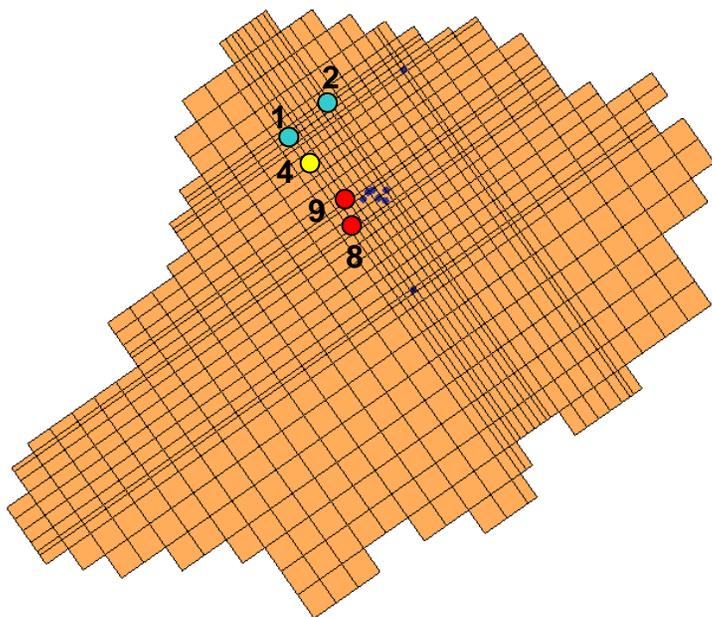


Figura 8.2.- Resultados de variación temporal de ΔT en pozos de observación N° 1 y 2 (Escenario de simulación N° 1)

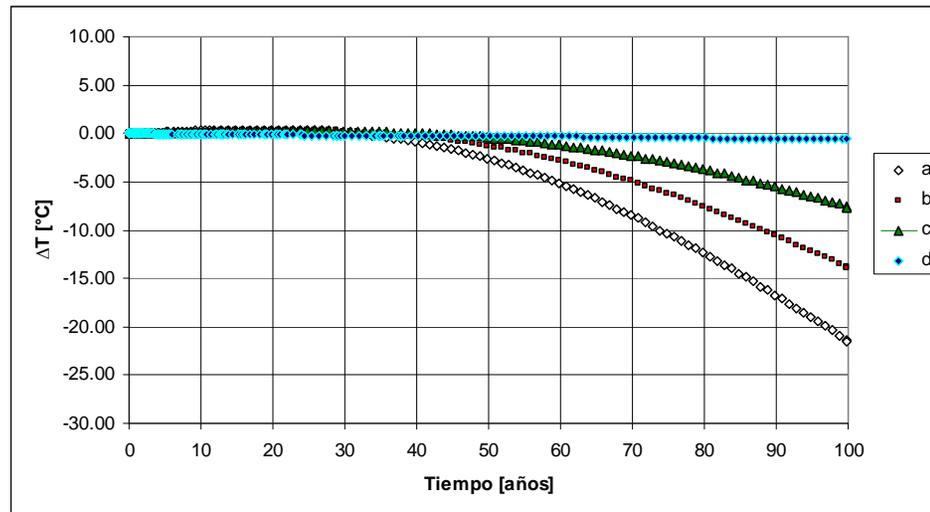
Distribución en planta de pozos en el modelo



Simbología:

- Pozo de bombeo/producción
- Pozos de inyección
- Pozos de observación
- Otros pozos

Pozo de observación N° 1



Pozo de observación N° 2

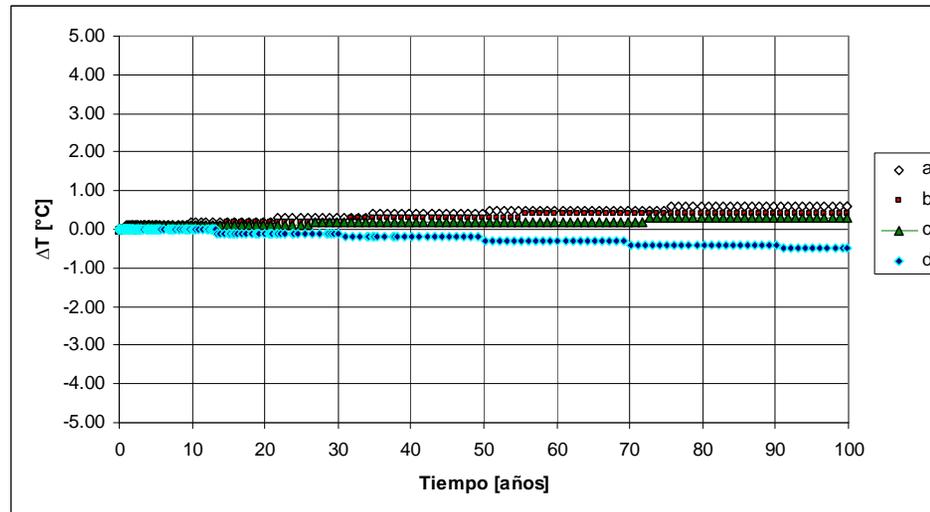
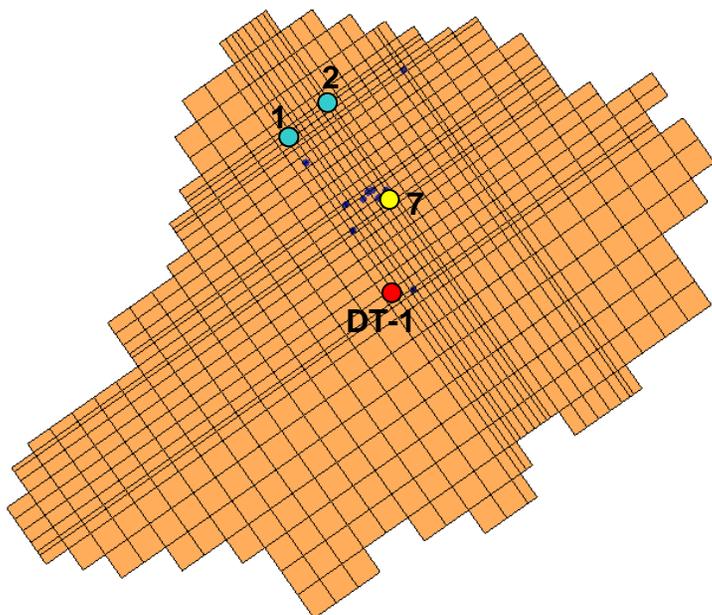


Figura 8.3.- Resultados de variación temporal de ΔP en pozos de observación N° 1 y 2 (Escenario de simulación N°2)

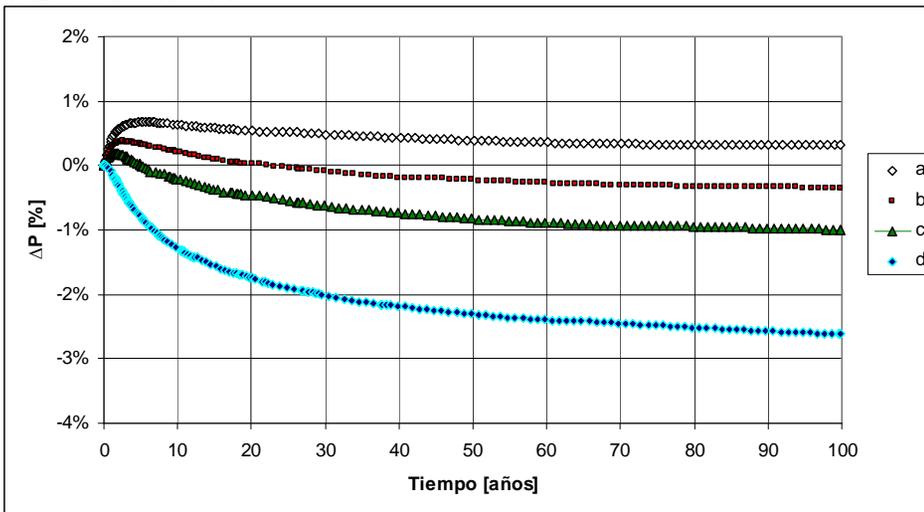
Distribución en planta de pozos en el modelo



Simbología:

- Pozo de bombeo/producción
- Pozos de inyección
- Pozos de observación
- Otros pozos

Pozo de observación N° 1



Pozo de observación N° 2

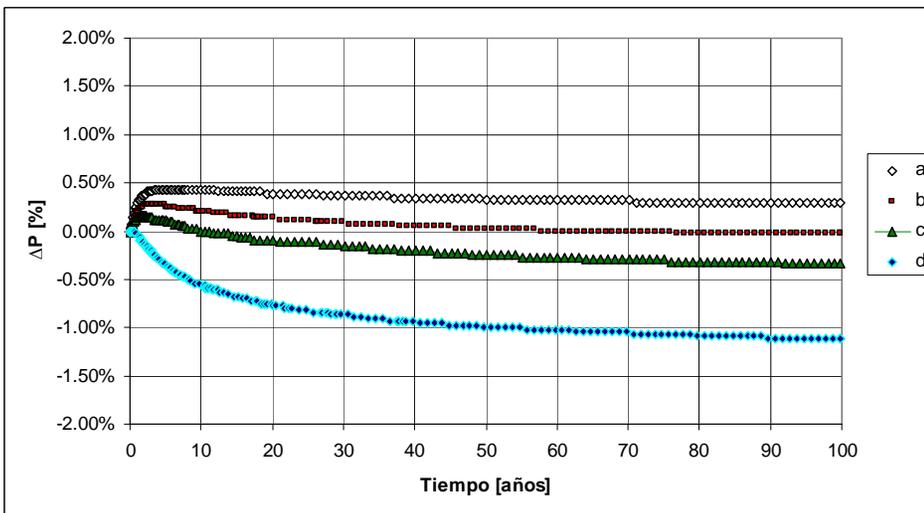
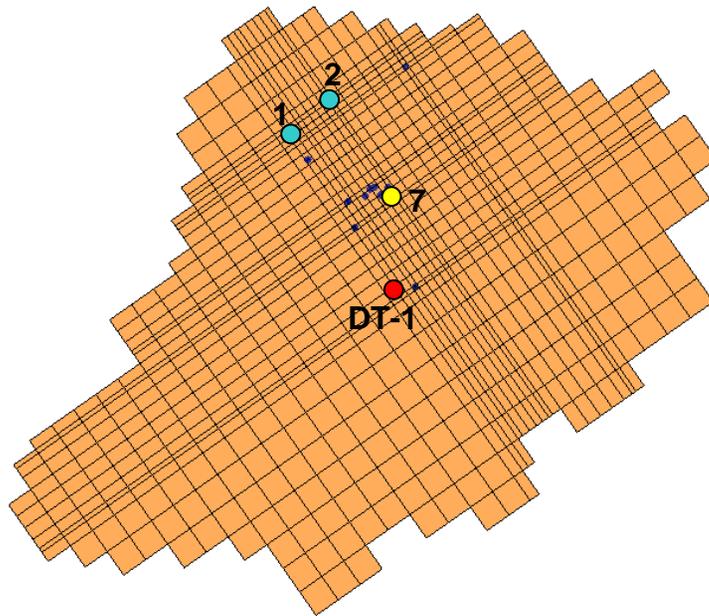


Figura 8.4.- Resultados de variación temporal de ΔT en pozos de observación N° 1 y 2 (Escenario de simulación N°2)

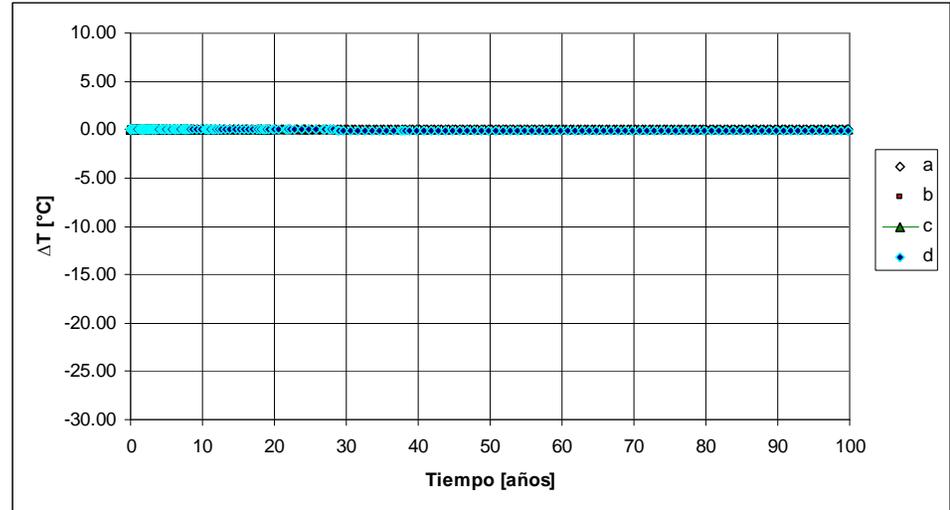
Distribución en planta de pozos en el modelo



Simbología:

- Pozo de bombeo/producción
- Pozos de inyección
- Pozos de observación
- Otros pozos

Pozo de observación N° 1



Pozo de observación N° 2

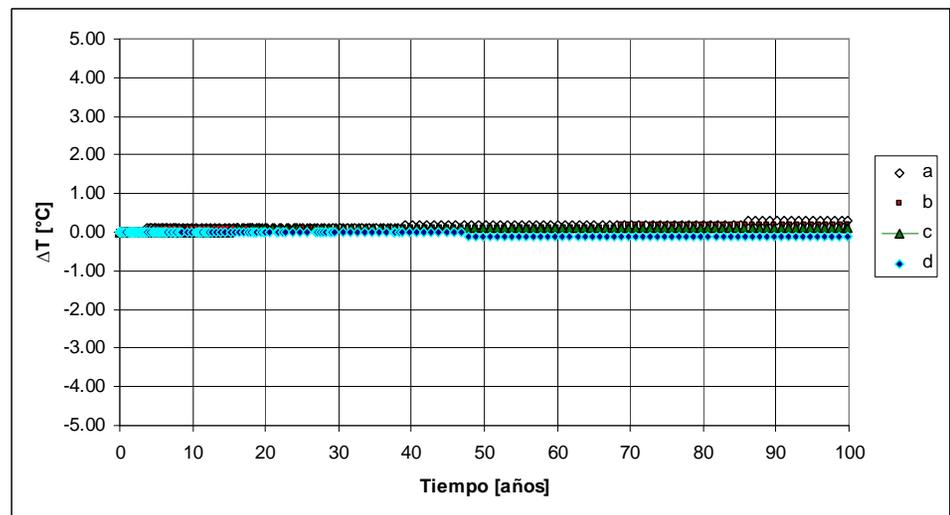
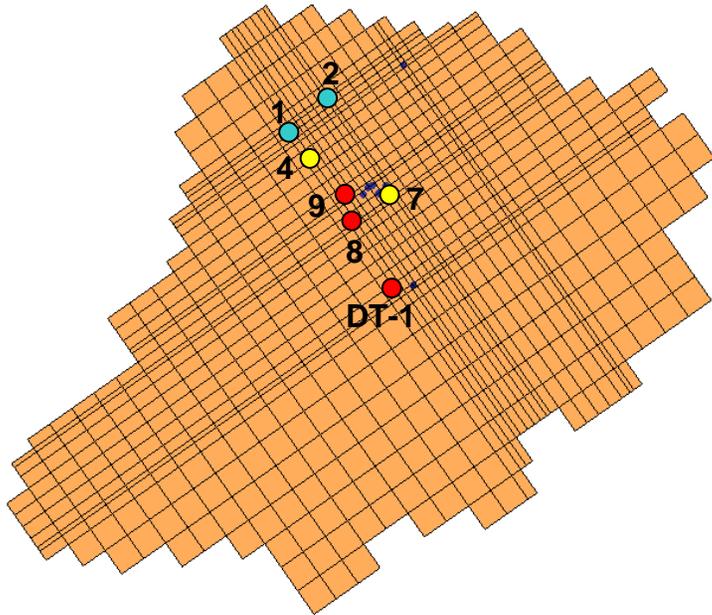


Figura 8.5.- Resultados de variación temporal de ΔP en pozos de observación N° 1 y 2 (Escenario de simulación N°3)

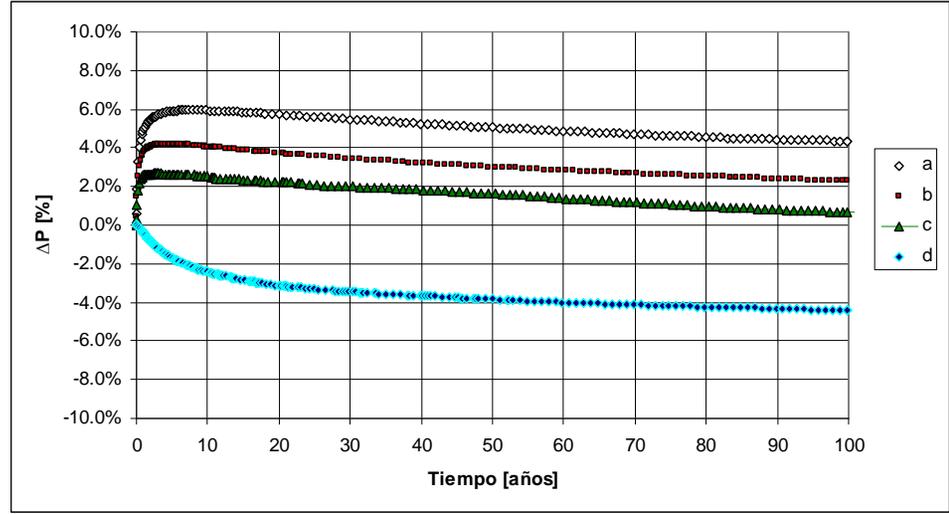
Distribución en planta de pozos en el modelo



Simbología:

- Pozo de bombeo/producción
- Pozos de inyección
- Pozos de observación
- Otros pozos

Pozo de observación N° 1



Pozo de observación N° 2

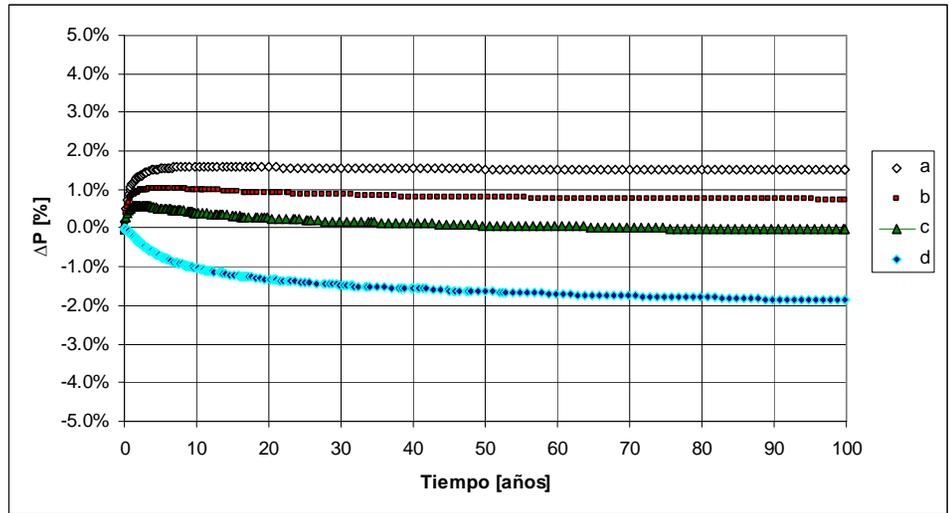
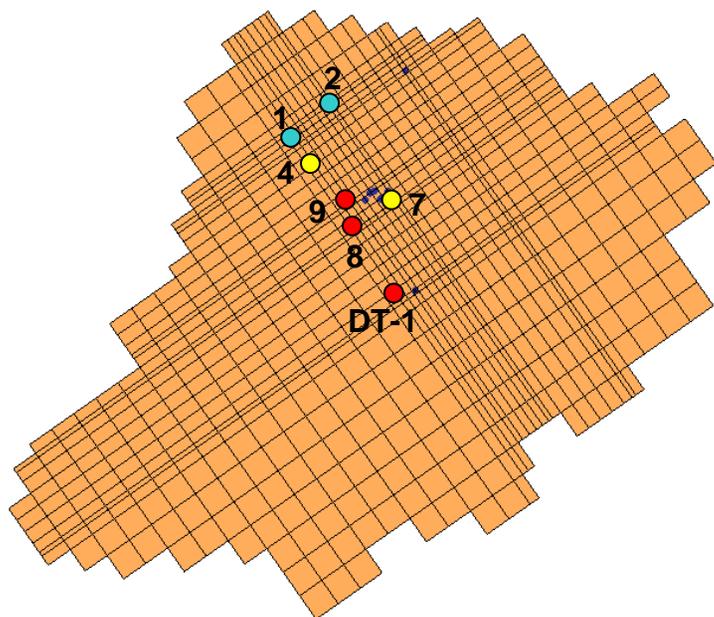


Figura 8.6.- Resultados de variación temporal de ΔT en pozos de observación N° 1 y 2 (Escenario de simulación N°3)

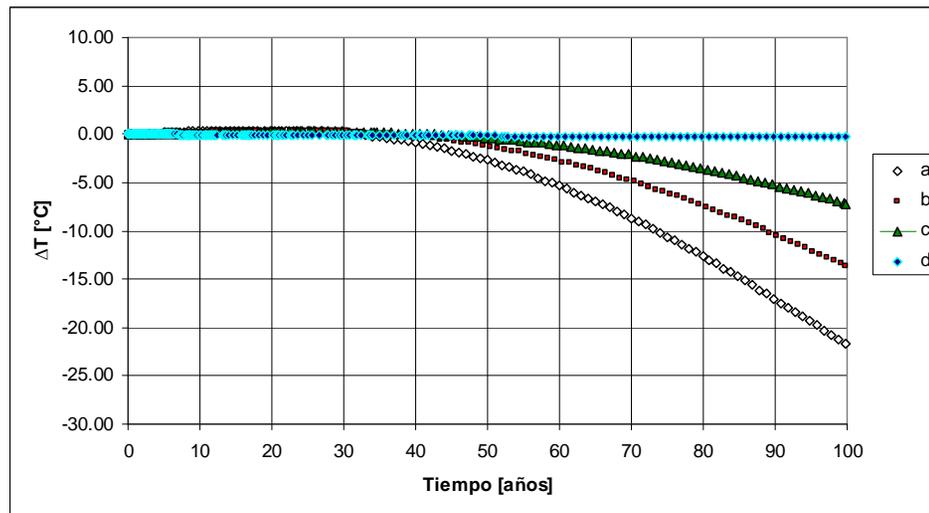
Distribución en planta de pozos en el modelo



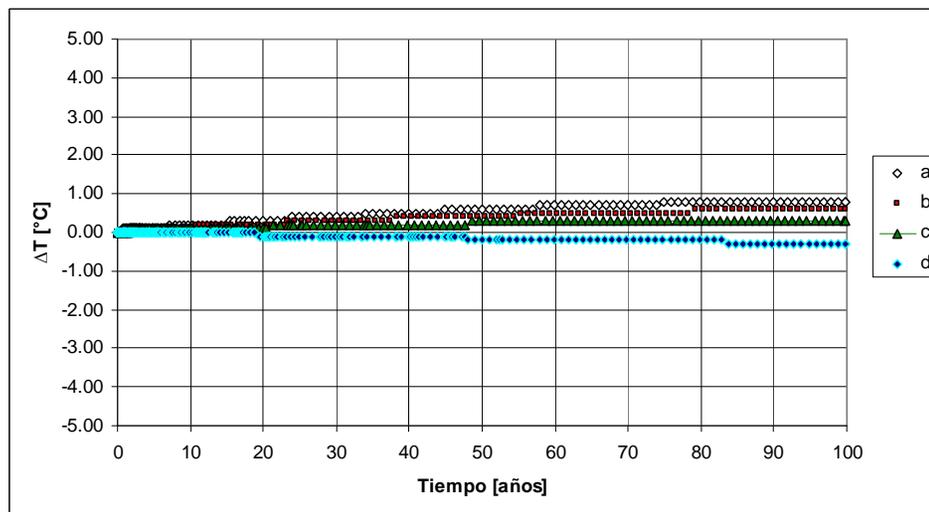
Simbología:

- Pozo de bombeo/producción
- Pozos de inyección
- Pozos de observación
- Otros pozos

Pozo de observación N° 1



Pozo de observación N° 2



De los resultados obtenidos se puede apreciar que en líneas generales, el pozo 2, ubicado en las cercanías de las descargas naturales en la zona norte del sistema, es poco sensible a los escenarios de producción y reinyección considerados. Los cambios son más apreciables en el pozo 1, que se ubica más cerca de los pozos de explotación considerados.

Se observa que a medida que aumenta el porcentaje de reinyección aumenta la presión en los pozos de monitoreo. Lo contrario ocurre con la temperatura, ya que esta tiende a disminuir a medida que aumenta el caudal de reinyección (al menos en el pozo de observación N° 1 que es el más cercano al pozo de reinyección), dada la menor temperatura del agua reinyectada.

Debe señalarse que los escenarios de simulación fueron generados a base de los parámetros calibrados tanto en régimen permanente como en transiente, donde para el caso particular del régimen transiente, el modelo calibrado resultó ser poco sensible aguas abajo de los pozos involucrados en las pruebas efectuadas en El Tatio el año 2008. Esto implicaría que de mejorarse la calibración en régimen transiente, los resultados presentados para los escenarios de simulación podrían presentar mayores diferencias de presión y temperatura en relación al régimen natural.

Finalmente, la Tabla 8.4 resume los caudales de descarga natural del sistema para cada escenario de simulación considerado, luego de 100 años de explotación del sistema. Se incluye el escenario de calibración que corresponde a la situación natural del sistema. Como es de esperarse, se observa que en los escenarios donde no existe reinyección (escenarios 1d, 2d y 3d), el caudal de salida del sistema disminuye dependiendo de la magnitud de la producción.

Tabla 8.4.- Caudales de descarga natural del sistema según escenario de simulación (t=100 años)

ESCENARIO	SUB ESCENARIO	Q salida Norte [kgs]	Q salida Oeste [kgs]	Q salida Sur [kgs]	Q descarga total [kg/s]	% c/r a Q total calibrado de descarga
CALIBRACION	-	92	75	34	201	0
1	a	131	88	12	231	15
	b	124	84	11	219	9
	c	117	79	11	207	3
	d	70	58	24	151	-25
2	a	95	73	33	201	0
	b	91	73	33	197	-2
	c	87	70	32	188	-6
	d	76	63	28	167	-17
3	a	110	88	37	236	17
	b	100	81	34	215	7
	c	90	74	31	195	-3
	d	66	55	23	144	-28

8.3 Escenario de sustentabilidad de producción

Dado que la producción de un pozo geotérmico depende de las condiciones de presión, temperatura y permeabilidad en el reservorio, para este escenario se utilizaron pozos de producción (Deliverability Wells en TOUGH2) cuyo flujo de salida queda determinado mediante la siguiente expresión:

$$q_{\beta} = \frac{k_{r\beta}}{\mu_{\beta}} \cdot \rho_{\beta} \cdot PI \cdot (P_{\beta} - P_{wb})$$

Donde:

- q_{β} : Flujo de salida de un pozo según fase [kg/s]
- $k_{r\beta}$: Permeabilidad relativa según fase [m²]
- μ_{β} : Viscosidad [Pa-s]
- ρ_{β} : Densidad de la fase [kg/m³]
- PI : Índice de Productividad del Pozo (Productivity Index) [m³]
- P_{β} : Presión en el reservorio [Pa]
- P_{wb} : Presión en la boca del pozo [Pa]

Luego, para cada pozo utilizado en la simulación se estimaron índices de productividad (PI) y presión en la boca del pozo (Pwb). Estos parámetros fueron obtenidos a partir de simulaciones independientes (se “abre” un pozo a la vez) en los cuales se ajustaron los parámetros requeridos de forma de que el flujo de salida promedio del pozo se ajustara a los datos reales de producción registrados (Tabla 8.1 en el caso de los pozos 8 y 9).

La tabla siguiente resume los valores de PI y Pwb adoptados para cada pozo de producción:

Tabla 8.5.- Índices de productividad y po estimados para cada pozo

Pozo	PI [m3]	Pwb [Pa]	Q producción promedio [kg/s]
8	2.00E-11	1.10E+06	75
9	1.00E-11	2.65E+06	56
DT-1	3.10E-12	8.00E+06	96

Dado que el caudal de producción de producción es variable los caudales de reinyección fueron definidos a partir del escenario de simulación en el cual todos los pozos se encuentran produciendo y no existe reinyección al acuífero. Esta simulación arroja los caudales de producción promedio señalados en la siguiente tabla:

Tabla 8.6.- Caudales de producción promedio (Escenario sin reinyección)

POZO	Q prom ext
8	67
9	49
DT-1	94

Luego, utilizando los caudales obtenidos para el escenario sin reinyección se obtuvieron los caudales de reinyección para distintos porcentajes. La tabla siguiente resume los caudales de reinyección obtenidos:

Tabla 8.7.- Caudales de reinyección definidos

Pozo de Producción	Q promedio de producción [kg/s] (*)	Pozo de Inyección	% de Reinyección			
			90	70	50	0
			Caudal de Inyección [kg/s]			
8	67	4	60	47	33	0
9	49	4	44	34	24	0
DT-1	94	7	85	66	47	0

(*) Caudal de producción promedio por pozo sin reinyección al acuífero.

Luego, la tabla siguiente resume los escenarios de simulación considerados:

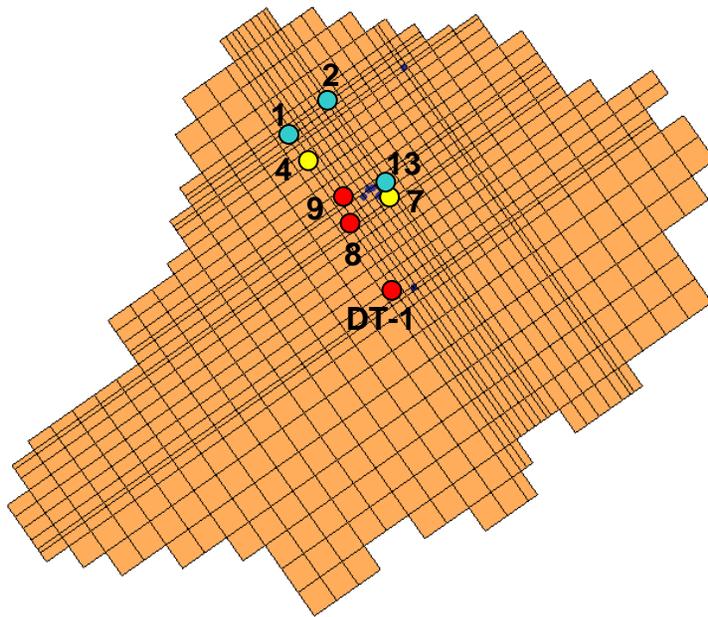
**Tabla 8.8.- Resumen de escenarios de simulación considerados
(Escenario de sustentabilidad de producción)**

ESCENARIO	SUB-ESCENARIO	Pozos producción	Pozos Iny.	Pozos Obs.	Q bombeo/pozo	% Reinyección	Q inyección Pozo 4 [kg/s]	Q inyección Pozo 7 [kg/s]	Q inyección total [kg/s]	T° Inyección [°C]
1	a	8-9-DT1	4 y 7	13,1,2	Var	90	104	85	189	65
	b	8-9-DT1	4 y 7	13,1,2	Var	70	81	66	147	65
	c	8-9-DT1	4 y 7	13,1,2	Var	50	58	47	105	65
	d	8-9-DT1	4 y 7	13,1,2	Var	0	0	0	0	65

Los resultados obtenidos se presentan en las figuras siguientes.

Figura 8.7.- Resultados de variación temporal de ΔT en pozos de observación N° 13 y pozo de inyección N° 4 (Escenario de sustentabilidad de producción)

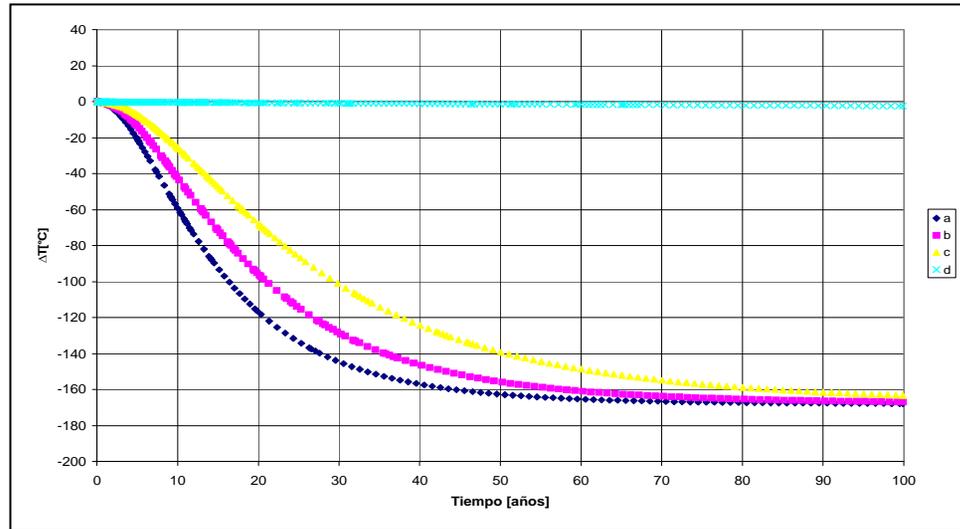
Distribución en planta de pozos en el modelo



Simbología:

- Pozo de bombeo/producción
- Pozos de inyección
- Pozos de observación
- Otros pozos

Pozo de observación N° 13



Pozo de inyección N° 4

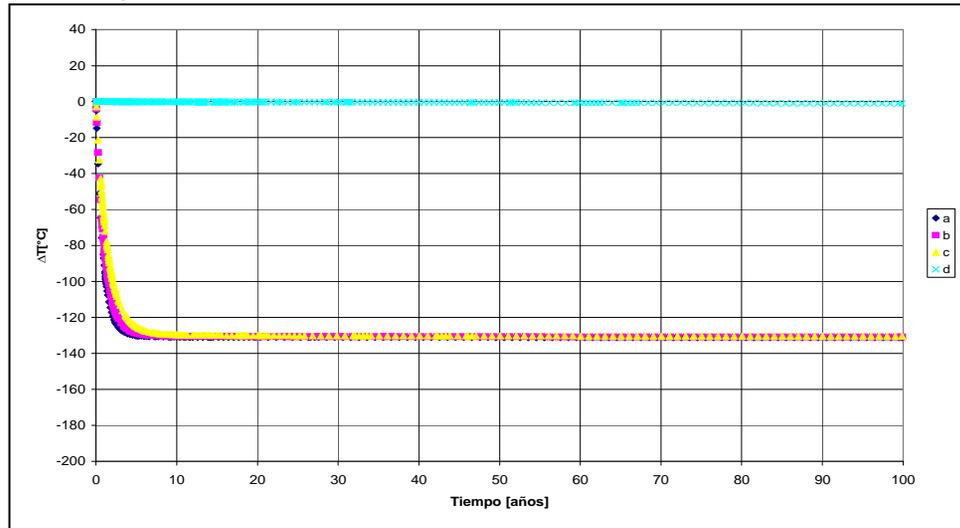
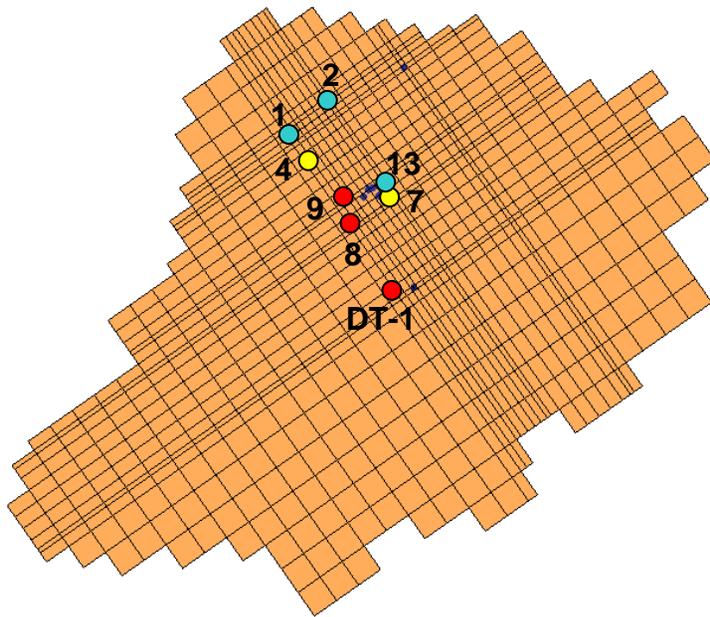


Figura 8.8.- Resultados de variación temporal de ΔP en pozos de observación N° 13 y pozo de inyección N° 4 (Escenario de sustentabilidad de producción)

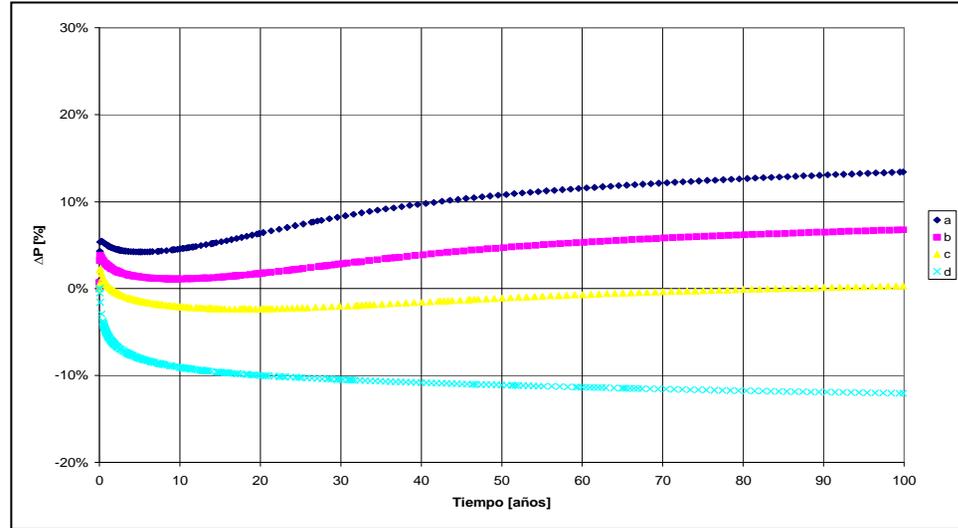
Distribución en planta de pozos en el modelo



Simbología:

- Pozo de bombeo/producción
- Pozos de inyección
- Pozos de observación
- Otros pozos

Pozo de observación N° 13



Pozo de inyección N° 4

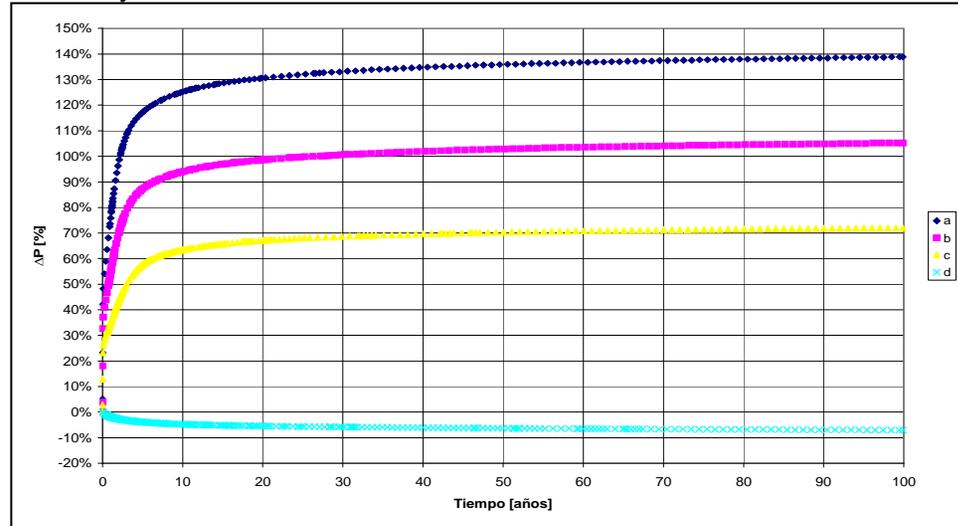
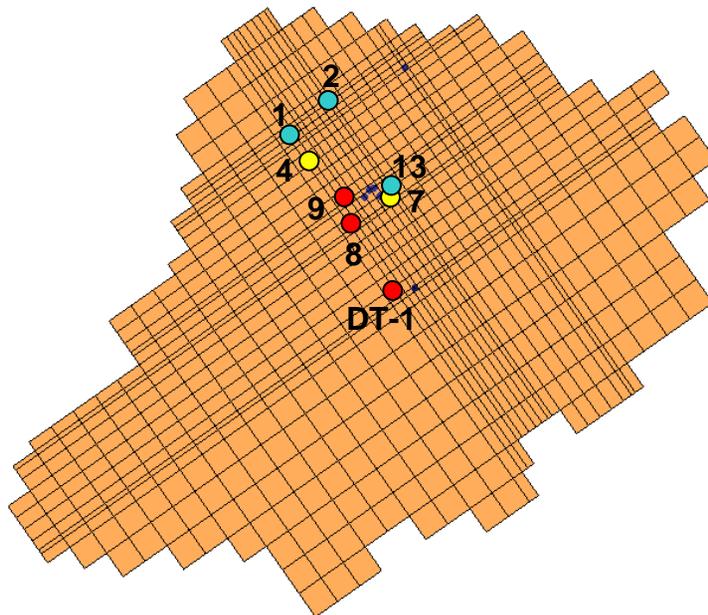


Figura 8.9.- Resultados de variación temporal de ΔT en pozos de observación N° 1 y 2 (Escenario de sustentabilidad de producción)

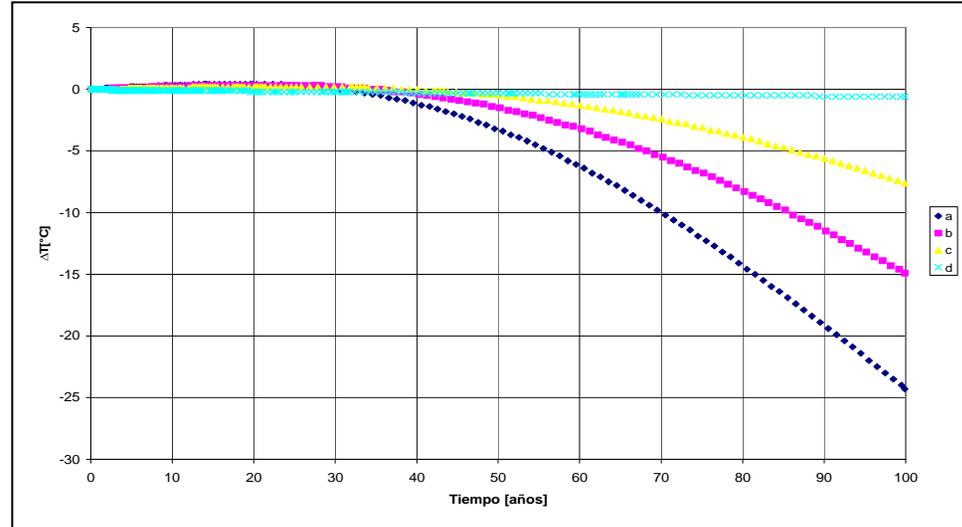
Distribución en planta de pozos en el modelo



Simbología:

- Pozo de bombeo/producción
- Pozos de inyección
- Pozos de observación
- Otros pozos

Pozo de observación N° 1



Pozo de observación N° 2

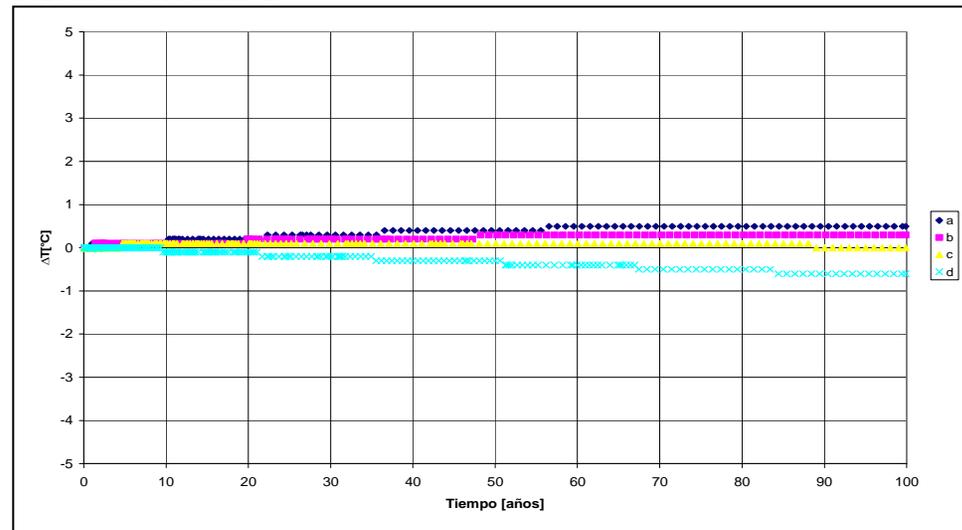
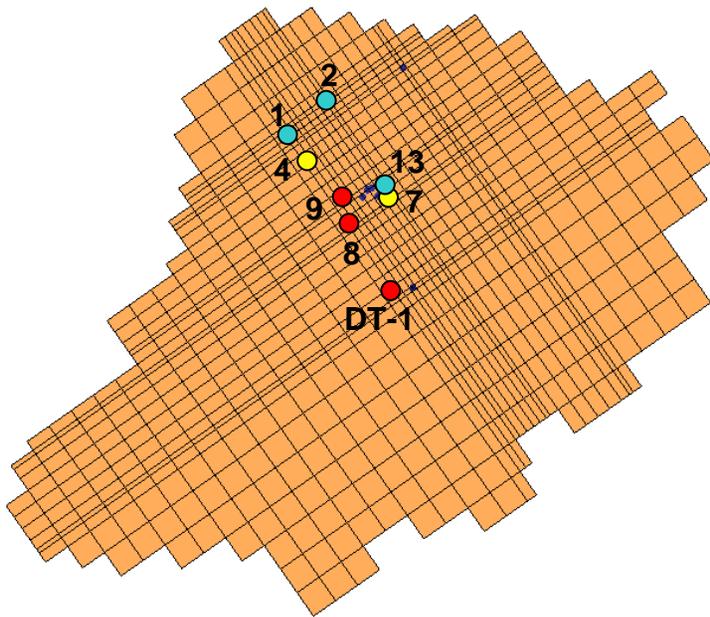


Figura 8.10.- Resultados de variación temporal de ΔP en pozos de observación N° 1 y 2 (Escenario de sustentabilidad de producción)

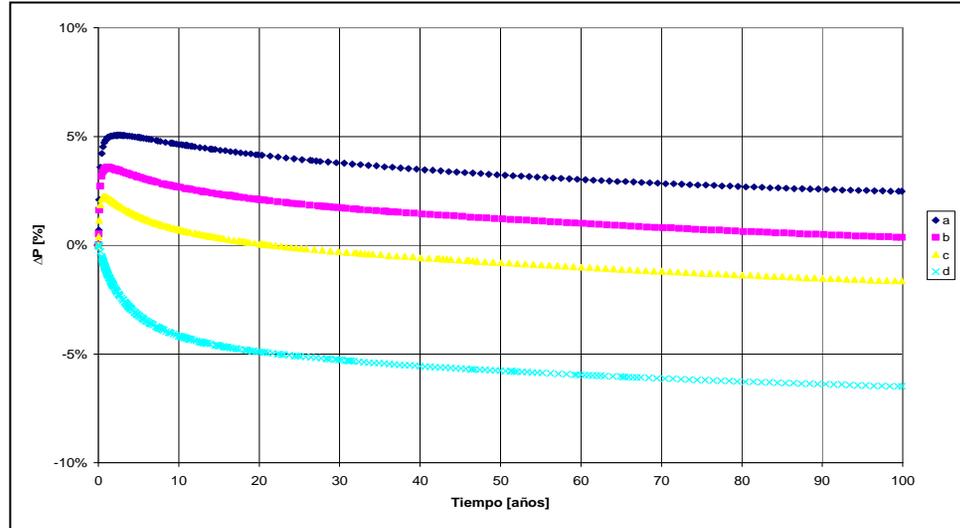
Distribución en planta de pozos en el modelo



Simbología:

- Pozo de bombeo/producción
- Pozos de inyección
- Pozos de observación
- Otros pozos

Pozo de observación N° 1



Pozo de observación N° 2

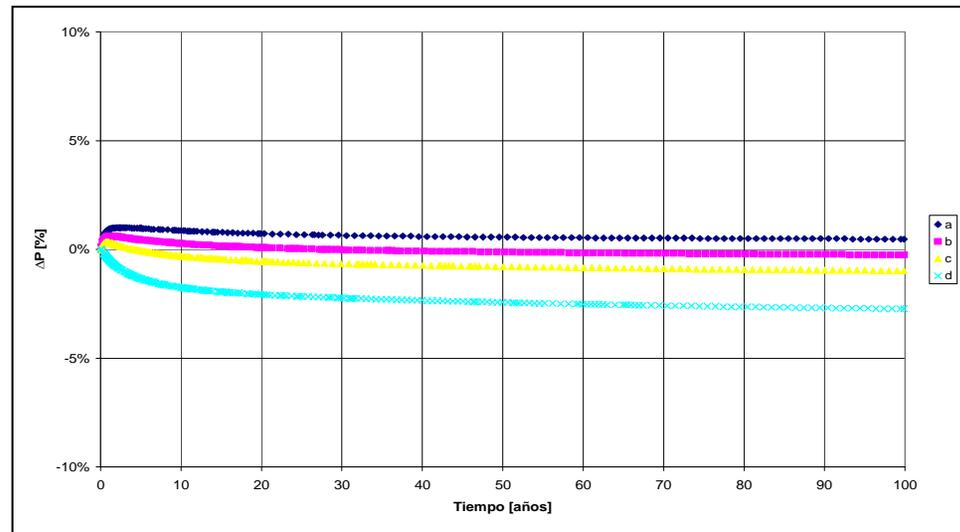


Figura 8.11.- Resultados pozo de producción N° 8

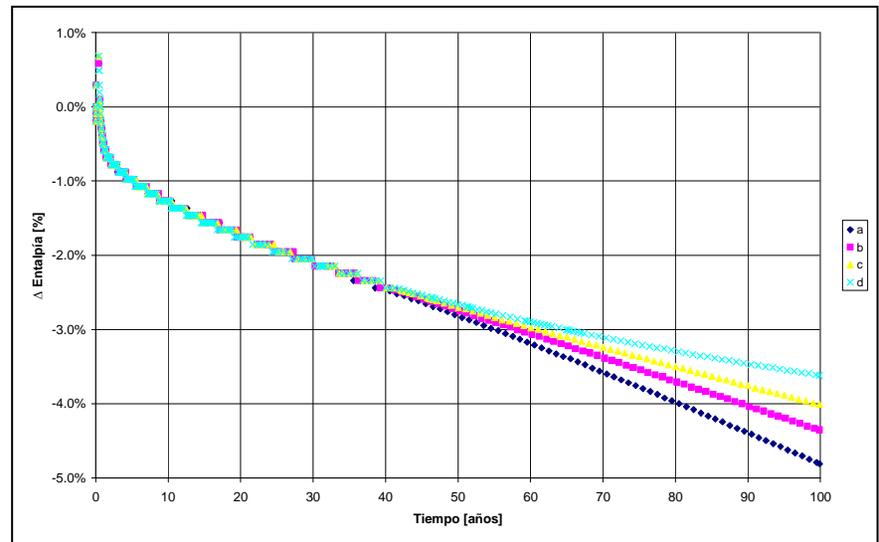
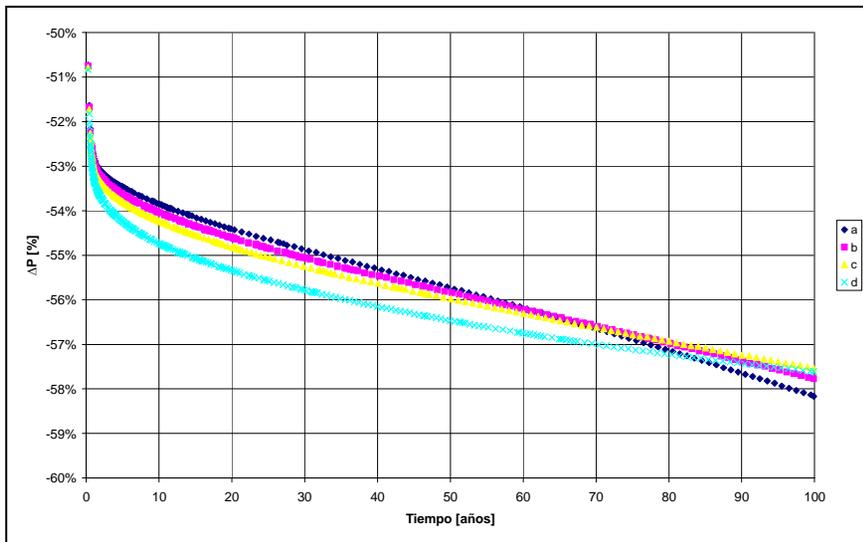
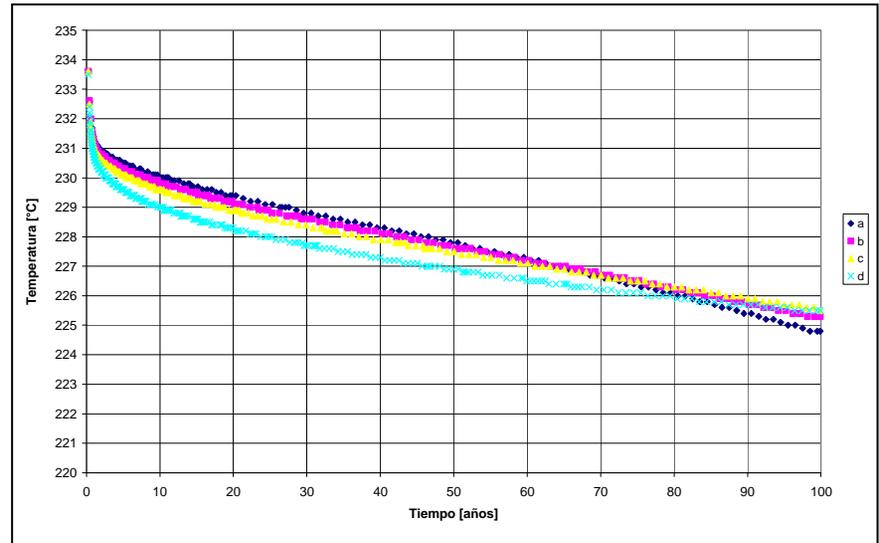
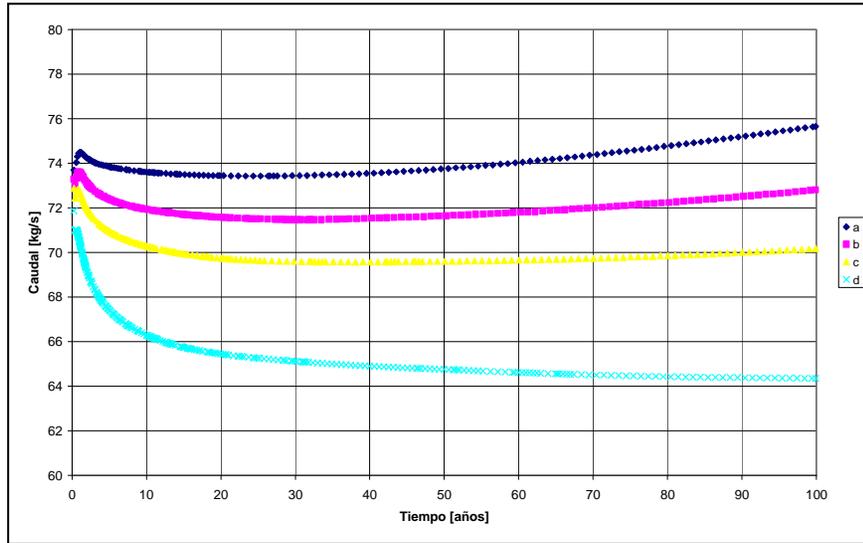


Figura 8.12.- Resultados pozo de producción N° 9

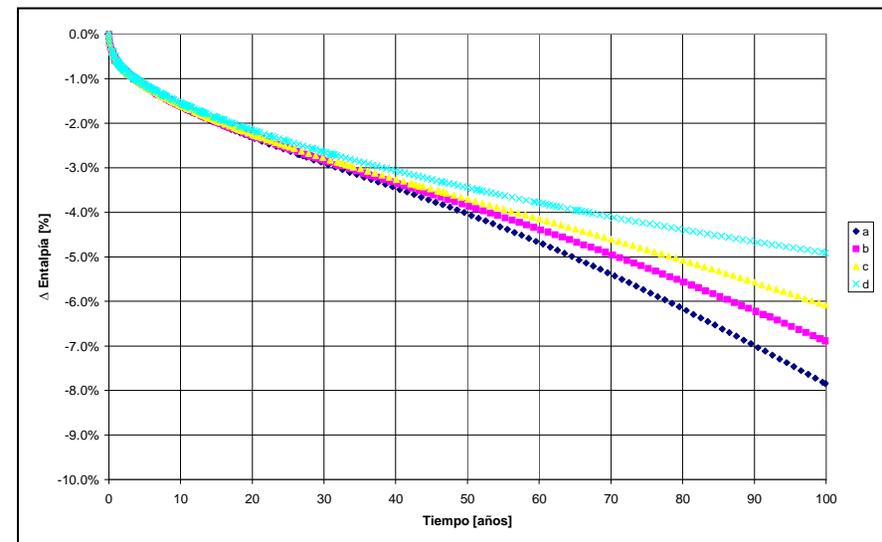
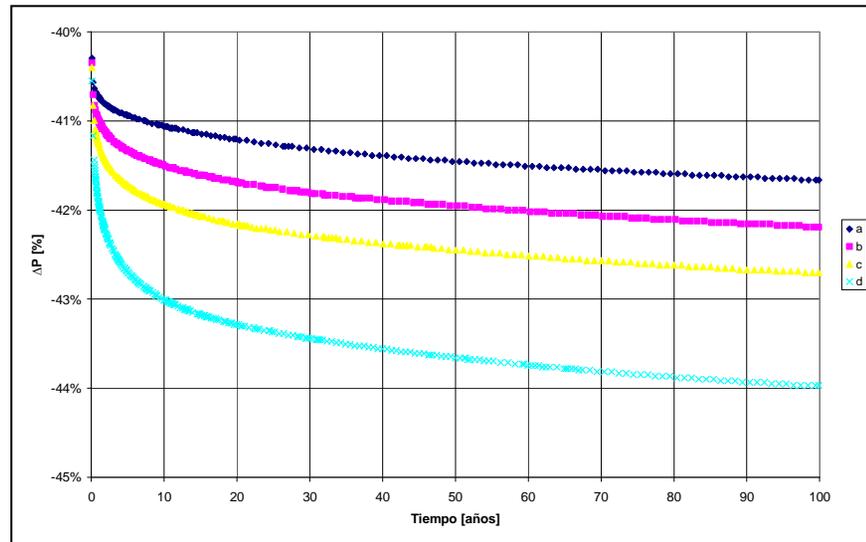
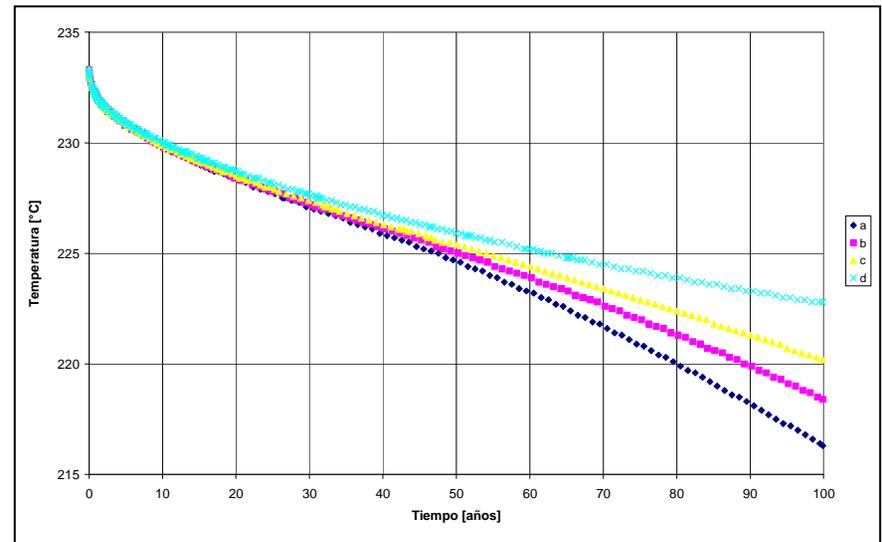
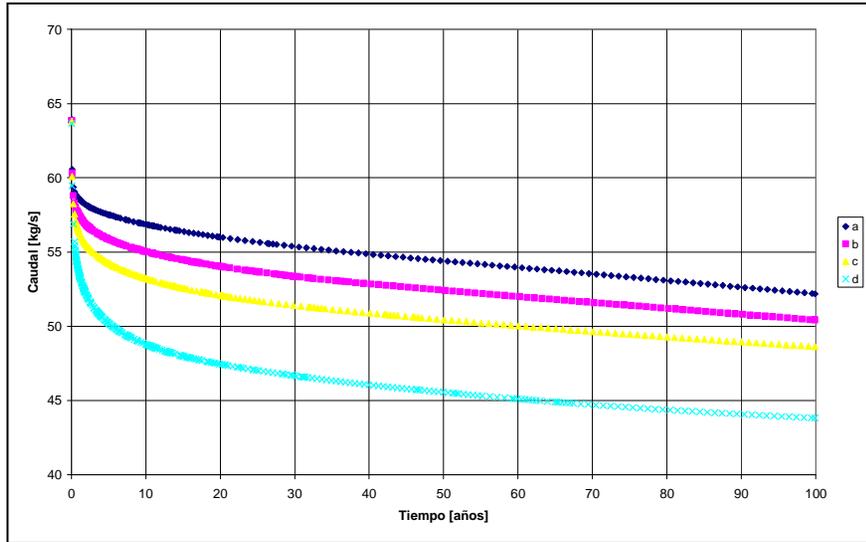
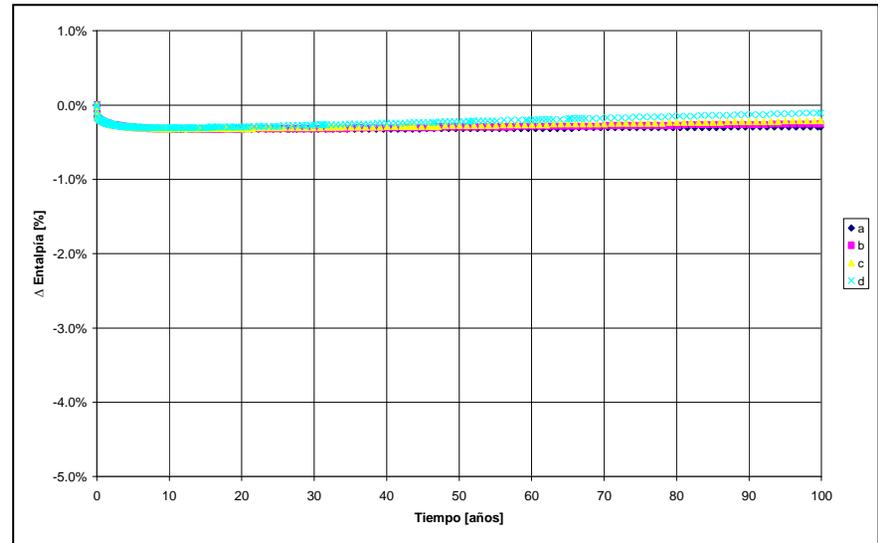
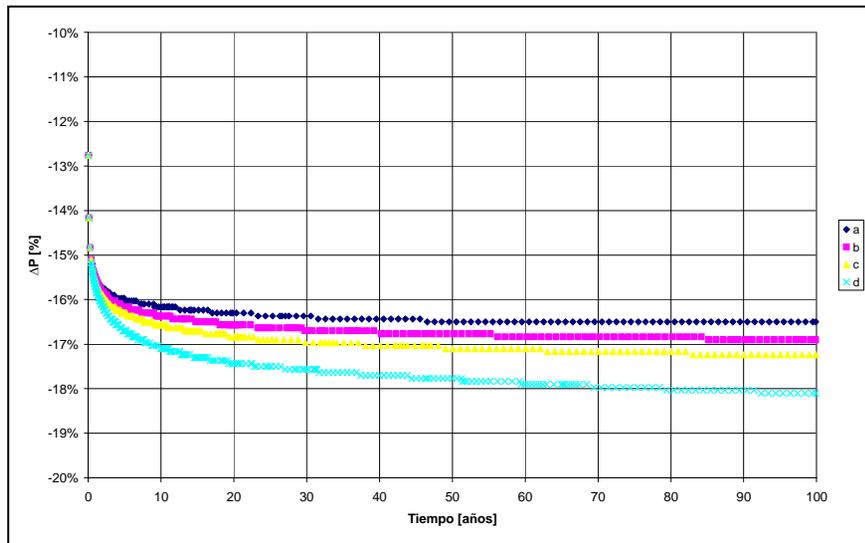
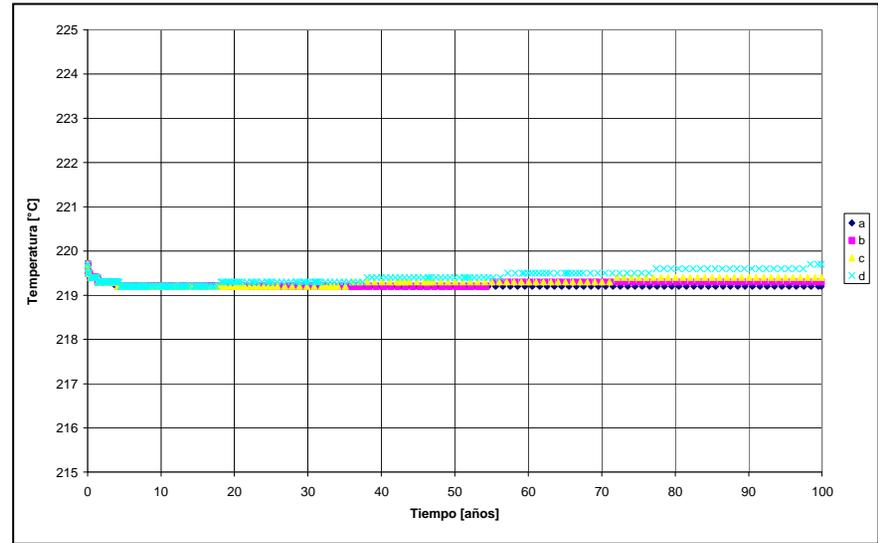
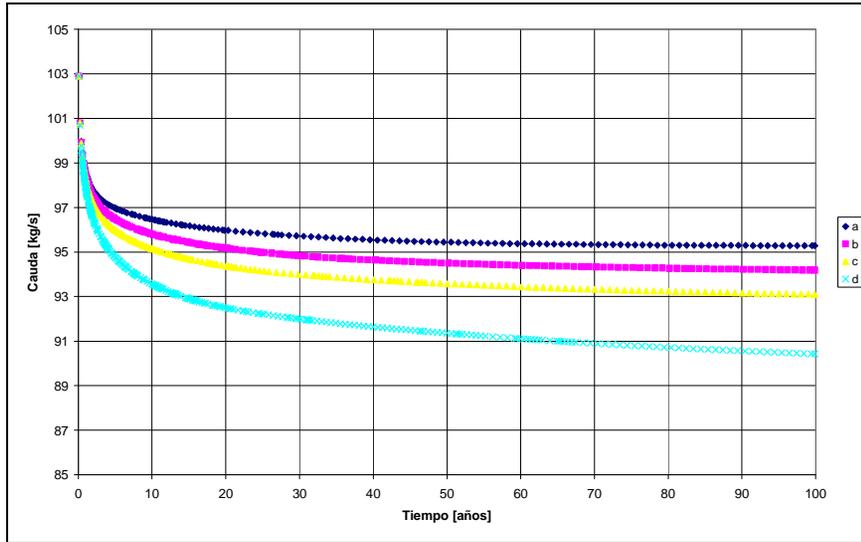


Figura 8.13.- Resultados pozo de producción DT-1



De los resultados obtenidos se desprende lo siguiente:

- Como era de esperarse, los caudales de producción en los pozos disminuyen a medida que disminuye el porcentaje de reinyección al acuífero.
- Las temperaturas en el entorno de los pozos productivos disminuye a medida que aumenta el porcentaje de reinyección, como puede observarse en el pozo de observación 13.
- A medida que aumenta el caudal de reinyección en el pozo 7, la presión en el entorno del pozo productivo 8 va aumentando (de acuerdo con las variaciones de presión observadas en el pozo 13), lo que permite aumentar el flujo de salida en dicho pozo productivo. A medida que aumenta el flujo de salida en el pozo 8, disminuye el flujo de salida del pozo 9, ubicado aguas abajo del pozo 8. Esto, debido a la disminución en la presión del reservorio producto de la producción desde el pozo 8.
- La variación de la entalpía en función del tiempo disminuye en los pozos productivos 8 y 9, observándose una disminución más rápida para el caso en que se tiene un mayor porcentaje de reinyección.
- En líneas generales, el análisis realizado indica que para la configuración de pozos de producción e inyección utilizados, los escenarios intermedios asociados a porcentajes de reinyección del 50 y 70%, permiten lograr un mejor equilibrio de las condiciones de presión y temperatura necesarias para mantener una producción sustentable en el tiempo. Si bien el escenario asociado a un 90% de reinyección asegura las condiciones de presión necesarias para la producción, la disminución en las temperatura del reservorio (producto de la reinyección del fluido a una temperatura considerablemente menor que la del reservorio) disminuye la entalpía en el flujo de salida de los pozos productivos lo que se relaciona directamente con la producción de energía. Por otra parte, el escenario sin reinyección disminuye considerablemente las presiones en el acuífero y por consiguiente los flujos de salida de los pozos productivos, lo que no constituye una situación sustentable ni para la producción ni para el sistema geotermal.
- Los resultados obtenidos en los pozos de observación 1 y 2 son similares a los obtenidos para el escenario N° 3 de sustentabilidad ambiental, lo que indica que los supuestos utilizados en el escenario de sustentabilidad ambiental (caudales de producción constantes) permiten analizar adecuadamente las respuestas del sistema ante escenarios hipotéticos de explotación.

9. DISCUSION DE RESULTADOS Y LIMITACIONES DEL MODELO

Con respecto a los resultados obtenidos y a las limitaciones del modelo se tienen los siguientes comentarios:

- El modelo simula adecuadamente el comportamiento del sistema a una escala regional o de cuenca, lo que se ve representado por una buena representación de los perfiles de temperatura observados en la dirección principal del flujo. Teniendo en consideración que el medio fue tratado como un medio poroso equivalente y que se definieron pocas zonas homogéneas para la representación de unidades geológicas, los resultados de la calibración en régimen permanente resultan aceptables para los propósitos del estudio.
- Con respecto a los resultados obtenidos en la calibración del régimen transiente, se puede concluir que este representa bien los resultados obtenidos en los pozos de monitoreo próximos a los pozos de inyección y erogación utilizados en las pruebas realizadas el año 2009. Sin embargo, el modelo no reproduce bien los resultados observados aguas abajo de la zona de realización de las pruebas, ya que subestima la respuesta real observada en los pozos. Una posible solución a esto, sería realizar una nueva calibración considerando una zonificación de las unidades que permita una sectorización más detallada de los parámetros de compresibilidad.
- Con respecto a la descarga del sistema, el hecho de utilizar pozos de salida distribuidos por zonas representativas de manifestaciones superficiales y cuya descarga es dependiente de la permeabilidad y presión del reservorio, permite representar adecuadamente los caudales de salida del sistema a una escala de cuenca. Se debe señalar que a una escala local, el modelo no es capaz de representar la descarga específica de cada manifestación ni los ciclos eruptivos propios de los geysers, lo que no obstante, no es parte de los objetivos del trabajo de investigación.
- En relación a lo señalado en el punto anterior, si bien el caudal de salida total del sistema es bien reproducido por el modelo, su distribución puede ser mejorada, de forma de reproducir mejor los caudales de salida de cada zona de descarga.
- Con respecto a la recarga local del sistema, se debe señalar que su estimación es compleja tanto en distribución espacial como en magnitud, lo que contribuye a la incertidumbre general del balance hídrico del sistema. Además, de acuerdo con el análisis de sensibilidad realizado, los resultados del modelo son muy sensibles a las variaciones de este parámetro.
- En relación a las permeabilidades calibradas, estas se ubican en rangos típicos para los tipos de rocas que conforman los acuíferos del sistema, de acuerdo con las referencias bibliográficas consultadas. No obstante lo anterior, es recomendable validar estas permeabilidades con mediciones de terreno y/o con análisis detallado de las pruebas efectuadas en pozos existentes. Esto permitirá además mejorar la calibración del modelo, teniendo en cuenta que esta no es única y que fue realizada con relativamente pocos datos.

- Con respecto a la condición de borde de Dirichlet (presión constante) que condiciona la entrada lateral de flujo del sistema, se debe señalar que los valores impuestos corresponden a una estimación gruesa tanto en magnitud como en distribución espacial.
- Las presiones simuladas del sistema reproducen bien las presiones observadas en las cercanías de las principales manifestaciones del sistema (Pozo 2), sin embargo, sobreestiman las presiones observadas en el resto de los pozos (8, 9 y 12). Esto podría deberse a la condición de borde de Dirichlet estimada, a los parámetros utilizados en los pozos que condicionan la descarga del sistema y/o a la falta de celdas de descarga en profundidades mayores a las consideradas.
- La interacción entre el acuífero superior comprendido en las Dacitas de Tucle y el acuífero principal conformado por la Ignimbrita Puripicar e Ignimbrita Salado puede ser mejorada. Esto, con el objetivo de representar mejor las temperaturas observadas en el pozo 6, el cual puede ser considerado como representativo de la distribución de temperaturas en el acuífero superior. En relación a esto, debe considerarse que los parámetros que controlan la mezcla de aguas meteóricas frías con aguas más calientes corresponden a la magnitud y extensión espacial de la recarga y las permeabilidades y conductividades térmicas de las Dacitas de Tucle y Tobas de Tucle.
- Tanto el basamento del sistema geotermal como algunos contactos entre unidades fueron representados mediante superficies horizontales. Esto obedece, en el caso de los contactos entre unidades, a una simplificación de la grilla numérica. En el caso del basamento, no se dispone de datos concretos que permitan precisar su distribución espacial.
- Con respecto a los escenarios de simulación generados, la respuesta ante la explotación del sistema fue abordada mediante dos escenarios: sustentabilidad ambiental y sustentabilidad en la producción. Para el escenario de sustentabilidad ambiental, se utilizaron pozos de bombeo en lugar de utilizar pozos cuya producción es dependiente tanto de las condiciones de presión en el reservorio como de la permeabilidad. Esto responde a los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación, en donde se buscó analizar la respuesta del sistema geotermal ante escenarios hipotéticos de explotación más que a representar en detalle el comportamiento de los pozos de producción y su capacidad de generación de energía. No obstante lo anterior, aunque se incluyó el análisis de sustentabilidad en la producción mediante pozos productivos, es recomendable utilizar la herramienta “coupled wellbore flow” incluida en TOUGH2 que permite calcular las variaciones de presión en la boca del pozo en función de las condiciones variables del reservorio durante la simulación.
- Considerando que el modelo generado está basado en medios porosos equivalentes y teniendo en cuenta que la productividad de un pozo en un sistema geotermal está dada fundamentalmente por la permeabilidad asociada a fracturas locales, el modelo no puede ser utilizado para predecir sectores de mayor productividad o de mayor capacidad de generación de energía.

10. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se propuso analizar la dinámica de flujo y el transporte de calor del sistema geotermal El Tatio mediante la construcción y calibración de un modelo numérico. En base a los resultados obtenidos se desprenden las siguientes conclusiones:

- Se realizó una completa recopilación y revisión de antecedentes a partir de la cual se elaboró un modelo conceptual coherente del sistema geotérmico El Tatio, identificando las unidades hidrogeológicas relevantes, las fuentes de calor y las entradas y salidas del sistema.
- A partir del análisis de registros hidrometeorológicos existentes en la zona de estudio, se realizó un balance hídrico del modelo en una situación de largo plazo, estimándose los caudales de entrada y salida del sistema.
- A partir del modelo conceptual se construyó una grilla numérica en tres dimensiones, utilizando los softwares GMS y TOUGH 2, en conjunto con la utilización de Microsoft Excel para el procesamiento previo y posterior de los resultados.
- Se calibró el modelo numérico en régimen permanente mediante la zonificación del reservorio en distintas unidades y el posterior ajuste de permeabilidades y conductividades térmicas, concluyéndose que el modelo calibrado reproduce en forma razonable los datos de temperatura y presión observados en los pozos existentes del sistema geotermal El Tatio.
- Se calibró el modelo numérico en régimen transiente, para lo cual se utilizaron los datos de presión registrados en pruebas de producción e inyección efectuadas en el sistema el año 2009. Al respecto se concluye que el modelo calibrado reproduce bastante bien las variaciones de presión observadas en el sector donde se ejecutaron las pruebas, sin embargo subestima la respuesta del sistema hacia aguas abajo de dicho sector.
- Se realizó un análisis de sensibilidad de los principales parámetros del modelo concluyéndose que los resultados son bastante sensibles a los valores de recarga utilizados y a la variación en la permeabilidad horizontal del acuífero principal. En relación a este último parámetro, se concluye que la permeabilidad horizontal condiciona tanto el caudal de salida del sistema como el transporte del calor por convección, lo que genera cambios apreciables en los perfiles de temperatura. Por otra parte, los resultados del modelo son muy poco sensibles al flujo de calor basal y a las conductividades térmicas analizadas, lo que indicaría que el sistema está dominado por un régimen convectivo.
- El modelo calibrado permitió estudiar las respuestas del sistema ante potenciales escenarios de explotación, aunque la validez de estos resultados queda sujeta a las posibles mejoras en la calibración del régimen transiente.
- Los resultados de la modelación hidrogeológica de la cuenca muestran que existe bastante coherencia con el modelo conceptual del sistema, lo que se ve reflejado en las permeabilidades resultantes para cada unidad hidrogeológica y en la reproducción del gradiente de temperatura en la dirección del flujo principal. Considerando lo anterior, se

puede concluir que el que el enfoque basado en medios porosos equivalentes permite representar adecuadamente el comportamiento de un sistema cuya dinámica de las aguas subterráneas está dominada fundamentalmente por permeabilidades secundarias.

Con respecto a los trabajos futuros se recomienda lo siguiente:

- Analizar el efecto que tiene en los resultados la discretización y refinamiento de la grilla de modelación utilizada.
- Representar en forma más detallada los contactos de las unidades geológicas y analizar el funcionamiento del modelo desde el punto de vista numérico y su convergencia.
- Incorporar en el modelo los antecedentes de las campañas de exploración geofísica realizadas en el sistema, lo que podría ayudar a definir con mayor sustento la condición de borde que permite la entrada del flujo lateral.
- Analizar otras metodologías para especificar las condiciones de borde del sistema.
- Abordar la interacción de TOUGH2 con otras plataformas de procesamiento previo y de visualización de resultados.
- Considerando que la permeabilidad en un medio geotermal es dependiente de la precipitación y disolución de minerales, se considera interesante analizar el sistema incorporando la modelación numérica de transporte reactivo, para lo cual se recomienda utilizar el software TOUGH-REACT. Debe tenerse en cuenta que esto agregaría mayor complejidad y mayor cantidad de parámetros al modelo, entre los que se cuentan: concentración de componentes de la recarga meteórica y profunda, definición de zonas de mineralización, definición de zonas de interacción entre porosidad y permeabilidad y sus respectivas relaciones de cálculo, etc.
- En caso de que se requiera simular con mayor detalle la producción en pozos se recomienda utilizar la herramienta “coupled wellbore flow” incluida en TOUGH2, que permite calcular las variaciones de presión en la boca del pozo en función de las condiciones variables del reservorio durante la simulación. Lo anterior puede ser utilizado en conjunto con el uso de la información derivada de las pruebas realizadas en los pozos existentes del sistema geotermal, lo que permitiría calibrar los índices de productividad de pozos según las tasas de producción registradas.

11. BIBLIOGRAFIA

Alister, M., Bixley, P. 2011. Geothermal Reservoir Engineering, Second Edition.

Anderson, M. 2005. Heat as a ground water tracer, Mary Anderson, Department of Geology and Geophysics, University of Wisconsin-Madison.

Clearwater, E.K., O'Sullivan, Brockbanj K., Mannington W.I. 2012. M.J., Modeling the Ohaaki Geothermal System; Department of Engineering Science, The University of New Zealand, 2012.

CORFO, Comité para el aprovechamiento de la energía geotérmica. Survey for Geothermal Development in Northern Chile: Drilling and initial discharge report Well N° 2, El Tatio.

CORFO, Comité para el aprovechamiento de la energía geotérmica. Informe de mediciones de completación del pozo 8 El Tatio.

CORFO, Comité para el aprovechamiento de la energía geotérmica. A geothermal study of wells 7, 8, 9 and 10. Recommendations for wells 11, 12 and 13.

Cortecci, G., Boschetti T., Mussi M., Herrera C., Mucchino C., Barbieri M. 2005. New Chemical and original isotopic data on waters from el Tatio Geothermal Field, Northern Chile.

Cumming W., Vieytes H., Ramirez C., Sussman D. 2002. Exploration of The La Torta Geothermal Prospect, Northern Chile.

Cusicanqui, H. 1975. The Geochemistry of the El Tatio Geothermal Field, Northern Chile.- Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago Chile.

DHI-WASY, 2010. Software Feflow 6.2, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, User Manual.

Domenico, P., Schwartz F. Physical and Chemical Hydrogeology, Second Edition, 1997.

Electroconsult, 1975. Exploitation of El Tatio Geothermal Field, Northern Chile- Feasibility Report., Milano, Italia.,

Figueroa, C. 2013. Evaluación del Potencial de generación de energía eléctrica del Campo Geotermal de El Tatio, Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología.

Finsterle, S. Initial - Boundary Conditions. Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL

Fitz, C. 2012. Groundwater Science, Second Edition.

Giggenbach W. 1978. The isotopics composition of waters from the El Tatio Geothermal Field, Northern Chile. Chemistry Division, Department of Scientific and Industrial Research, Petone, New Zealand.

- Glennon A., Ptaff M., 2003. The extraordinary thermal activity of El Tatio Geyser Field, Antofagasta Region, Chile.
- Healy, J., Hochstein M.P., 1973. Horizontal Flow in Hydrothermal Systems. Journal of Hydrology (New Zealand).
- Healy, J. 1973. Survey for Geothermal Development in Northern Chile: Review of drilling program, El Tatio, December 1973, James Healy.
- Healy, J. 1971. Survey for Geothermal Development in Northern Chile: Geological Report on wells 1-5, El Tatio, by James Healy, Feb. 1971.
- Kipp, K., Hsieh, P., Charlton, S. 2008. Guide to the revised ground-water flow and Heat Transport Simulator: Hydrotherm Version 3, U.S. Geological Survey.
- Kiryukhin, A., Miroshnik, O. 2012. 20 Year progress in the TOUGH2 modeling of the Mutnovsky Geothermal Field, Institute of Volcanology And Seismology.
- Lahsen A. 1976. Actas Primer Congreso Geológico 2-7 de Agosto de 1976. La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile, Alfredo Lahsen A.
- Lahsen A., Marinovic N. 1984. Carta geológica de Chile Escala 1:250.000, Hoja Calama, Región de Antofagasta.
- Lahsen, A., Muñoz, N., Parada, M. 2010. Geothermal Development in Chile. Proceedings World Geothermal, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Lahsen, A., Trujillo, P. 1975. El Tatio Geothermal Field. Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco. 157-178.
- McCorkindale, K. 1973. Survey for Geothermal Development in Northern Chile: The drilling of well N° 7, El Tatio.
- Moulding, A., Brikowski, T. 2012. Three- Dimensional Modeling of Basin and Range Geothermal Systems using TOUGH2-EOS1C. Proceedings, TOUGH Symposium 2012. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, September 17-19, 2012.
- Muñoz, C., Bravo R., 1976. Control de los pozos N° 1, 7, 10, 11 (1er semestre de 1973),
- Muñoz, M., Hamza, V. 1991. Heat Flow and temperature gradients in Chile. Presented at the International Meeting on Terrestrial Heat Flow and the Structure of Litosphere, Bechyne Castle, Czech Republic, September 2-7, 1991.
- Ortega, P. 2013. Medición de Descarga en Geysers e implicancias para su modelamiento: Campo Geotermal El Tatio, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología.

O'Sullivan M., Pruess K. Lippmann M. 2010. Geothermal Reservoir Simulation: The State of Practice and emerging trends.

Person, M., Ge, S., Garven G. 1996. Ralfensperger , J., Basin Scale Hydrogeological Modeling.

PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2010. Informe Final Revisión de la ejecución del Proyecto Perforación Geotérmica Profunda EL Tatio Fase 1

Pritchett, J., 1995. STAR: A geothermal reservoir simulation system. Proc. World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, May 18-31, International Geothermal Association.

Pruess, K., Narasimhan, T. 1985. A practical method for modeling fluid and heat flow in fractured porous media. Soc. Petrol. Engr. Journal, Vol 25.

Pruess K, Oldenburg C., Moridis G., 1999. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, 1999.

Saar, M. 2011. Review: Geothermal heat as a tracer of large-scale groundwater flow and as a means to determine permeability fields, Martin O. Saar, Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota.

Scarf, F. 1970. Survey for Geothermal Development in Northern Chile: Report on Steam measurements, El Tatio Well N°1.

SGA, 2007. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Geotérmico El Tatio Fase 1.

Jalininasrabady, S., Itoi, R., Gotoh, H., Tanaka, T. 2012. Numerical Reservoir Model of the Takagami Geothermal Field, Oita, Japan. Proceedings, TOUGH Symposium 2012. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, September 17-19, 2012.

Universidad de Chile, 2013. Apuntes del curso GL5004: Geotermia, Departamento de Geología Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

USGS, 2002. User Guide to Seawat: A computer program for simulation of three-dimensional Variable-Density Ground-Water Flow, Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey. Book 6, Chapter A7.

USGS, 2010. SUTRA: A model for saturated-Unsaturated Variable-Density Ground-Water Flow with Solute or Energy Transport. Sutra Version 2.2.

Vinsome, P, Shook, G. 1993. Multi-purpose simulation. Jnl. Petrol. Sci and Engr.

Youngman K.J. 1984. Hydrothermal Alteration and fluid-rock interaction in the El Tatio Geothermal Field, Antofagasta Province, Chile.

ANEXOS

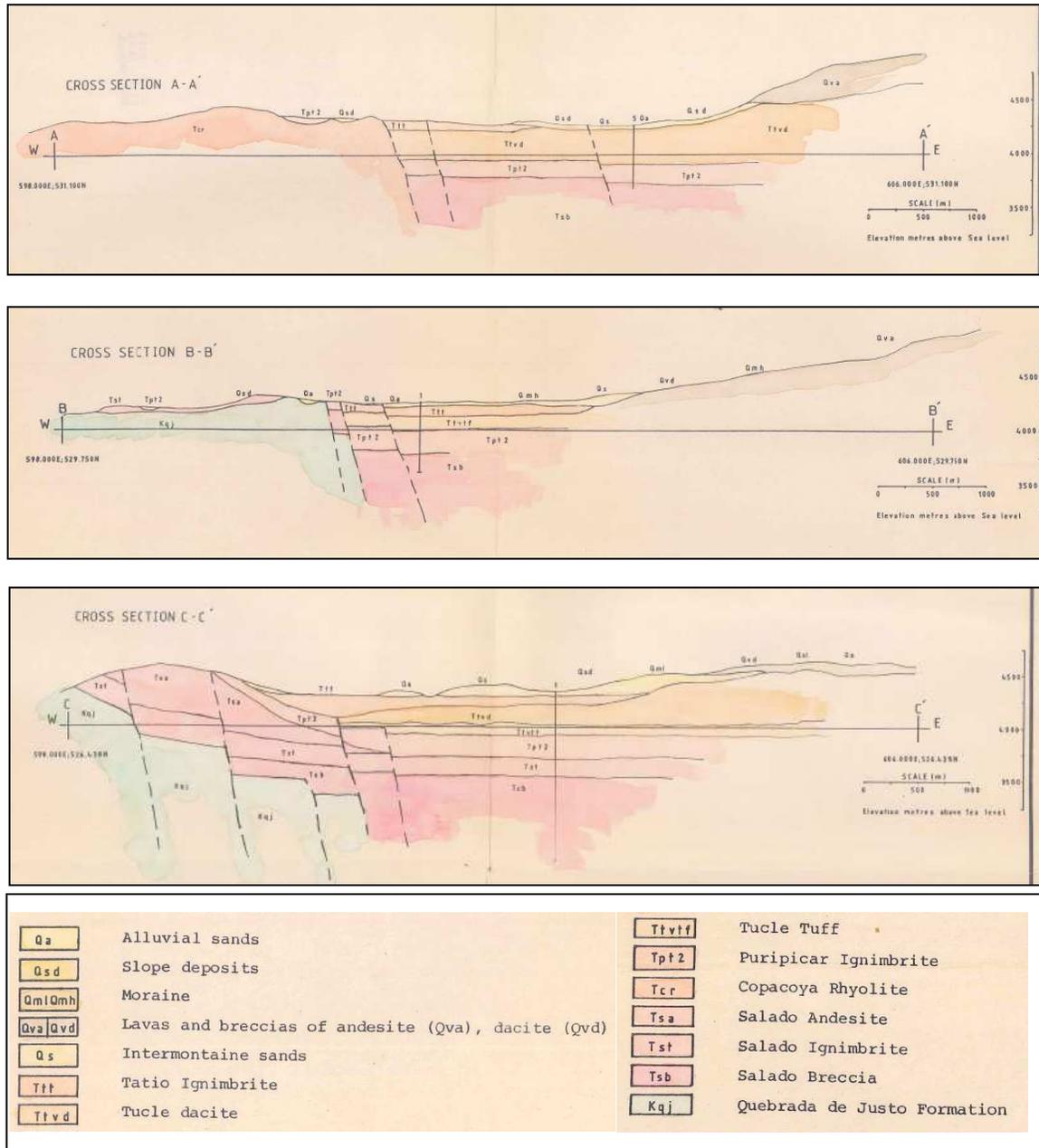
ANEXO A

PERFILES GEOLOGICOS

ANEXO A: PERFILES GEOLÓGICOS

Se presentan a continuación los perfiles geológicos utilizados para la construcción del modelo numérico del sistema. Los perfiles fueron obtenidos del estudio *Hydrothermal Alteration and fluid-rock interaction in the El Tatio Geothermal Field, Antofagasta Province, Chile*. K.J. Youngman, August, 1984.

Figura A.1- Perfiles geológicos utilizados para la construcción del modelo (*)



(*): Extraídos de Youngman, 1984.

ANEXO B

ANALISIS DE PRECIPITACIONES Y REGISTROS DE CAUDALES

ANEXO B: ANALISIS DE PRECIPITACIONES Y REGISTROS DE CAUDALES

B.1 ANALISIS DE PRECIPITACIONES

La tabla siguiente muestra los registros de precipitaciones utilizados para estimar las precipitaciones en la cuenca hidrográfica de interés.

Tabla B.1- Precipitaciones anuales registradas en estaciones pluviométricas de la zona

AÑO	Pp Anual Est Linzor [mm]	Pp Anual Est Tatio [mm]	Pp Anual Est Salado em [mm]	Pp Anual Est Ayquina [mm]	Pp Anual Est Cupo [mm]	Pp Anual Est Toconce [mm]	Pp Anual Est Chiu-Chiu [mm]
1979-1980	77.6	56.5	17.3	4.1	2	25.1	1.5
1980-1981	195.7	113.3	59.2	25.5	36.2	109.8	1.5
1981-1982	28.4	23	10.2	4	4.2	9.5	0
1982-1983	146.0	107.2	18.3	9	28.4	50.5	1
1983-1984	371.6	417.4	182	85	187.3	240.2	15
1984-1985	273.8	252.8	93.9	43	138	169.8	11
1985-1986	135.4	147.5	105.2	55.2	73.8	102	11.5
1986-1987	283.0	341	122.3	95.5	189.0	174.3	22.5
1987-1988	108.8	89.5	28	15	35.5	48.5	4
1988-1989	172.5	129	102.3	43	77	122.8	1
1989-1990	70.9	86.2	21	3.5	7.5	23.8	1.7
1990-1991	151.2	175.6	28	10.5	5.5	38.2	2.6
1991-1992	58.7	40.2	9.5	3	10	22.7	0
1992-1993	85.5	102.7	85	47	76.2	62.5	6.5
1993-1994	112.2	129.3	46.5	58	29.5	52.7	6
1994-1995	176.3	188.9	56	22	28	96	0
1995-1996	31.2	27	10.4	0	1.4	12.5	0
1996-1997	236.7	187.5	80.3	50	162.8	106.4	5.3
1997-1998	110.9	74.1	54.2	18.5	34.5	69.8	6
1998-1999	259.0	249.4	67.8	16.2	123	113.5	9
1999-2000	243.2	238.2	117.8	54.6	134.6	181.5	8
2000-2001	389.2	427.5	324.5	147.1	297.7	166.5	22
2001-2002	100.2	69.1	77.2	64	47	78.3	3.5
2002-2003	8.8	15.1	11.5	0	6.6	11.5	4
2003-2004	116.1	104.7	23.6	12	31	71.8	10
2004-2005	131.3	111.5	82.5	28.5	141.7	119	1.9
2005-2006	251.7	256.9	56.7	14	92.1	43.5	3.6
2006-2007	65.7	48.1	10.7	0	14.3	36	0.6
2007-2008	26.6	131.3	5.4	8.5	31.4	35	2.5
2008-2009	53.9	34.8	7.4	10.5	33.9	12	8.9
2009-2010	33.2	11.6	5.8	0.5	4.4	4.5	1.5
2010-2011	149.6	153.6	68.2	29	128.6	117	2
2011-2012	348.1	403.1	267.5	143	292	361.8	6.3
2012-2013	116.1	82.1	42.6	25.3	7	31.8	1
2013-2014	86.3	78.5	32.4	39	80.8	55	3
PROMEDIO	148.7	145.8	66.6	33.8	74.1	85.0	5.3

(*) En rojo se presentan los valores que fueron rellenados a partir de correlaciones con otras estaciones.

B.2 REGISTROS DE CAUDALES

A continuación se presentan los registros de caudales recopilados en la cuenca del río Salado.

Tabla B.2- Registros de caudales en Río Salado antes de Represa Chilex [l/s]

Año Hidrológico	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
1968-1969											500	460
1969-1970	407	398		438	426	302	448	565	512	560		459
1970-1971												
1971-1972						447	483		629	890		
1972-1973	432			392	381	544	464	426	479	403	460	601
1973-1974	400	524	448		588	496	533	428		420		143
1974-1975			504			476	501	521	576	586		
1975-1976	529		455			560			1052	650		
PROMEDIO	442	461	469	415	465	471	486	485	650	585	480	416

Tabla B.3- Registros de caudales en Río Salado antes de junta con río Tatio [l/s]

Año Hidrológico	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
1973-1974							136					174
1974-1975	188		173									

Tabla B.4- Registros de caudales en Río Tatio antes de junta con río Salado [l/s]

Año Hidrológico	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
1973-1974							109			207		136
1974-1975	139		160									

ANEXO C

REGISTROS HIDROGEOQUIMICOS

ANEXO C: REGISTROS HIDROGEOQUIMICOS

Se presentan a continuación los registros de los parámetros de temperatura obtenidos en visita a terreno en tanto en manifestaciones superficiales como en quebradas y escurrimientos superficiales.

C.1 REGISTROS DE TEMPERATURA

Tabla C.1- Registros de temperatura

PUNTO	UTM ESTE [m] (*)	UTM NORTE [m] (*)	T [°C]
Parshall	601630	7528960	65
v-1	601645	7528924	83.5
v-2	601734	7528813	80
v-3	601766	7528818	78
v-4	601737	7528751	75
v-5	601699	7528920	80
v-6	601735	7528972	36
v-7	601747	7528994	22
Cruce qda	601230	7529517	33
s-1	603061	7525901	8.9
s-2	603782	7526131	15.6
s-3	603155	7528220	31.2
s-4	603042	7528192	72.7
s-5	601462	7528645	22.6
s-7	601387	7528767	18.43
s-8	601186	7529117	17.4
s-9	601230	7529516	35
s-10	601103	7529307	31.9
s-11	601066	7529242	30.4
s-12	600999	7529116	28.6
Geyser	601641	7528924	85.4
Geyser	601727	7528814	84.6
Aguas abajo geyser anterior	601753	7528776	60.8
Manifestación termal	601090	7528914	77.3
Manifestación	601708	7528926	76.6
d-1	601747	7528994	24
d-2	601462	7528648	16
d-3	601386	7528769	15
d-4	601303	7528848	14.3
d-5	601171	7528946	14.3
d-6	601185	7529119	16.9
d-7	601015	7529128	28
d-8	600937	7529058	27
d-9	600833	7529055	24.3
d-10	600761	7529034	34

(*): Coordenadas en Sistema UTM Huso 19 Datum WGS 84

Tabla C.1- Registros de temperatura (Continuación)

PUNTO	UTM ESTE [m] (*)	UTM NORTE [m] (*)	T [°C]
d-11	600683	7529042	28.3
d-12	600683	7529042	79
d-13	600634	7527331	80
d-14	600538	7527309	17
d-15	600563	7527362	26
d-16	600611	7527476	49
d-17	600521	7527590	47
d-18	600422	7527785	46.2
d-19	601481	7525862	11.5
d-20	601922	7530299	74
d-21	601983	7530360	73
d-22	602338	7530504	80
d-23	602093	7530371	37
d-24	601784	7530228	80
d-25	601688	7530151	79
d-26	601626	7530069	70
d-27	601439	7527818	9
d-28	601317	7527835	5.5

(*): Coordenadas en Sistema UTM Huso 19 Datum WGS 84

C.2 REGISTROS DE pH

Tabla C.2- Registros de pH

Punto	UTM ESTE [m] (*)	UTM NORTE [m] (*)	pH
Aguas abajo Parshall	601630	7528960	6.77
Geysers	601641	7528924	5.95
Geysers	601727	7528814	6.59
Geysers	601761	7528822	6.5
Geysers	601745	7528761	6.74
Aguas abajo geysers anterior	601753	7528776	6.91
Manifestación termal	601090	7528914	6.19
Manifestación	601708	7528926	6.72
Terma	601734	7528972	6.62
d-1	601747	7528994	6.87
d-2	601462	7528648	6.99
d-3	601386	7528769	7.32
d-4	601303	7528848	7.16
d-5	601171	7528946	7.05
d-6	601185	7529119	7.14
d-7	601015	7529128	7.55
d-8	600937	7529058	7.62
d-9	600833	7529055	7.58
d-10	600761	7529034	7.53
d-11	600683	7529042	7.44
d-12	600683	7529042	5.79
d-13	600634	7527331	5.85
d-14	600538	7527309	7.55
d-15	600563	7527362	6.84
d-16	600611	7527476	6.58
d-17	600521	7527590	6.92
d-18	600422	7527785	7.25
d-19	601481	7525862	8.95
d-20	601922	7530299	6.58
d-21	601983	7530360	6.78
d-22	602338	7530504	6.21
d-23	602093	7530371	3.81
d-24	601784	7530228	5.26
d-25	601688	7530151	5.99
d-26	601626	7530069	6.18
d-27	601439	7527818	7.08
d-28	601317	7527835	7.28
d-29	601222	7527736	8.55
d-30	601171	7527728	7.8

(*): Coordenadas en Sistema UTM Huso 19 Datum WGS 84

C.3 REGISTROS DE CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

Tabla C.3- Registros de Conductividad Eléctrica (CE)

Punto	UTM ESTE [m] (*)	UTM NORTE [m] (*)	CE [mS/cm]
Parshall	601630	7528960	18.6
v-1	601645	7528924	15.8
v-2	601734	7528813	17
v-3	601766	7528818	12
v-4	601737	7528751	18.3
v-5	601699	7528920	19.6
v-6	601735	7528972	15
v-7	601747	7528994	16.9
Cruce qda	601230	7529517	7.4
s-1	603061	7525901	0.473
s-2	603782	7526131	0.506
s-3	603155	7528220	0.503
s-4	603042	7528192	0.6
s-5	601462	7528645	19.11
s-7	601387	7528767	19.56
s-8	601186	7529117	19.91
s-9	601230	7529516	8.75
s-10	601103	7529307	9.36
s-11	601066	7529242	9.41
s-12	600999	7529116	9.47
d-1	601747	7528994	13.9
d-2	601462	7528648	17
d-3	601386	7528769	15.4
d-4	601303	7528848	17.4
d-5	601171	7528946	15.6
d-6	601185	7529119	18.5
d-7	601015	7529128	10.5
d-8	600937	7529058	10.1
d-9	600833	7529055	12.6
d-10	600761	7529034	12.4
d-11	600683	7529042	12.3
d-12	600683	7529042	16.20
d-13	600634	7527331	5.50
d-14	600538	7527309	1.2
d-15	600563	7527362	1.6
d-16	600611	7527476	4.1
d-17	600521	7527590	4
d-18	600422	7527785	4.2
d-19	601481	7525862	0.4
d-20	601922	7530299	24.6
d-21	601983	7530360	24
d-22	602338	7530504	22.6
d-23	602093	7530371	11.7
d-24	601784	7530228	6.5
d-25	601688	7530151	0.90
d-26	601626	7530069	23.7
d-27	601439	7527818	2.70
d-28	601317	7527835	3.10
d-30	601171	7527728	2

(*): Coordenadas en Sistema UTM Huso 19 Datum WGS 84

ANEXO D

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO Y PARÁMETROS DE MODELACIÓN

ANEXO D: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO Y PARÁMETROS DE MODELACIÓN

D.1 Propiedades de la grilla

Para construir la grilla del modelo numérico se utilizó una grilla tridimensional con ejes cartesianos (X, Y, Z) basada en el uso de elementos y conexiones. Para el modelo utilizado se generó una grilla compuestas por 21000 elementos correspondientes a 40x35x15 (X, Y, Z). De estos elementos, 15030 corresponden a elementos activos. Por otra parte, se utilizaron 42917 conexiones, las cuales definen los parámetros necesarios para definir la relación entre los elementos.

A continuación se resumen las propiedades principales de los elementos y conexiones:

Propiedades de los elementos:

- ✓ Identificación del elemento
- ✓ Material
- ✓ Volumen
- ✓ Posición respecto a un origen definido de la grilla (X, Y, Z).

Propiedades de las conexiones:

- ✓ Identificación de la conexión
- ✓ Área de interfaz entre los elementos asociados a la conexión
- ✓ Distancias entre los centros de los elementos hacia el área de interfaz común entre los elementos.
- ✓ Valor de referencia para la asignación de permeabilidades (1, 2 o 3 dependiendo de si corresponde a la permeabilidad definida en el eje X, Y o Z).
- ✓ Coseno del ángulo entre el vector de aceleración de gravedad y la línea de conexión entre los elementos (Para la conexión de elementos verticales, este valor es 1).

Para definir los valores de las propiedades de cada elemento y conexión se utilizaron planillas de cálculo que permitieron definir los archivos de entrada para la modelación en TOUGH2.

D.2 Parámetros de modelación

Los principales parámetros de modelación corresponden a los siguientes:

- **Ecuaciones a resolver:** Para las modelaciones se utilizó el módulo EOS1 (EOS: Equation of States), el cual permite modelar el comportamiento del agua en estado líquido y gaseoso. Para este módulo, todas las propiedades del agua que son dependientes de la temperatura tales como la densidad, entalpía específica, y presión de saturación de vapor son calculadas por TOUGH2 internamente a partir de tablas aceptadas internacionalmente.
- **Máximo número de iteraciones por paso de tiempo:** Se utilizó un máximo de 8 iteraciones newtonianas para el cálculo por cada paso de tiempo.

- **Pasos de tiempo:** Para disminuir los tiempos de simulación se optó por utilizar pasos de tiempos variables. Esto se realizó seleccionando un método de cálculo en TOUGH2 que permite aumentar al doble el time step en la medida que se alcance la convergencia en el número predefinido de iteraciones de cálculo de cada paso (iteraciones newtonianas especificadas en el párrafo anterior).
- **Número máximo de pasos de tiempo:** De acuerdo a las pruebas realizadas previas al procesos de calibración se optó por utilizar un número máximo de 5000 pasos de tiempo (time steps).
- **Otros:** El resto de los parámetros de la modelación corresponden a las condiciones iniciales, permeabilidades por zonas predefinidas, términos fuente (source/sinks) y los elementos y conexiones que definen la geometría de la grilla del modelo numérico.

La figura siguiente muestra un ejemplo de un archivo de entrada utilizado para la modelación en TOUGH2.

Figura D.1- Ejemplo de Input de Modelación en TOUGH2

```

ROCKS----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8
CAPA1      1.0E50      0.30      1.0E-16      1.0E-16      1.0E-16      0.5      1.
CAPA2      2650.      0.30      1.0E-14      1.0E-14      0.1E-14      0.5      1.
CAPA3      2650.      0.30      2.0E-15      2.0E-15      1.0E-16      0.2      1.
CAPA4      2650.      0.30      1.8E-14      1.8E-14      0.6E-14      1.0      1.
CAPA5      2650.      0.30      6.5E-15      6.5E-15      6.5E-15      2.0      1.
CAPA6      2650.      0.30      0.9E-14      0.9E-14      0.6E-14      2.0      1.
CAPA7      2650.      0.30      2.0E-13      2.0E-13      0.3E-13      1.0      1.
CAPA8      2650.      0.30      2.0E-13      2.0E-13      0.3E-13      1.0      1.
CAPA9      2650.      0.30      2.0E-13      2.0E-13      0.3E-13      1.0      1.
CAP10     2650.      0.30      3.0E-15      3.0E-15      0.5E-15      0.2      1.

START----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8
*-----1 MOP: 123456789*123456789*1234-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8
PARAM----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8
25000      500010000000000000203      2
          1.57788E15      -1.      A1110      9.81
          1.E2      9.E2      9.E3      9.E4      9.E5      2.E6      5.E6
          1.E-5
          1.5E6      10.

RPCAP----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8
3      .30      .05
1      0.      0.      1.

GENER----1-----*-----2-----*-----3-----*-----4-----*-----5-----*-----6-----*-----7-----*-----8.
A8516OES01      DELV      5.0E-11      3.7E+06
A8616OES02      DELV      5.0E-11      3.7E+06
A9516OES03      DELV      5.0E-11      4.6E+06
A9616OES04      DELV      5.0E-11      4.6E+06
AA516OES05      DELV      5.0E-11      5.6E+06
AA616OES06      DELV      5.0E-11      5.6E+06
A2C19SUR01      DELV      0      6.0E+05
A3C19SUR02      DELV      0      8.2E+05
A4C19SUR03      DELV      0      1.1E+06
A5C19SUR04      DELV      1.0E-10      1.3E+06
A6C19SUR05      DELV      1.0E-10      2.0E+06
A8523NOR01      DELV      5.0E-11      3.8E+06
A8524NOR02      DELV      5.0E-11      3.8E+06
A8525NOR03      DELV      5.0E-11      3.8E+06
A8526NOR04      DELV      5.0E-11      3.8E+06
A8527NOR05      DELV      5.0E-11      3.8E+06
.....

```

D.3 Ecuaciones

- **Ecuación general que resuelve TOUGH2**

La ecuación general de balance y energía se describe mediante la siguiente expresión (Pruess, 1999):

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^\kappa dV_n = \int_{\Gamma_n} F^\kappa \cdot n d\Gamma_n + \int_{V_n} q^\kappa dV_n$$

Donde:

V_n : Volumen de un subdominio cualquiera [m³]

Γ_n : Superficie cerrada [m²]

n : Vector normal al elemento de superficie $d\Gamma_n$

M^κ : Masa específica del componente κ [kg/m³]

F^κ : Flujo de masa [kg/(m²s)]

q^κ : Término fuente (sink/source) [kg/(m³s)]

Términos de Masa:

El término de masa específica se expresa como:

$$M^\kappa = \phi \cdot \sum_{\beta} S_{\beta} \cdot \rho_{\beta} \cdot X_{\beta}^{\kappa}$$

Dónde:

β : Fase del fluido

ϕ : Porosidad

S_{β} : Fracción del volumen de poros ocupado por la fase β

ρ_{β} : Densidad de la fase β

X_{β}^{κ} : Fracción de la masa del componente κ presente en la fase β

El flujo de masa advectivo se expresa mediante la siguiente ecuación y corresponde a una suma sobre cada fase:

$$F^\kappa \Big|_{adv} = \sum_{\beta} X_{\beta}^{\kappa} \cdot F_{\beta}$$

Dónde el flujo advectivo para cada fase está dado por una expresión de la ley de Darcy que incluye multifases:

$$F_{\beta} = \rho_{\beta} \cdot u_{\beta} = -k \cdot \frac{k_{r\beta}}{\mu_{\beta}} \cdot \rho_{\beta} \cdot (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \cdot g)$$

Dónde:

u_{β} : Velocidad de darcy

k : Permeabilidad absoluta del medio [m²]

$k_{r\beta}$: Permeabilidad relativa a la fase β

μ_{β} : Viscosidad relativa a la fase β

P_{β} : Presión del fluido en la fase β

Términos de energía:

El término de energía específica se expresa como:

$$M^{NK+1} = (1 - \phi) \cdot \rho_R \cdot C_R \cdot T + \phi \cdot \sum_{\beta} S_{\beta} \cdot \rho_{\beta} \cdot u_{\beta}$$

Dónde:

ρ_R : Densidad del medio

C_R : Calor específico del medio

T : Temperatura

u_{β} : Energía interna específica en la fase β

El flujo de calor incluye los componentes conductivos y convectivos mediante la siguiente expresión:

$$F^{NK+1} = -\lambda \cdot \nabla T + \sum_{\beta} h_{\beta} \cdot F_{\beta}$$

Dónde:

λ : Conductividad termal

h_{β} : Entalpía específica en la fase β

- **Condiciones iniciales**

Como condición inicial se impuso presión atmosférica en la capa superior del modelo correspondiente a 0.6atm (0.6×10^5 Pa), y se corrió el modelo con flujo isotermal, adoptándose una temperatura para todas las celdas de 10°C . De esta manera se obtuvo una distribución inicial de presiones para el modelo. Esta condición puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones, correspondientes a una condición de borde tipo Dirichlet:

$$P(x, y, z = 1, t) = P_0 \quad \forall x, y, t$$

$$T(x, y, z = 1, t) = T_0 \quad \forall x, y, t$$

- **Condiciones de borde**

Se presentan a continuación las ecuaciones que rigen las principales condiciones de borde impuestas en el modelo.

Temperatura fija en la capa superior: Para la corrida del modelo en situación no isotermal, se utilizó como condición de borde superior sólo la temperatura fija. Esto se expresa mediante la siguiente ecuación, correspondiente a una condición de borde tipo Dirichlet:

$$T(x, y, z = 1, t) = T_0 \quad \forall x, y, t$$

Dónde:

T_0 : Temperatura impuesta en la capa superior del modelo (10°C).

Flujo de calor basal: Corresponde al flujo de calor (J/s) impuesto en la capa basal del modelo. Esta se expresa mediante una condición de borde de tipo Neumann según la siguiente expresión:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T(x, y, z = 15, t)}{\partial z} = q_B \quad \forall x, y, t$$

$$\frac{\partial T(x, y, z = 15, t)}{\partial z} = \frac{q_B}{\lambda_{x,y,15}} \quad \forall x, y, t$$

Dónde:

q_B = Flujo de calor basal por m^2 [mW/m^2] (Se utiliza un valor de $60 \text{ mW}/\text{m}^2$).

$\lambda_{x,y,15}$ = Conductividad termal en la capa inferior del modelo [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]

Presión y temperatura lateral: Esta condición de borde permite representar el flujo de masa y calor lateral de entrada al modelo. Se representa mediante condiciones de borde de tipo Dirichlet a través de las siguientes expresiones:

$$P(x, y, z, t) = P_{L.xyz} \quad \forall t$$

$$\forall x = 19 \dots 25;$$

$$\forall y = 33 \dots 34;$$

$$\forall z = 8 \dots 12;$$

$$T(x, y, z, t) = T_{L.xyz} \quad \forall t$$

$$\forall x = 19 \dots 25;$$

$$\forall y = 33 \dots 34;$$

$$\forall z = 8 \dots 12;$$

Dónde:

$P_{L.xyz}$: Presión de borde lateral fija dependiendo de la posición (x, y,z)

$T_{L.xyz}$: Temperatura de borde lateral fija dependiendo de la posición (x, y,z)

La tabla siguiente resume las presiones utilizadas en los distintos elementos utilizados para definir la condición de borde lateral:

Tabla D.1- Presiones y temperatura asignadas en los elementos definidos como condición de borde lateral

z	x	y	ELE TOUGH2	P [Pa]	T [°C]
8	19	34	A8Y19	6.82E+06	280
9	19	34	A9Y19	7.73E+06	280
10	19	34	AAY19	8.63E+06	280
11	19	34	ABY19	9.54E+06	280
12	19	34	ACY19	1.05E+07	280
8	20	33	A8X20	6.82E+06	280
9	20	33	A9X20	7.73E+06	280
10	20	33	AAX20	8.63E+06	280
11	20	33	ABX20	9.54E+06	280
12	20	33	ACX20	1.05E+07	280
8	21	33	A8X21	6.82E+06	280
9	21	33	A9X21	7.73E+06	280
10	21	33	AAX21	8.63E+06	280
11	21	33	ABX21	9.54E+06	280
12	21	33	ACX21	1.05E+07	280
8	22	33	A8X22	6.82E+06	280
9	22	33	A9X22	7.73E+06	280
10	22	33	AAX22	8.63E+06	280
11	22	33	ABX22	9.54E+06	280
12	22	33	ACX22	1.05E+07	280
8	23	33	A8X23	6.82E+06	280
9	23	33	A9X23	7.73E+06	280
10	23	33	AAX23	8.63E+06	280
11	23	33	ABX23	9.54E+06	280
12	23	33	ACX23	1.05E+07	280
8	24	33	A8X24	6.82E+06	280
9	24	33	A9X24	7.73E+06	280
10	24	33	AAX24	8.63E+06	280
11	24	33	ABX24	9.54E+06	280
12	24	33	ACX24	1.05E+07	280
8	25	33	A8X25	6.82E+06	280
9	25	33	A9X25	7.73E+06	280
10	25	33	AAX25	8.63E+06	280
11	25	33	ABX25	9.54E+06	280
12	25	33	ACX25	1.05E+07	280