

# MODELADO ESTRUCTURAL DEL SECTOR ALEDAÑO A LA VILLA TERMAS DE COPAHUE

---

Neuquén-Argentina

Raisha Zurakoski Luparelli



Universidad Nacional del Comahue – Facultad de Ingeniería



*Neuquén, 2017.*



Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas.  
Facultad de ingeniería - Universidad Nacional del Comahue.

*TRABAJO FINAL DE LICENCIATURA*

# MODELADO ESTRUCTURAL DEL SECTOR ALEDAÑO A LA VILLA TERMAS DE COPAHUE

---

Neuquén-Argentina



**Alumna:** Zurakoski Luparelli, Raisha

**Director:** Caselli, Alberto T.

**Carrera:** Licenciatura en Ciencias Geológicas

*Neuquén, 2017.*



Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas.  
Facultad de ingeniería - Universidad Nacional del Comahue.



## **RESUMEN**

El área que involucra la zona de estudio se encuentra afectada por la actividad del volcán Copahue, situado al SO, la tectónica regional y el sistema hidrotermal allí emplazado, situación que permite notar la existencia de una marcada relación entre estructuras locales y una serie de manifestaciones hidrotermales de interés económico allí desarrolladas. El propósito de este trabajo nace de la idea de que dicha relación existe y su dinámica depende de varios factores, dentro de los cuales se encuentra la intensa actividad sísmica asociada naturalmente a la región. A partir de la hipótesis de que es posible modelar los cambios de *stress* en las estructuras generados por la sismicidad que ellas mismas y otras estructuras más lejanas generan, se procedió a cartografiar el área de estudio, lo cual fue utilizado luego para la creación de un modelo conceptual y su aplicación con el programa Coulomb 3.3, en el cual se definieron 3 sistemas de fallas principales que presentan intrínseca relación con las manifestaciones hidrotermales. Con el modelo se realizaron los cálculos de variación de *stress*, además de deslizamientos y dilatación, también generados por la sismicidad en la zona. Particularmente, los cálculos fueron realizados con sismos de magnitud 4 y 5.7, según 4 distintos escenarios propuestos. Finalmente fue posible definir, para cada escenario, posibles comportamientos esperados por parte de las manifestaciones hidrotermales a partir de los cambios de *stress* generados en las rocas ante la presencia de un sismo, siendo esto muy útil a la hora de predecir variaciones en un sistema que es altamente dinámico y cambiante en períodos muy cortos de tiempo geológico, afectando principalmente a la población ubicada en la zona que depende en parte del turismo que el recurso geotérmico y sus manifestaciones superficiales posibilitan para su subsistencia.

Palabras claves: volcán Copahue, tectónica regional, estructuras, sistema hidrotermal, sismicidad, variación de *stress*, recurso geotérmico.



## **ABSTRACT**

The area located to the northeast of the Copahue volcano is highly affected by this volcano dynamic, the regional tectonics and the hydrothermal system developed there. This situation allows guessing a deep relation between the local structures and a certain number of economically interesting hydrothermal manifestations located within the study area. From the hypothesis that it is possible modeling stress changings in structures generated by the structures themselves and other structures nearby, a structural map was made and used to create a conceptual model in which three principal failure systems that show an intimate relation with the hydrothermal manifestations were defined. Once reproduced in Coulomb 3.3, the model was used to calculate stress variations, displacements and dilatation, also generated by the seismicity in the area. Specially, the calculations were made for earthquakes of 4 and 5.7Mw, according 4 different proposed scenarios. Finally, it was possible to determine, for each scenario, possible expected behaviors of each hydrothermal manifestation from the stress variations in the hosting rocks caused by a certain earthquake.

**Key words:** Copahue volcano, regional tectonics, structures, hydrothermal system, seismicity, stress variation, geothermic resource.



## **RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIAS**

Primero agradezco la oportunidad de haber podido estudiar y a todas las personas que pusieron su empeño y participaron en la apertura de esta carrera en esta universidad y en esta ciudad.

A Alberto Caselli por la dirección de este trabajo, por abrir las puertas a Caviahue y a su mundo de volcanes. También a Víctor García por acompañarme al campo.

A todas las personas que me encontré en el camino durante la universidad, estoy segura que de todas ellas aprendí algo. Gracias.

A Luis Mas y Cecilia Dufilho por ser jurados, por tomarse el tiempo de leer, corregir y aconsejarme no solo en esta instancia, sino a lo largo de la carrera.

Luego quiero agradecer a los profesores, por tomarse el tiempo de compartir un poco de su conocimiento y experiencias con nosotros estudiantes. En particular quiero agradecer a profesores como Cecilia Dufilho, Luis Peralta, Sheyla Iglesias, Santiago Benotti, que con su vocación logran transmitir no solo conocimientos, sino pasión por la profesión y da gusto haber podido cursar con ustedes.

También quiero agradecer a mis geo-compas o geo-familia como diría mi colega Alonso. Gracias por los mates, el estudio y los viajes de campo.

Particularmente quiero agradecer a Antonela, estuviste conmigo desde el principio y demás está decirte que sos en parte responsable de que yo este acá hoy, gracias de corazón.

A Noelia, gracias por tu generosidad en mil aspectos, tu amistad, las noches eternas de estudio y las agonías pre-finales, todo.

A Florencia, tu compañía es oro y nuestra amistad es maravillosa.

Por último, gracias a mi familia, mi mamá y mis hermanas. Esto es un logro familiar, no cabe duda. Ustedes le dan sentido a todo.

**GRACIAS**



## Contenido

1	Introducción.....	9
1.1	Objetivos e hipótesis de trabajo .....	9
2	Metodología.....	10
2.1	Cartografía estructural .....	10
2.2	Modelación .....	11
3	Marco geológico de la zona de estudio .....	15
3.1	Marco tectónico regional .....	15
3.2	Estructura del Complejo Volcánico Copahue.....	19
3.3	Estratigrafía del Complejo Volcánico Copahue .....	22
3.4	Sistema hidrotermal asociado y su relación con las estructuras .....	24
3.5	Actividad sísmica.....	27
4	Mapa estructural y estratigráfico del área de estudio. ....	28
4.1	Datos e información obtenida .....	29
4.2	Cartografía estructural .....	31
5	Modelación .....	33
5.1	Modelo conceptual.....	33
5.2	Implementación del programa Coulomb .....	34
5.3	Escenarios modelados .....	35
6	Resultados y discusión .....	40
6.1	Estado de tensiones parciales del área (Variación parcial de <i>stress</i> de Coulomb).....	40
6.2	Estimación de la variación de la permeabilidad con la dilatación .....	54
6.3	Caracterización de los desplazamientos asociados a los sistemas de fallas.....	57
6.4	Posible dinámica de las manifestaciones hidrotermales en relación al funcionamiento estimado de los sistemas de falla.....	64
6.4.1	Las Máquinas.....	64
6.4.2	Las Maquinitas .....	65
6.4.3	Termas de Copahue .....	65
6.4.4	Anfiteatro.....	66
7	Conclusiones y recomendaciones .....	67
8	Bibliografía.....	70
	Anexo A1: Resultados pertenecientes al cálculo de <i>stress</i> en el Escenario 1 con emisor en el Sistema N° 1.....	74



Anexo A2: Resultados pertenecientes al cálculo de <i>stress</i> en el Escenario 2 con emisor en el Sistema N° 2.....	76
Anexo A3: Resultados pertenecientes al cálculo de <i>stress</i> en el Escenario 3 con emisor en el Sistema N° 3.....	78
Anexo A4: Resultados pertenecientes al cálculo de <i>stress</i> en el Escenario 4 con emisor en el Sistema N° 4.....	79



## 1 Introducción

### 1.1 Objetivos e hipótesis de trabajo

El volcán Copahue en la provincia del Neuquén se destaca por su actividad volcánica y los recursos energéticos y turísticos que brinda. Geológicamente su área de influencia sísmica es muy importante (según reportes del Observatorio de los Andes del Sur - OVDAS) dando origen a complicaciones en lo que respecta a la explotación de recursos económicos, turísticos y la vida en la zona. A esto debemos sumarle el estructuramiento regional que se encuentra, como es natural, afectado por una intensa actividad sísmica.

El presente trabajo de tesis tiene como objeto de estudio analizar el efecto que tienen las estructuras geológicas pertenecientes a la región aledaña al volcán Copahue entre los paralelos  $S37^{\circ}47'40,9''$  y  $S37^{\circ}50'13''$  y los meridianos  $O71^{\circ}08'54''$  y  $O71^{\circ}04'21''$ , en la dinámica del sistema hidrotermal de la región. Dicha área abarca aproximadamente  $27 \text{ km}^2$ .

Este objetivo general nace a partir de la observación de que luego del terremoto del Maule (magnitud 8.8 Mw), Chile, en el 2010, se generaron una serie de terremotos locales que pudieron afectar al sistema de fallas que controlan al sistema hidrotermal involucrado en el área de estudio. Este pudo dar lugar a cambios en su dinamismo años más tarde a través de la ubicación de sus manifestaciones superficiales y sus características, además de la creciente actividad del propio Volcán Copahue. El fin de este trabajo entonces, se basa en la hipótesis de que es posible realizar un modelo de cambio de *stress* de Coulomb de las estructuras del área de estudio, pudiendo encontrar una relación directa con la dinámica de las estructuras que controlan el sistema hidrotermal asociado. El cumplimiento de estos objetivos está relacionado con la calidad de la información disponible y alcance del software a utilizar

En este proyecto de tesis el área de estudio incluye parte de los epicentros sísmicos, la deformación asociada a la actividad del Volcán Copahue y manifestaciones geotermales de interés económico, lo que ha llevado a numerosos autores como Pesce (1989), JICA (1992), Mas *et al.* (2000), Melnick *et al.* (2006) y Rojas Vera *et al.* (2009), a estudiar el flujo de calor, geoquímica y geología estructural del lugar. Dichos autores realizaron mapeos de las estructuras regionales que condicionan el comportamiento del sistema volcánico y geotermal, información que será tomada en cuenta en este trabajo a la hora



de realizar interpretaciones acerca de las estructuras locales sobre las que se desea trabajar. El hecho de ser un área de gran actividad sísmica y con numerosos antecedentes, la convierte en un área idónea para los estudios que se pretenden realizar.

A partir de este objetivo general, se establecen dos objetivos específicos que se desarrollan en este trabajo:

1. Elaborar un mapa estructural en base a la información tomada en el campo y estudios previos realizados.
2. Modelar las estructuras con Coulomb 3.3 (utilizando información sísmica) para entender la física de la dinámica de las fallas, el cambio de *stress* y cómo este afecta a la dinámica del sistema hidrotermal (particularmente las manifestaciones hidrotermales “Anfiteatro”, “Copahue”, “Las Maquinitas” y “Las Maquinas”).

## **2 Metodología**

### **2.1 Cartografía estructural**

Luego de investigar la información ya existente acerca de estudios realizados en el área se llevó a cabo el trabajo de campo estipulado en el marco del presente trabajo, que tuvo como objetivo realizar un mapeo geológico-estructural detallado del área y reconocer las estructuras existentes, mencionadas en la bibliografía. La caracterización de dichas estructuras se efectuó midiendo indicadores cinemáticos sobre los planos de falla junto con los rumbos y buzamientos con el fin de identificar los lineamientos observados en imágenes satelitales y áreas, principalmente en las estructuras en las que se registró actividad sísmica reciente, pero esto resultó, con respecto a los indicadores cinemáticos, más difícil de lo esperado debido a la gran alteración hidrotermal propia del área. Esta situación permitió tomar datos de calidad variable pero que, en rasgos generales, pudieron ser bastante bien asociados a las estructuras reconocidas anteriormente y en el campo. Luego de esta etapa se procedió a realizar el mapa estructural en base al cual las modelaciones con el software coulomb 3.3 fueron realizadas.



## 2.2 Modelación

Un modelo matemático es una representación de un sistema a través de fórmulas matemáticas para expresar relaciones entre entidades, a través de variables, parámetros y constantes para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad. A partir de la definición anterior, la modelación de los procesos geológicos permite comprender los fenómenos, y predecir la respuesta del sistema ante la ocurrencia de posibles escenarios. La aplicación de modelos se realiza en etapas, comenzando con la elaboración del modelo conceptual, luego realizando la calibración de los parámetros del modelo (y validación cuando corresponda) y por último, utilizar el modelo para realizar simulaciones de escenarios propuestos.

En este trabajo, la elaboración del modelo conceptual de detalle se realizó tomando como base el modelo regional desarrollado por varios autores como JICA (1992), Melnick *et al.* (2006) y Rojas Vera *et al.* (2009), junto con información obtenida en el presente trabajo, durante el relevamiento de campo.

La modelación se realizó con el software Coulomb de Toda *et al.* (2011), que está diseñado para investigar el *stress* en fallas mapeadas y planos nodales de terremotos. Este modelo realiza los cálculos considerando un semiespacio elástico con propiedades elásticas isotrópicas uniformes según lo propuesto por Okada (1992). De esta manera, es posible calcular desplazamientos estáticos (en una superficie o en estaciones GPS), deformaciones y esfuerzos generados por fallas de tipo transcurrentes, intrusiones magmáticas o expansión/contracción de diques. Estos desplazamientos, deformaciones o esfuerzos pueden ser calculados en cualquier superficie a cualquier profundidad. También resuelve problemas tales como de qué manera un terremoto promueve o inhibe fallamientos o como una falla transcurrente o la expansión de un dique puede comprimir una cámara magmática cercana.

Los procesos que no son modelados en Coulomb son los efectos dinámicos, la difusión de fluido en poros y el rebote viscoelástico. Por otro lado, es importante tener en cuenta que las diferencias de rigidez elásticas entre cuencas y capas de la corteza terrestre modifican las tensiones previstas por el modelo de Okada (1992) e implementado en Coulomb.



El programa requiere parámetros característicos del tipo de roca involucrada en el estudio, la estructura mapeada y los esfuerzos regionales. A partir de estos parámetros, realiza un modelo en 2D o 3D de esfuerzos y deformaciones horizontales y/o verticales del área bajo estudio.

En el marco de este trabajo final, con el uso del software Coulomb 3.3 se efectuó un análisis de variación de *stress* de las estructuras mapeadas y su relación con las manifestaciones hidrotermales nombradas anteriormente realizando modelos físicos que explican la dinámica de las estructuras.

El software Coulomb 3.3 puede ser descargado de numerosas páginas de internet, entre ellas la página de la USGS detallada en la bibliografía del trabajo así como también la guía de usuario correspondiente.

#### *Limitaciones de la aplicación de Coulomb 3.3 a la zona de estudio*

Como fue expuesto anteriormente, el modelado de las estructuras de la zona de estudio y el cálculo del cambio de *stress* de Coulomb a partir de la actividad sísmica en la zona se realizó con el software Coulomb 3.3, esto llevó a la necesidad de ajustar los datos que se obtuvieron en el campo y de trabajos realizados anteriormente en la zona a los parámetros establecidos por el programa para poder modelar y realizar los cálculos que se deseaban. A partir de esta situación, surgieron ciertas limitaciones en cuanto a la fidelidad del modelo obtenido con respecto a las estructuras mapeadas:

- El programa modela la variación del esfuerzo de coulomb en una o varias estructuras a partir de un evento sísmico. Para que esta variación sea lo suficientemente significativa como para que el programa lo capte y modele, es necesario que la magnitud del evento sea también significativa, es decir, de magnitudes relevantes, mayores a 3Mw por lo menos a nivel regional. En el área de estudio, nos encontramos con una gran intensidad de actividad sísmica de muy baja magnitud (1-4Mw, mayormente) y algunos eventos de mayor magnitud (5-7Mw) en menor medida, lo que refleja una importante disminución en los datos útiles para realizar la modelación.
- Relacionado también con la magnitud, el programa modela fallamientos que, luego del terremoto, reflejen un rechazo (slip) significativo, esto también lleva a

disminuir los datos de sismos que son idóneos para realizar los cálculos deseados.

- Al ser un modelo de gran escala, el programa modela optando por homogeneizar la roca a nivel corteza, al punto que no discrimina entre capas de distinto espesor y propiedades físicas puntuales, utiliza un mismo coeficiente de Poisson y módulo de Young para todo el espesor modelado. Esto no es algo que genere una complicación de gran importancia en este trabajo debido a que las estructuras involucradas son efectivamente pertenecientes a lineamientos de escala regional, pero es útil tenerlo en cuenta a la hora de buscar precisión en la modelación.
- Por último, la intensa actividad hidrotermal bajo la cual se encuentra sometida la zona de estudio ha generado una marcada alteración en las rocas expuestas, lo que lleva a una falta de calidad en los datos tomados de las estructuras que presenta, esto dificulta su correcta caracterización y por lo tanto se ve reflejado en una disminución en la precisión del modelo realizado.

### *Fundamentos de Coulomb 3.3*

Para el cálculo de variación de *stress*, desplazamientos o deformación en las fallas, el programa asume una serie de hechos:

- Existen dos tipos de fallas, aquellas denominadas *source faults* (falla emisora), estas fallas presentan un *slip* e imparten el *stress*, y aquellas denominadas *receiver faults* (falla receptora), que no presentan *slip* y reciben *stress*.
- Para el cálculo, se aplica la hipótesis de Coulomb:

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_s + \mu'\Delta\sigma_n$$

Siendo:

$\Delta\sigma_f$ : Variación del *stress* de Coulomb

$\Delta\tau_s$ : Variación del *stress* de cizalla.

$\Delta\sigma_n$ : Variación del *stress* normal al plano de falla (*clamping*  $\uparrow \Delta\sigma_n$ -  
*unclamping*  $\downarrow \Delta\sigma_n$ )

$\mu'$ : Coeficiente de fricción de falla efectivo en la falla receptora.

La probabilidad de fallamiento sucede cuando aumenta  $\Delta\sigma_f$  en la falla receptora debido a un *slip* en la falla emisora.

### *Parámetros*

Para el ámbito de las matemáticas, los parámetros consisten en constantes o variables que al tomar distintos valores representan distintos casos de un problema. Si se traslada ese concepto al modelo en cuestión, cada parámetro es representado por un valor que le otorga características definidas al modelo en base a los elementos geológicos involucrados.

Para realizar los cálculos planificados en las estructuras pertenecientes a la zona de estudio fue necesario crear un mapa en un sistema de proyección definiendo las estructuras por su posición x e y, donde se introdujeron los parámetros requeridos para el trazado de las estructuras. Al momento de modelar, algunos de los parámetros se dejaron fijos y otros parámetros se fueron variando acorde al sistema que se pretendía modelar. Dichos parámetros se encuentran detallados en la tabla 1.

PARAMETROS FIJOS		PARAMETROS VARIABLES
Características de los sistemas de fallas	según cada sistema	Sistema de fallas emisor y receptor
Módulo de Poisson ( $\nu$ )	0.25	Tipo de cálculo ( <i>stress</i> , desplazamiento, deformación)
Coefficiente de fricción ( $\mu$ )	0.4	Slip acorde a la magnitud del sismo
Profundidad de cálculo (acorde al Sistema Hidrotermal)	1km	Magnitud del sismo ( $M_w$ )

**Tabla 1:** Parámetros fijos y variables involucrados en la modelación con Coulomb 3.3.

A continuación se presenta una breve explicación de porqué los parámetros fijos fueron seleccionados como tales y sus valores:

- Características de los sistemas de fallas: estas características incluyen rumbo, buzamiento y rake, propios de cada sistema y tomados de los datos medidos en el campo.
- Módulo o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ): se trata de una constante adimensional que por definición es la razón entre el acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada, dividido en el alargamiento longitudinal producido. Para un material isótropo elástico perfectamente incompresible es igual a 0.5, para rocas de la corteza se considera un coeficiente de 0.25 (Toda *et al.*, 2011).

- Coeficiente de fricción ( $\mu$ ): Este parámetro es adimensional y por definición expresa la oposición al desplazamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto. Va de cero a valores mayores a la unidad. Es propio de los materiales en contacto y para rocas de la corteza se establece un coeficiente de fricción de 0.4 (Toda *et al.*, 2011).
- Profundidad de cálculo: La profundidad de cálculo fue elegida en base al objetivo del trabajo, por ende basado en la profundidad a la que se estima que se ubica el sistema hidrotermal según numerosos autores que han trabajado en el área. Como se observa en la tabla, la profundidad elegida fue 1km.

Por último, al momento de realizar el cálculo de la variación de *stress* de Coulomb en Coulomb 3.3, es importante decidir si es para fallas receptoras específicas, es decir, para fallas con un determinado rumbo, buzamiento y rake detallado por el usuario, o si es para fallas receptoras óptimas normales, inversas o de rumbo. En el primer caso, el usuario inserta los datos de las fallas receptoras particulares en las que le interesa ver la variación de *stress* de coulomb. En el segundo caso, el programa encuentra la orientación de la falla (normal, inversa o de rumbo) que sea óptima para percibir la mayor variación de *stress* (positivo) posible, esto es útil cuando se sabe que hay fallamientos en el área pero estos no fueron identificados o medidos.

### **3 Marco geológico de la zona de estudio**

#### **3.1 Marco tectónico regional**

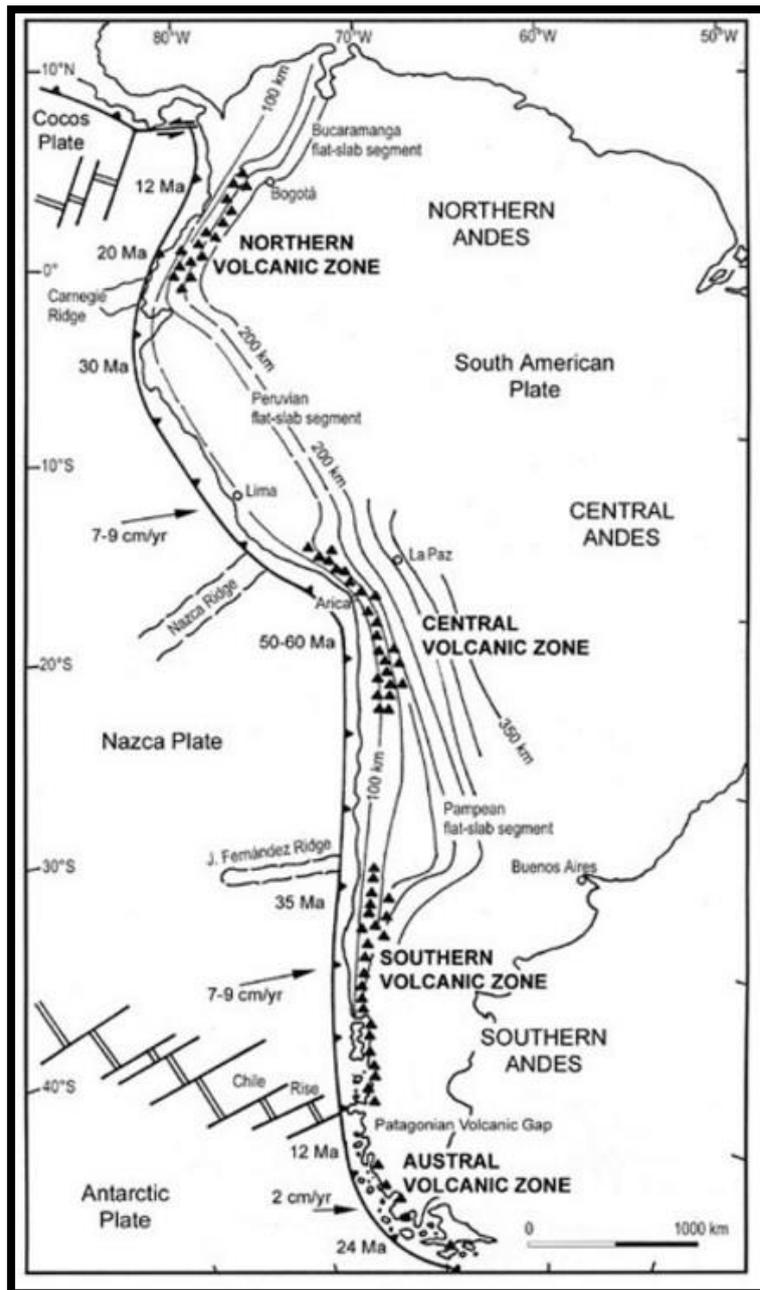
La Cordillera de los Andes es un orógeno que se extiende por más de 7000 km a lo largo del margen convergente en el que interactúan las placas oceánicas de Nazca y Antártica y la placa continental de Sudamérica, bajo un régimen tectónico principalmente compresivo (Lavenu, 2006). Actualmente la placa de Nazca subducta por debajo de Sudamérica de manera oblicua a una velocidad que varía entre 7 y 9 cm/año (Pardo-Casas y Molnar (1987), Somoza (1998), Norambuena *et al.* (1998), Angermann *et al.* (1999)).

Según Tassara y Yáñez (2003), si bien esta cadena montañosa es un elemento continuo sobre el margen occidental de Sudamérica, subsisten variaciones longitudinales sistemáticas en la topografía, tectónica, volcanismo, estructura litosférica profunda, geometría de subducción e historia geológica. Ello ha motivado la proposición del



concepto de 'segmentación andina', bajo el cual los Andes pueden ser divididos en cuatro segmentos que presentan una evolución geodinámica particular: Andes del norte ( $5^{\circ}\text{N}$ - $15^{\circ}\text{S}$ ), Andes centrales ( $15$ - $33,5^{\circ}\text{S}$ ), Andes del sur ( $33,5$ - $47^{\circ}\text{S}$ ) y Andes australes ( $47$ - $56^{\circ}\text{S}$ ) (Fig.1).

En lo que respecta a la actividad volcánica, el arco andino incluye más de 200 estratovolcanes y, al menos, 12 sistemas de calderas gigantes potencialmente activos, dispuestos en cuatro segmentos separados de la cadena andina conocidos como Zonas Volcánicas Norte (ZVN,  $5^{\circ}\text{N}$ - $2^{\circ}\text{S}$ ), Central (ZVC,  $14$ - $27^{\circ}\text{S}$ ), Sur (ZVS,  $33$ - $46^{\circ}\text{S}$ ) y Zona Volcánica Austral (ZVA,  $49$ - $55^{\circ}\text{S}$ ), y cuya actividad está asociada a la subducción. Los cuatro segmentos con volcanismo activo ocurren en zonas donde el ángulo de subducción es relativamente inclinado ( $25^{\circ}$ ), y entre ellos existen regiones donde el ángulo de subducción es relativamente plano ( $< 10^{\circ}$ ), a profundidades  $>100$  km y el volcanismo está ausente (Stern 2004) (Fig.1).



**Figura N° 1:** Se observa la subducción de las placas Nazca y Antártica por debajo de la Placa Sudamericana. La Cordillera de los Andes se conforma en sentido norte-sur de cuatro segmentos denominados Zona volcánica Norte, Central, Sur y Austral. Tomado de Stern (2004).

La ZVS ha sido dividida en segmentos norte (ZVSN, 33-34.5°S), transicional (ZVST), 34.5-37°S, central (ZVSC, 37-41.5°S) y sur (ZVSS, 41.5-46°S). Una configuración tectónica prominente en los segmentos ZVSC y ZVSS es la Zona de la falla de Liquiñe-Ofqui de 1000km de longitud y rumbo N10°E, la cual, junto con los lineamientos noreste-sudoeste y noroeste-sureste, controla la ubicación de algunos de los estrato

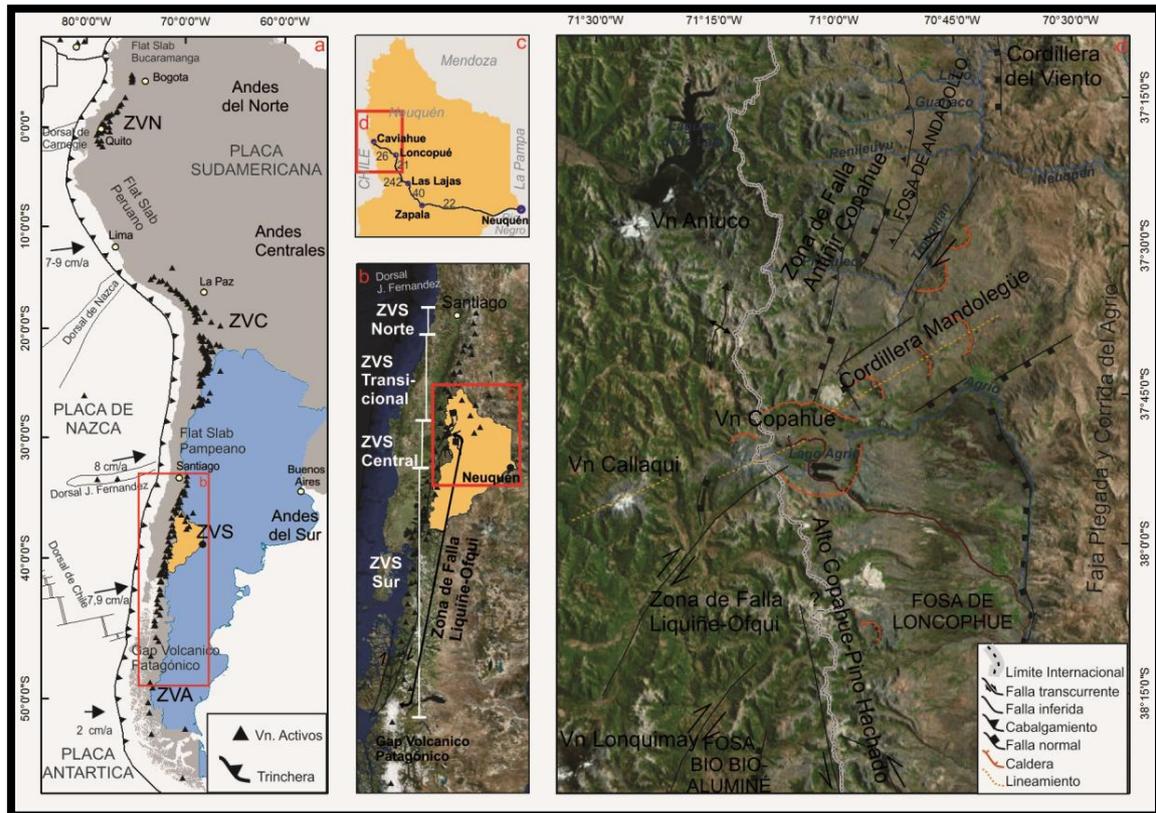


volcanes más grandes y cientos de pequeños centros eruptivos monogenéticos Holocenos a lo largo de la ZVSC y ZVSS (Stern 2004).

La ZVSN está compuesta por tres complejos volcánicos, a saber: Tupungato-Tupungatito, Marmolejo-San José y Maipo; los cuales forman una cadena volcánica corta y angosta localizada a 290 km de la trinchera. Esta cadena ha migrado 40 km hacia al este como consecuencia de la subducción de la dorsal de Juan Fernández (Stern 2004). Los sistemas volcánicos de las ZVS Central y Sur se asocian a lineamientos de rumbo NS o a sistemas en échelon con rumbos NE o NO (Moreno (1976), Nakamura (1977) y Cembrano y Moreno (1994)). Hacia el norte (ZVSN), el arco volcánico Cuaternario se encuentra bajo el control de la zona de la mencionada Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), rasgo estructural que acomoda mecánicamente la convergencia oblicua de la placa de Nazca mediante una zona de cizalla frágil transpresional dextral desde el Pleistoceno. Durante el Cuaternario la partición de la deformación generó la existencia de dos estados de estrés diferentes: (i) en el antearco, el esfuerzo principal sigue un rumbo N-S a NNE-SSO, mientras que el mínimo esfuerzo es vertical. (ii) en la zona de intraarco ocurre transpresión, y  $\sigma_1$  tiene una orientación NE-SO,  $\sigma_3$  se orienta NO-SE y  $\sigma_2$  es vertical (Laveny y Cembrano 1999). Bajo este régimen tectónico el vulcanismo desarrolla características particulares que responden a los estados de esfuerzos locales.

La región volcánica comprendida entre los 37°S y 39°S (ZVSC), es una zona tectónicamente compleja. A los 38°S se da la transición entre el sur de los Andes Centrales (27°-38°S) y el norte de los Andes Patagónicos (38°-45°S), sitio en el que se encuentra el límite entre la ZFLO y la Zona de Falla Antiñir-Copahue (ZFAC), la cual se desarrolla en el retro-arco (Fig 2.d). Ambos son sistemas de fallas de transcurrancia dextral, con un arreglo estructural que gira en sentido horario en la zona de transición entre ellos (Folguera *et al.*, 2004). La ZFAC se compone de tres zonas: un segmento N transpresivo; uno central transtensivo, con fallas transpresivas subordinadas; y uno S, más complejo, con depocentros transtensivos que coexisten con estructuras transpresivas menores (Folguera *et al.*, 2004). Durante el Oligoceno-Mioceno esta región estuvo dominada por un sistema de cuencas extensionales de rift, dividida internamente en sub-cuencas con geometría en hemigraben, ligadas a lo largo del rumbo mediante zonas de acomodación (Radic, 2010). Favorecido por estructuras preexistentes, el Volcán Copahue se encuentra sobre una zona de transferencia entre dos

hemigrabenes pertenecientes a la cuenca de Cura Mallín, que Radic (2010) denominó Zona de Acomodación Copahue-Callaqui (Fig.2).



**Figura N° 2:** Marco geotectónico regional. a) Mapa esquemático de América del Sur y placas tectónicas (Modificado de Stern 2004). Se muestran principales rasgos morfoestructurales de las placas, subdivisión del arco volcánico andino y vectores de convergencia (Pardo-Casas y Molnar (1987), Somoza (1998), Norambuena *et al.* (1998), Angermann *et al.* (1999), DeMets *et al.* (1990) y (1994), Tamaki (1999)). b) Detalle de la zonificación de la Zona Volcánica Sur y localización del Sistema de Falla Liquiñe-Ofqui (Stern, (2004) y referencias allí citadas, Cembrano y Moreno, (1994), Lavenu y Cembrano, (1999)). c) Mapa esquemático del camino de acceso a la localidad de Caviahue. d) Principales rasgos morfoestructurales de la región aledaña al volcán Copahue (Folguera y Ramos (2000), Folguera *et al.* (2004), Melnick, *et al.* (2006), Rojas Vera *et al.* (2009), Radic (2010)). ZVN: Zona Volcánica Norte; ZVC: Zona Volcánica Central; ZVS: Zona Volcánica Sur; ZVA: Zona Volcánica Austral. (Fuente de volcanes activos: *Smithsonian Global Volcanism Program and NOAA's National Geophysical Data Center*). Tomado de Hantusch, (2016).

### 3.2 Estructura del Complejo Volcánico Copahue

El volcán Copahue está localizado en una zona en la que interactúan varios sistemas estructurales de diferentes edades. A los 38° de latitud S, dentro de la ZVSC, ocurre la transición entre los Andes Patagónicos Septentrionales y los Andes Centrales (Melnick *et al.*, 2006). Aquí se encuentra la zona de transferencia entre dos hemigrabenes de polaridad opuesta, de rumbo NS, al norte de la zona de acomodación, y NNE al sur, los cuales formaron parte de la cuenca Oligo-Miocena de Cura Mallín, (Radic 2010). En



esta región se superponen también los lineamientos de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), desarrollada en el intraarco, y la Zona de Falla Antiñir-Copahue (ZFAC) que afecta el retroarco (Folguera *et al.*, 2004).

La Caldera del Agrio es el principal rasgo tectónico y morfológico que surge en el sitio donde se resuelve la transición entre el sistema ZFAC y la ZFLO. Al norte, entre los ríos Picunleo y Reñileuvú, se desarrolla la ZFAC Central. Se caracteriza por un fallamiento transtensivo dextrógiro de rumbo N60°E que favoreció la ocurrencia de conos monogenéticos dispuestos bajo control estructural (Folguera *et al.*, 2004). La Caldera del Agrio tuvo lugar, tentativamente, en el lapso Plioceno superior-Pleistoceno inferior como una depresión volcano-tectónica (Pesce 1989), que luego fue definida en base a evidencias estructurales, como una cuenca de tipo *pull-apart*, producto de movimientos transcurrentes dextrales vinculados a la ZFLO en su extremo norte (Folguera y Ramos 2000 y Melnick *et al.*, 2006). De esta forma, la actividad volcánica durante el Cuaternario habría estado fuertemente controlada por el sistema de fallas principales que limitan la depresión (N 70° O y N 30°E) y aquellas de orientación ONO que marginan los grábenes de Trollope y Caviahue (Melnick *et al.*, 2006). Por otra parte, algunos autores como Pesca (1989) proponen para esta depresión un origen por colapso con emplazamiento simultáneo de flujos ignimbríticos que luego Sruoga y Consoli (2004), sobre la base de relevamientos detallados de las unidades, estudios geoquímicos comparativos y obtención de edades Ar/Ar, descartan y recomiendan abandonar el término «caldera» para la depresión subcuadrangular del Agrio, ya que no reúne las evidencias diagnósticas que avalen esa interpretación.

En el marco de la Caldera del Agrio se destaca el cerro Chanco Có, situado al noreste del volcán Copahue. Melnick *et al.* (2006) le otorgan un origen tectónico, aunque sugieren que podría tratarse de un domo resurgente con fuerte control estructural. El núcleo de esta estructura está compuesto por rocas levemente inclinadas de la Formación Hualcupén, cubiertas en discordancia erosiva por la Secuencia Volcánica Las Mellizas, cuyas rocas presentan erosión glaciár. Folguera y Ramos (2000) le asignan una génesis compresiva, causada por esfuerzos locales, que generan una estructura plegada con vergencia hacia el sureste, y un eje de rumbo N60°E. Sobre esta estructura los autores interpretaron fallas normales, con rechazos de hasta 3 metros, que se extienden por kilómetros en dirección al bajo de Trollope hacia donde hay una



progresiva pérdida del rechazo vertical y una modificación del azimut de NE a este-oeste. Folguera y Ramos (2000) también identificaron dos escarpas interpretadas como relacionadas a fallamiento inverso, que se extienden de manera concordante con el eje estructural predominante, la más joven situada al norte del Anfiteatro y la otra al norte de la localidad de Copahue. Las estructuras del cerro Chanco Co ejercen control sobre las principales manifestaciones del área: las Termas de Copahue, el Anfiteatro, Las Máquinas y Las Maquinitas, las cuales forman un arreglo en échelon, con una génesis transtensional y una componente de rumbo dextrógira. Folguera y Ramos (2000), Melnick *et al.* (2006) y Rojas Vera *et al.* (2009) proponen un nuevo modelo tectónico para este sistema de cabalgamientos, en el cual el control es ejercido por fallas pertenecientes a la cuenca de Cura Mallín, invertidas en subsuelo y que afectan en superficie a la Secuencia Volcánica Las Mellizas.

Dentro del área geotermal comprendida en la Caldera del Agrio, JICA (1992) definió tres dominios estructurales cuyos rumbos predominantes son ONO-ESE, NE-SO y NO-SE, de los cuales los dos primeros son los dominantes:

- El dominio ONO-ESE está representado por las estructuras que forman el Paso Copahue-Graben del Lago Caviahue. Estas serían fallas normales, con un rechazo máximo de 200 metros observado en el Cerro Chanco Co, el cual disminuye hacia el este.
- El dominio NE-SO involucra fallas que se localizan en las áreas con manifestaciones termales alrededor de la villa Termas de Copahue. Algunas estructuras se extienden desde la ladera NE del volcán hacia el NE de las áreas termales. En general estas fallas poseen rechazos menores y poseen buzamientos verticales.
- El tercer dominio estructural caracterizado por rumbos NO-SE está formado por fallas inversas observadas a lo largo del arroyo Blanco al noreste de Las Maquinas. Se destacan dos fallas inversas de rumbo N30°O a N40°O y buzamientos entre 60° y 70° hacia el SO. El desplazamiento principal en estas estructuras ocurrió antes de que culmine la actividad que dio origen a la Secuencia Volcánica Las Mellizas.



### 3.3 Estratigrafía del Complejo Volcánico Copahue

El Complejo Volcánico Copahue se corresponde con un periodo de actividad magmática que comenzó en el Plioceno y se extendió hasta el Holoceno y posee un nutrido registro de erupciones en tiempos históricos. Forma parte de un sistema volcano-tectónico desarrollado bajo un régimen transtensional, el cual abarca eventos dominados por derrames lávicos y emisiones piroclásticas fisurales y construcción de aparatos volcánicos de baja altura. En virtud de la discrepancia existente entre los resultados radimétricos disponibles, la ubicación cronoestratigráfica precisa de estos eventos y su interpretación constituyen tema de debate entre los distintos autores (Sruoga y Consoli, 2011).

En cuanto a la estratigrafía estudiada, Pesce (1989) ha diferenciado unidades en volcanismo pre-caldera y post-caldera:

#### **Unidades Pre-caldera:**

*Basamento:* No aflora en superficie en el área de estudio, por lo que a través de perfiles de resistividad eléctrica se estimó que se encuentra entre 1700 y 1800 m debajo de la superficie (JICA, 1992). Sin embargo, se ha establecido que está constituido por rocas sedimentarias mesozoicas de la Cuenca Neuquina y por rocas Oligo-Miocenas, pertenecientes a la cuenca de Cura Mallín (JICA (1992) y Folguera y Ramos (2000)).

*Formación Hualcupen:* La base del complejo se encuentra integrada por estas rocas, que pertenecen a un evento efusivo que tuvo su principal boca de emisión en la zona de Las Máquinas y que originó un antiguo estrato-volcán, formando un relieve mesetiforme que abarca gran extensión. La unidad se encuentra integrada por una secuencia de basandesitas y andesitas potásicas de colores grises a pardo oscuro con intercalaciones de aglomerados volcánicos grises y pardos. Esta unidad continúa hacia el oeste y es denominada Formación Cola de Zorro (González y Vergara, 1962) en territorio chileno. Niemeyer y Muñoz Bravo (1983) estimaron un espesor máximo de 1900 m del lado chileno y de hasta 500 m del lado argentino y le otorgaron edad pliocena.

Luego del evento que dio origen a la Formación Hualcupen, un cambio en el dinamismo da origen a una extensa caldera lo cual es de elevada importancia debido a que



condiciona las nuevas vías de emplazamiento de las posteriores emisiones y a su vez habría facilitado la apertura hacia a superficie de nuevas secuencias magmáticas.

### **Unidades Post-caldera:**

A fines del Plioceno tiene lugar el primer estadio efusivo post-caldera, el cual es representado por tres centros efusivos (Centro efusivo Las Mellizas, Centro efusivo Trolón y Centro efusivo Cerro Bayo). Los tres centros volcánicos se habrían formado en forma concomitante en el inicio del Pleistoceno y se apoyan estratigráficamente sobre rocas de la Formación Hualcupen (Pesce, 1989).

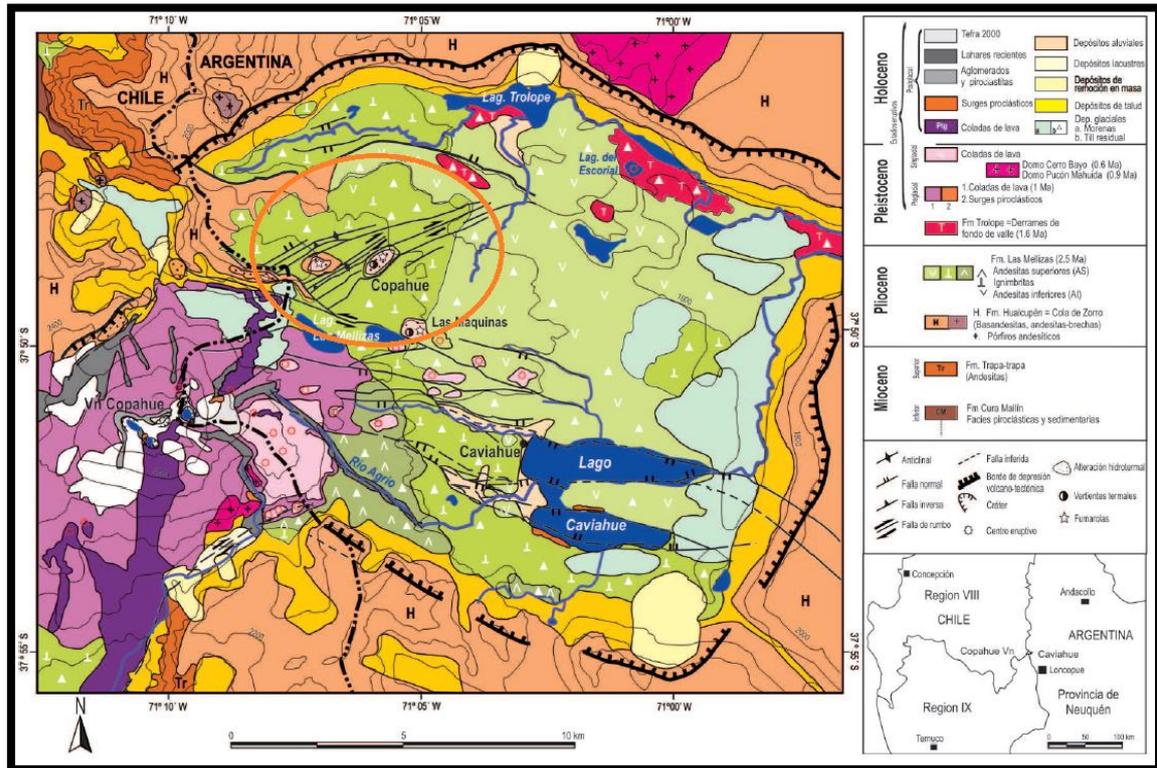
*Secuencia Volcánica Las Mellizas (SVLM):* o Centro Efusivo Las Mellizas según Pesce (1989), constituye un estrato volcán emplazado en el extremo suroeste de la caldera, favorecido por dislocaciones profundas del borde de caldera denominado Caldera Las Mellizas (Melnick *et al.*, 2006). Sus derrames cubrieron el sector oeste, originando un edificio con fuerte pendiente oeste-este, motivo por el cual, en la zona fronteriza la unidad posee una potencia de 1800 m, disminuyendo a solo cientos de metros en el área más distal (Pesce, 1989).

Melnick *et al.* (2006) describen y subdividen esta unidad en tres litofacies:

- *Lavas Inferiores:* Lavas con disyunción columnar de composición basáltica a andesítica, con intercalaciones de depósitos aluviales o de origen lahárico, con bloques de hasta 70cm. Aflora en sectores aislados dentro de la caldera, pero ampliamente en territorio chileno donde su potencia alcanza 500 m.
- *Ignimbritas:* Litofacies andesítica a dacítica, con gradaciones verticales, entre textura eutaxítica, pseudo-fluidalidad y una completa homogenización a textura vítrea. Presenta un vitrófiro basal de variada potencia (3 a 20 m), presente en casi todos los sitios de afloramiento de la unidad. Tiene una amplia distribución en toda la caldera y al norte y noroeste del Volcán Copahue siendo la formación que cubre por completo la zona de estudio. El espesor máximo medido en afloramiento es de casi 20 m, y el mínimo es de 5 m cerca de la localidad de Copahue.
- *Lavas Superiores:* Es la facies dominante y rellena la mayor parte de la caldera, con una potencia que alcanza los 200 m. Son lavas andesíticas, con textura y potencia homogénea, que presentan diaclasas horizontales características de la

unidad. Se encuentran por encima de las Ignimbritas y son cubiertas por los flujos del Volcán Copahue.

También forman parte de las unidades post-caldera otros numerosos depósitos descritos por Melnick *et al.* (2006), Linares *et al.* (1999), entre otros, pero como no se encuentran dentro del alcance de este trabajo, no serán descriptas (Fig.3).



**Figura N° 3:** Mapa geológico de la Caldera del Agrío y sus alrededores, Sruga y Consoli (2011). El círculo de color indica la zona de estudio de este trabajo. La estratigrafía volcánica tiene en cuenta las edades K/Ar de Linares *et al.* (1999).

### 3.4 Sistema hidrotermal asociado y su relación con las estructuras

El Complejo Volcánico Copahue-Caviahue es, a su vez, un campo geotérmico cuyo diseño y formación se encuentran marcadamente influenciados por los tres sistemas de fallas antes descriptos involucrados en el contexto de este trabajo.

Dichos sistemas se encuentran relacionados con las estructuras regionales, las cuales presentan una orientación N55O, como resultado de la formación de la caldera. También es posible relacionarlos con las vertientes calientes y la presencia de un reservorio de vapor (Mas *et al.*, 2000) (Fig.4).

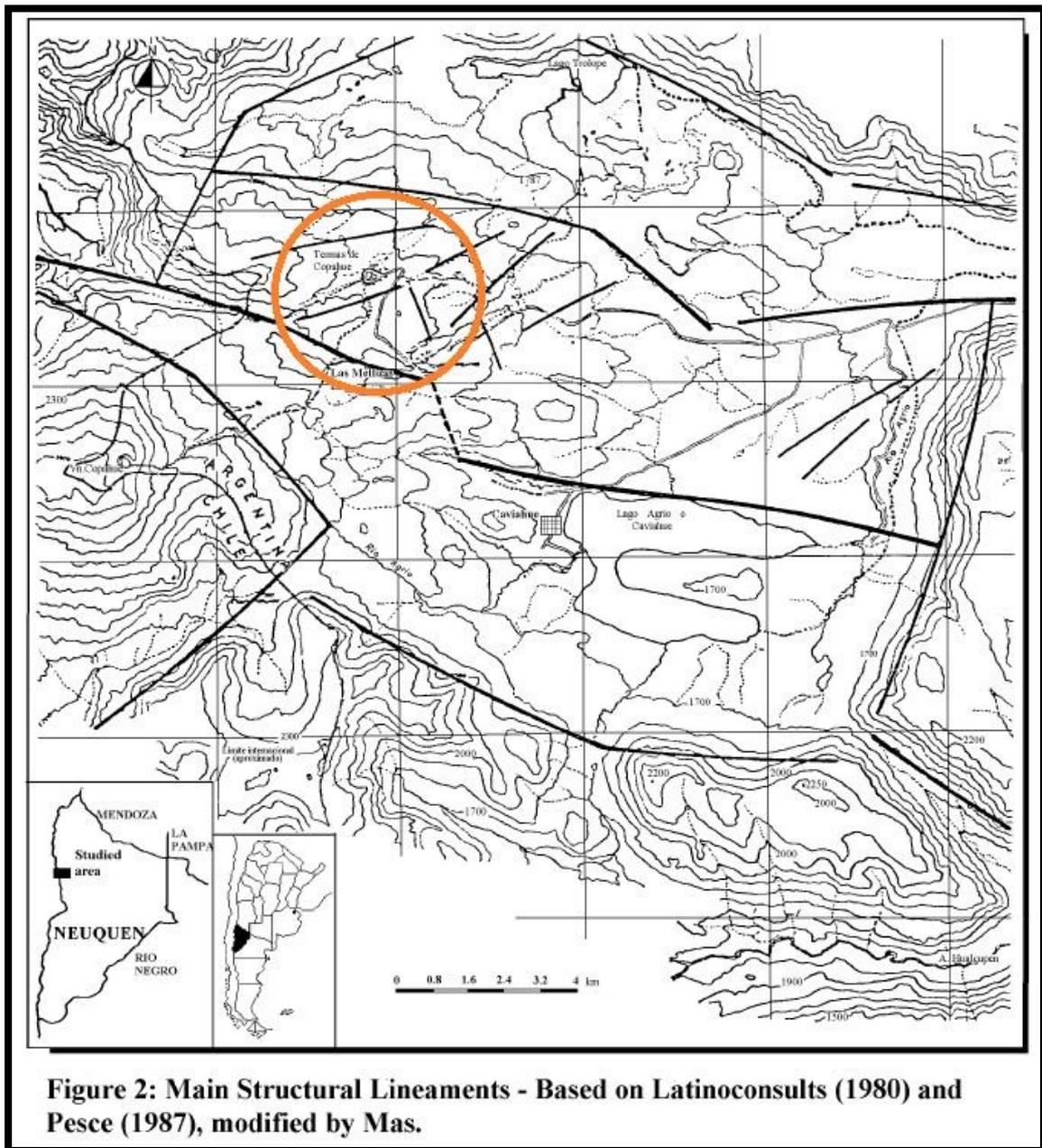


Un rasgo geomorfológico característico del campo es la presencia de cubetas o bateas, producto de la erosión diferencial de zonas alteradas hidrotermalmente. Estas zonas constituyen las manifestaciones activas denominadas Termas de Copahue, Las Máquinas, Las Maquinitas y Anfiteatro en la Argentina y Chancho Co en Chile, ubicadas al oeste de un pozo de exploración denominado COP-2 (Mas *et al.*, 2000) Consisten principalmente de fumarolas, manantiales calientes y conos de barro. Todas ellas se encuentran sobre el *horst* ubicado al noreste del volcán Copahue y el área completa comprende aproximadamente 20km<sup>2</sup> (Mas *et al.*, 1996). Menos la manifestación del lado chileno, las demás manifestaciones se encuentran incluidas en el área de estudio de este trabajo.

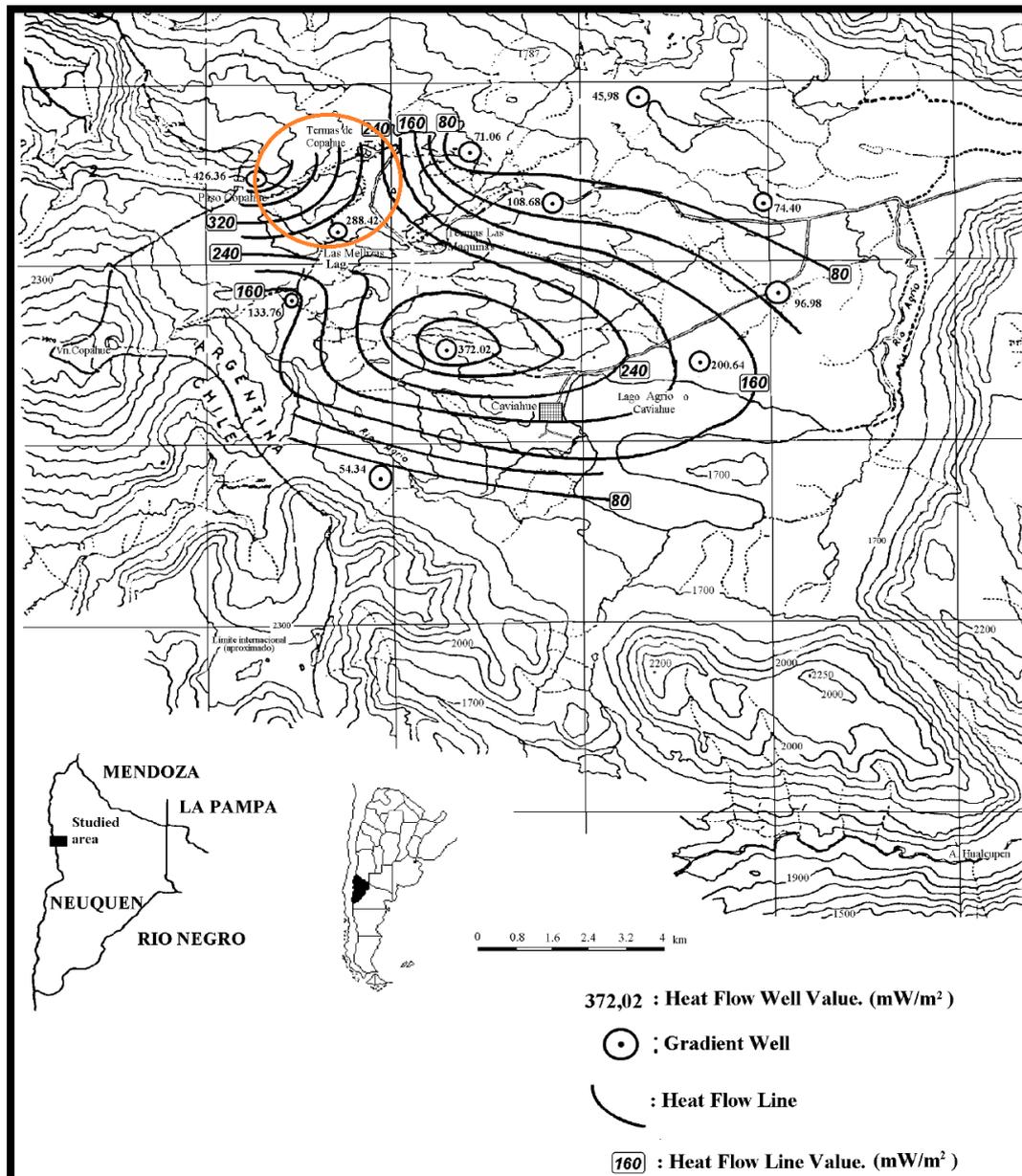
Según Mas *et al.* (2000) el reservorio se encuentra ubicado predominantemente en zonas de permeabilidad secundaria, en lavas calco-alcálinas y rocas piroclásticas de la Formación Las Mellizas, y contiene vapor sobrecalentado. Panarello (2002) con los datos obtenidos de los registros de pozos, caracterizó el campo geotermal como uno dominado por vapor con la existencia de al menos 2 capas productivas, una a profundidades de 800-1000m y otra más profunda a más de 1400m (medidas desde el nivel tope de pozo); con temperaturas de 200°C y 250°C respectivamente (Bravo Ojeda, 2015).

El trabajo de Mas *et al.* (2000), comprueba la relación estrecha existente entre el sistema geotérmico y las estructuras mediante la realización de un mapa de distribución del flujo de calor que, comparado con el marco estructural en el área de estudio, indica una fuerte correlación entre la tendencia de los más altos valores de flujo de calor calculados y los lineamientos estructurales principales (Fig.4 y 5).

Se entiende, entonces, que la intensa actividad tectónica ha producido permeabilidad secundaria, restringida a aquellas áreas en las que los flujos calientes ascienden a los niveles superiores. Este hecho es verificado por la ubicación de las vertientes calientes y su relación con los lineamientos. Es posible también observar que el área con anomalía geotérmica es mayor que el área calculada de reservorio, la cual se extiende al este a sudeste, en dirección al Lago Agrio (o Caviáhué) (Mas *et al.*, 2000).



**Figura N° 4:** Lineamientos estructurales principales en la Caldera del Agrio. El círculo indica el área de estudio de este trabajo en el cual se reconocen los tres sistemas de fallas descritos. Mas *et al.* (2000).



**Figura N° 5:** Mapa de distribución de flujo de calor. El círculo denota la zona de estudio de este trabajo. Mas *et al.* (2000).

### 3.5 Actividad sísmica

El complejo volcánico Copahue-Caviahue, representa uno de los sistemas volcánicos con mayor actividad del territorio argentino. Sus manifestaciones más evidentes están representadas por el volcán Copahue y su campo geotermal asociado (Forte *et al.*, 2012). La particularidad de estos ambientes es que las señales sísmicas no se limitan a eventos relacionados con fractura de roca (terremotos volcano-tectónicos o VT), que presentan llegada de fases P y S definidas, y que pueden ser explicados por mecanismos



de doble par. También involucran señales relacionadas con la dinámica de fluidos del propio sistema volcánico (LP y Tremor) (Forte *et al.*, 2012). Debido a que puntualmente para realizar la modelación con Coulomb 3.3, es necesario que haya fracturación de roca con un rechazo significativo, en este trabajo nos concentraremos en el tipo de señal VT.

Las señales VT predominantes en el área de estudio dan magnitudes de sismicidad baja a media (entre 1 y 4 Mw aproximadamente), siendo los valores entre 2 y 3,5 Mw los más frecuentes. Esto, como fue señalado en la sección 2.2 Modelación (Limitacione), es lo que refleja una importante disminución en los datos útiles para realizar la modelación con el *software* mencionado.

Dentro del marco anterior, y observando los datos sísmicos que involucraran señales VT con epicentro ubicado en el área de estudio o cercano a ella, han existido una gran cantidad de sismos en los últimos años. A los fines de este trabajo, se optó por modelar con las señales VT registradas por el OVDAS en el periodo mayo de 2012 a marzo de 2016 que, en sumatoria, alcanzan 4940 eventos VT que varían dentro de las magnitudes mencionadas. Del intervalo de datos seleccionados, se separaron aquellos más convenientes para realizar la modelación de los cambios de *stress* en las estructuras mapeadas.

#### **4 Mapa estructural y estratigráfico del área de estudio.**

Mediante la utilización de imágenes satelitales y fotografías aéreas, en primera instancia se identificaron lineamientos y estructuras mayores vinculadas a la tectónica reciente.

Luego, ya en el campo, se realizó una breve descripción de los afloramientos presentes incluyendo litología, textura y estructuras. Se midieron indicadores cinemáticos sobre los planos de falla junto con los rumbos y buzamientos con el fin de identificar los lineamientos observados en las imágenes, principalmente en las estructuras en las que se registró actividad sísmica reciente, pero esto resultó más difícil de lo esperado debido a la gran alteración hidrotermal propia del área. Esta situación permitió tomar datos de calidad variable pero que, en rasgos generales, pudieron ser bastante bien asociados a las estructuras reconocidas anteriormente y en el campo (Tabla 2).

#### 4.1 Datos e información obtenida

En la siguiente tabla se muestran los datos relevados en el campo de indicadores cinemáticos utilizados en la construcción del mapa estructural.

N° de Waypoint	Plano		Indicador cinemático ( <i>Rake</i> )	Tipo	Calidad
	Rumbo	Buzamiento			
1	90/340		R86NO	Inversa	A
	N261	71S	R72NO	Inversa	A
4	N238	42SE	R82E	Normal	C
	N243	62NO	R2E	Inversa	B
	N223	75NO	R7O	Inversa	B
5	73/319		R79E	Inversa sinistral	B
	N240	83SE	R65E	Inversa	A
8	N131	8O	R42S	Normal dextral	B
	70/0,80		R44S	Normal dextral	B
9	N91	81S	R46E	Inversa dextral	B
11	N83	85N	R82E	/	C
	83/0,12		R86E	Normal dextral	B
	80/0,03		R90E	Normal dextral	B+
18	N180	67O	R84S	/	B-
19	87/182		R60E	Normal sinistral	C
20	N167	50SO	R72N	Normal dextral	A
21	74/20		R74E	Normal dextral	A-
23	N260	89S	R51E	Normal sinistral	A-
24	N84	80S	R64O	Inversa sinistral	A
	68/167		R85E	Inversa dextral	A
25	89/195	N	R60E	Inversa dextral	C
29	N71	86NO	R88E	Inversa sinistral	C
	N141	85NE	R78NO	Normal sinistral	B+
	N79	88N-NO	R50E-NE	/	A

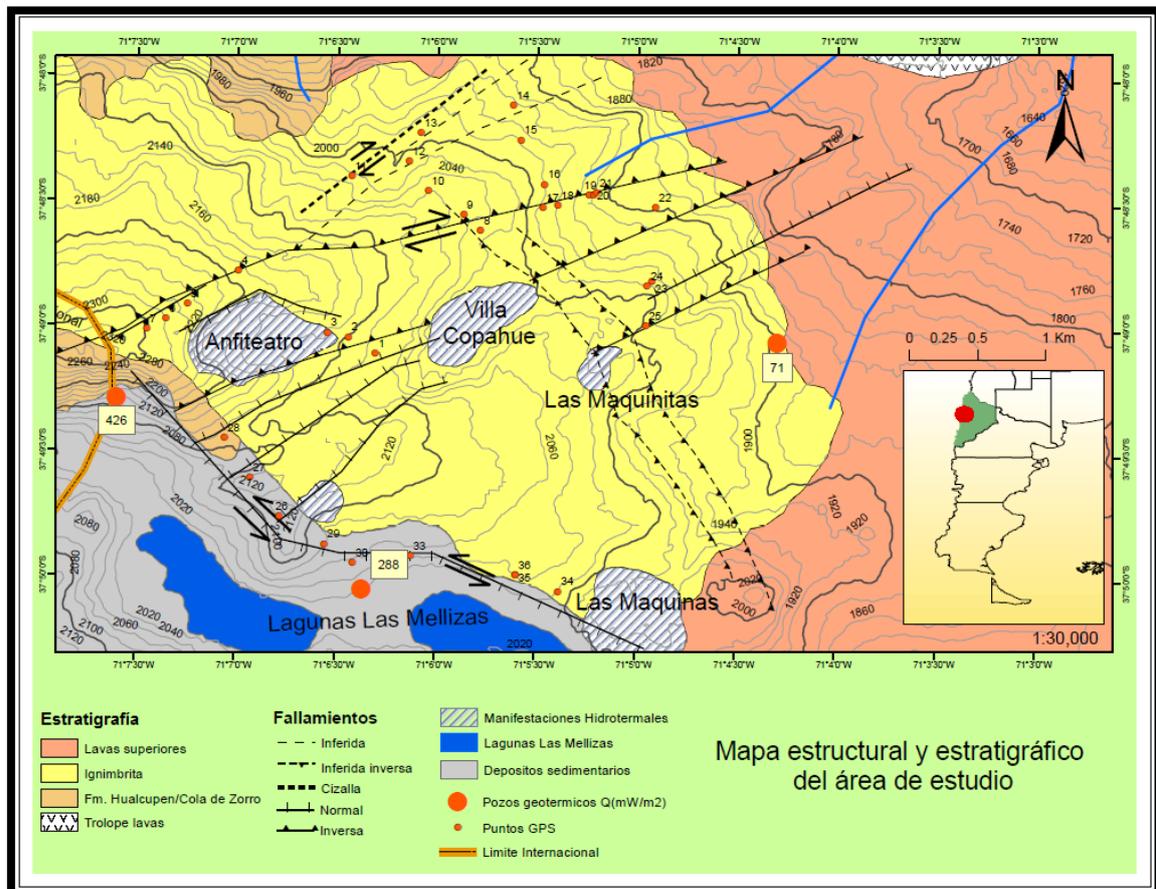


30	N226	39SE	R71E-NE o R89E-NE	Inversa dextral	A
	N243	64SE	R84NE	Inversa dextral	A
	N230	80NO	R82SO	Normal sinistral	B
36	N271	42S	R89E	Normal sinistral	A
46	N180	70O	R40S	Inversa dextral	B
	N215	82NO	R88SO	Inversa dextral	A

**Tabla 2:** Datos de los indicadores cinemáticos tomados durante el trabajo de campo. Los cambios de color indican datos que dan resultados similares en cuanto a tipo de fallas. La calidad de los datos va de A, muy confiable, a C, poco confiable. Cabe destacar que no todos los datos fueron utilizados en la realización del mapa estructural debido a la confiabilidad de la información disponible.

## 4.2 Cartografía estructural

Como resultado de las actividades realizadas, los datos relevados y los trabajos realizados por los autores anteriormente citados, fue posible crear un mapa estructural y estratigráfico del área de estudio (Fig.6), el cual, sumado a la actividad sísmica registrada en la zona, es de suma importancia para la obtención del modelo de variación de *stress* en las estructuras que se obtuvo con el uso del *software* Coulomb 3.3 más adelante en este trabajo.



**Figura N° 6:** Mapa estructural y estratigráfico del área de estudio. Los puntos donde se midieron indicadores cinemáticos coinciden con los puntos GPS tomados a lo largo del recorrido y mostrados en la **Tabla 2**.

Observando el mapa estructural y estratigráfico obtenido del trabajo de campo, es posible establecer a grandes rasgos tres sistemas de fallas:

- N°1: este sistema de fallas presenta componente de rumbo sinistral con orientación N55O aproximadamente. Estas fallas formaron el graben Lago Caviahue-paso Copahue, cruzan la caldera y van hacia el lado Chileno.



- N°2: este sistema de fallas inversas presenta componente de rumbo dextral y se encuentra orientado N60-70E. Son las fallas observadas en el área de manifestaciones hidrotermales en los alrededores de Termas de Copahue. Estas fallas pueden ser claramente trazadas en fotografías aéreas. Algunas se extienden desde el flanco NE del volcán Copahue hasta el NE de las manifestaciones hidrotermales.
- N°3: este sistema de fallas incluye las observadas por JICA (1992) a lo largo del Arroyo Blanco, ubicado al noreste de Las Maquinas. Las fallas principales son dos de tipo inversas con un rumbo de N30-40W. Estas fallas no fueron identificadas en el campo pero fueron incluidas en el mapa estructural por su presunta relación con el sistema hidrotermal alojado en la zona. Dicha relación también fue establecida por JICA (1992).

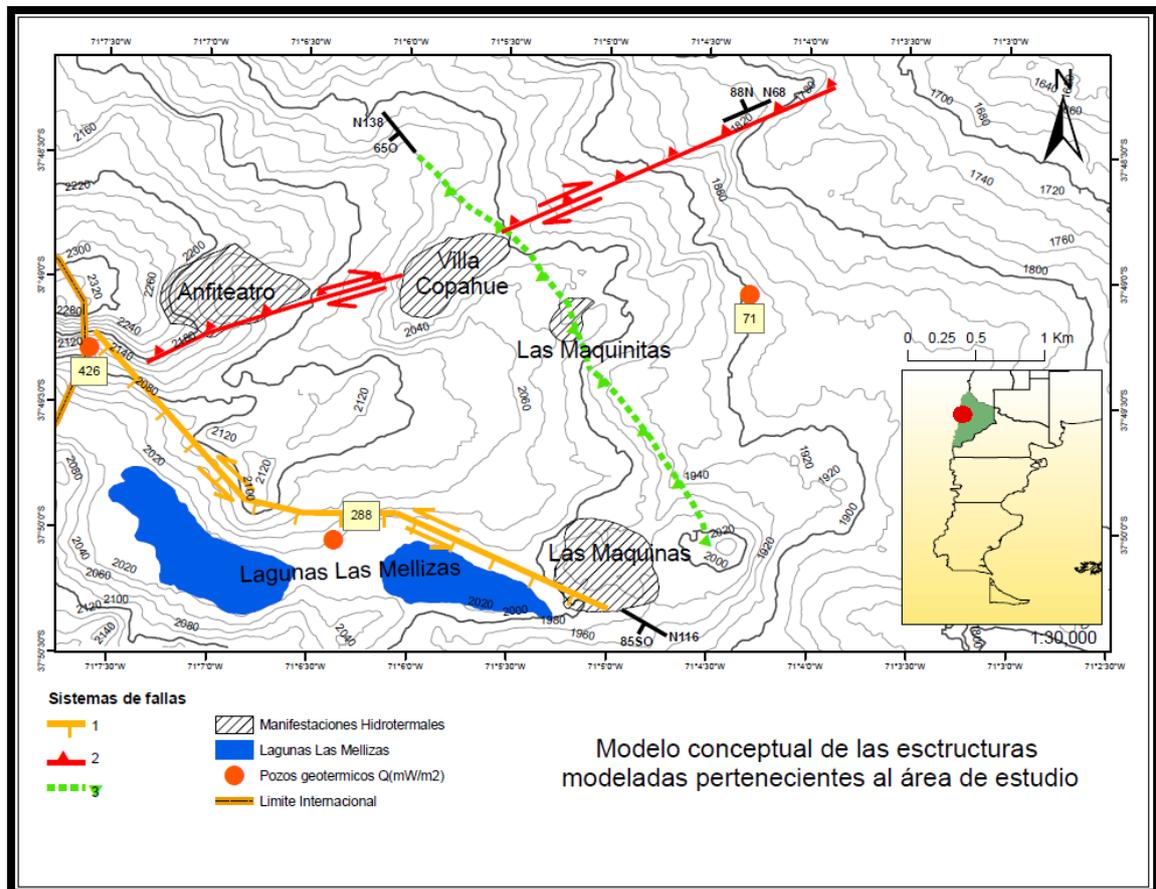
La asociación de estos sistemas de fallas con las manifestaciones termales superficiales y con la presencia de fluido geotérmico en el subsuelo quedó evidenciada asimismo durante el desarrollo de los pozos exploratorios COP-1, COP-2 y COP-3 (Mas *et al.*, 1996) aspecto que fue importante a la hora de interpretar los modelos realizados con Coulomb 3.3.

Respecto a la estratigrafía del área de estudio y el alcance de este trabajo, es posible observar en el mapa que el predominio litológico afectado por las estructuras corresponde a la Secuencia Volcánica Las Mellizas descrita anteriormente, aflorando en superficie las ignimbritas típicas de esta formación. Considerando el espesor de esta secuencia, gracias a trabajos realizados por Pesce (1989) y otros, podemos asumir que es cercano a los 2000 m, esta información es importante para luego definir los valores que afectan el comportamiento físico de las rocas al realizar la modelación con Coulomb 3.3.

## 5 Modelación

### 5.1 Modelo conceptual

El modelo conceptual tiene como objetivo representar los componentes del sistema estructural-hidrotermal y sus relaciones de manera simplificada. El sistema hidrotermal está relacionado fundamentalmente con tres sistemas de fallas que son los presentados y descritos en la cartografía estructural en el punto 4.2 de este trabajo y se encuentran representados en el siguiente modelo conceptual.



**Figura N° 7:** Modelo conceptual representando los sistemas de fallas asociados a las manifestaciones hidrotermales.

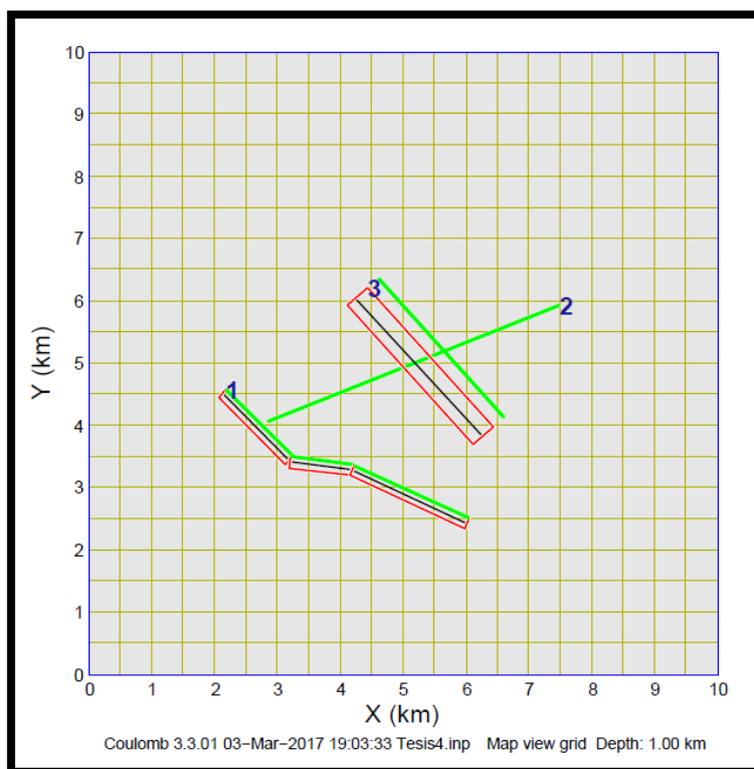
Cada sistema de fallas observado en el modelo conceptual está definido en base a la densidad de epicentros localizados en el área de estudio durante el periodo 2012-2016 y se representa por las características (de rumbo, buzamiento, *rake*, longitud y profundidad) predominantes (número más frecuente). A su vez, se consideran una serie de aspectos:

- \_ El plano de ruptura representa una zona de falla activa.

- \_ La profundidad máxima de actividad de estas fallas es de 2 km mientras que la actividad hidrotermal se desarrollaría principalmente a 1 km de profundidad.
- \_ La máxima magnitud registrada de 4 Mw tiene una alta probabilidad de ocurrencia.
- \_ El sistema se encuentra alojado en un medio de propiedades físicas homogéneas.

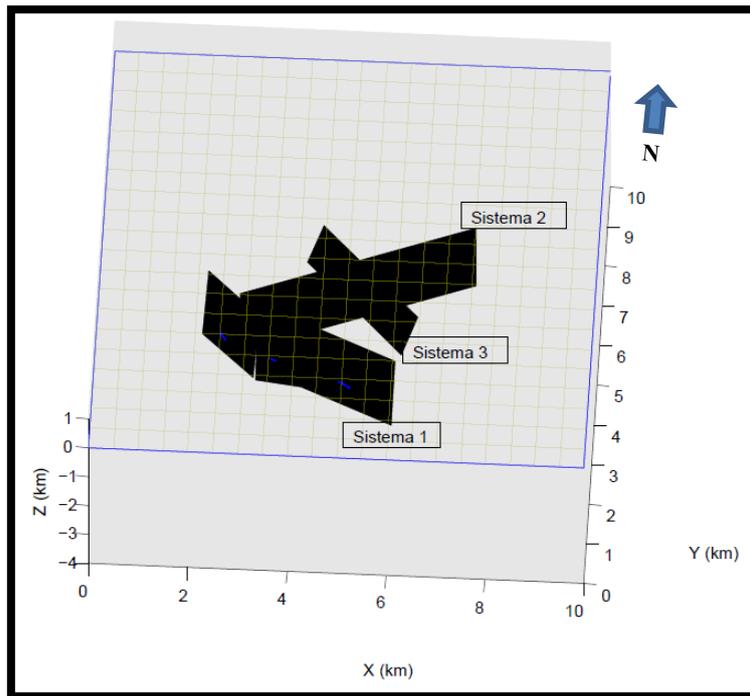
## 5.2 Implementación del programa Coulomb

El modelo conceptual primero se representó en 2D con el programa Coulomb 3.3 como se muestra en la fig. N° 8, a modo de mostrar de manera simple los sistemas de fallas a modelar.



**Figura N° 8:** Representación 2D del modelo conceptual realizado con el programa Coulomb 3.3 de las estructuras pertenecientes al área de estudio. Los rectángulos rojos pertenecientes a los sistemas de fallas N° 1 y 2 son las proyecciones en superficie de los planos de fallas, y la línea negra en el medio indica el plano horizontal donde se medirá la variación de *stress* a profundidad de 1km.

Luego, el modelo conceptual fue representado en 3D como se muestra en la fig. N° 9. Si bien la profundidad conocida de actividad de las fallas es de 2 km, el modelo toma por defecto una profundidad mayor (cercana a 3 km) relacionada con la longitud y el ancho de la falla.



**Figura N° 9:** Representación 3D del modelo conceptual realizado con el programa Coulomb 3.3 de las estructuras pertenecientes al área de estudio.

A medida que fueron siendo modeladas, cada falla tomó el lugar de falla emisora (anfitriona del foco sísmico) o de receptora (afectada por la variación de *stress*) y fue comparada con tipos de fallas óptimas para recibir la mayor variación de *stress* de coulomb positiva posible, esto permitió ir creando escenarios con sus variantes a lo largo de la simulación, los cuales son detallados más adelante en este trabajo.

Como fue especificado en el capítulo 2 (Metodología), en la descripción de parámetros, fueron contemplados una serie de parámetros fijos en base a supuestos que el programa asume y/o que el usuario define a la hora de modelar. Estos son las características de los sistemas de fallas, definidas para cada sistema en particular, el módulo de Poisson ( $\nu$ ) y el coeficiente de fricción ( $\mu$ ), definidos como de 0.25 y de 0.4 respectivamente para rocas de la corteza, esto implica que el espesor de roca modelado es homogéneo y no presenta variaciones en sus características físicas. Por último, la profundidad de cálculo fue definida como de 1km debido a que esa es la profundidad donde se estima que se desarrolla el sistema hidrotermal asociado.

### 5.3 Escenarios modelados

En lo que respecta a la utilización del software arriba descripto, se plantearon 4 posibles escenarios con sus variantes detallados en la tabla 3.

Escenario	Falla emisora	Rumbo	Buzamiento	Rake	Mw	Slip (m)		Profundidad (km)	Falla receptora	Rumbo	Buzamiento	Rake
						Inverso	Dextral					
1	Sistema 1	N135	85 SO	-90	4	-0.01	-0.005	1	Sistema 2	N68	88 N	180
		N97							Sistema 3	N138	65 O	90
		N115							Fallas optimas normales	Definidas por Coulomb		
									Fallas optimas inversas			
									Fallas optimas de rumbo			
2	Sistema 2	N68	88 N	180	4	0.003	0.003	1	Sistema 1	N135	85 SO	-90
										N97		
										N115		
		Sistema 3							N138	65 O	90	
		Fallas optimas normales							Definidas por Coulomb			
		Fallas optimas inversas										
		Fallas optimas de rumbo										
3	Sistema 3	N138	65 O	90	4	0.01	no presenta	1	Sistema 1	N135	85 SO	-90
										N97		
										N115		
		Sistema 2							N68	88 N	180	
		Fallas optimas normales							Definidas por Coulomb			
		Fallas optimas inversas										
Fallas optimas de rumbo												
4	Terremoto en Chile	N181	72	90	5.7	0.89	no presenta	21.5	Sistema 1	N135	85 SO	-90
										N97		
										N115		
									Sistema 2	N68	88 N	180
Sistema 3	N138	65 O	90									

**Tabla 3:** Escenarios modelados con el software Coulomb 3.3. Observar que para un mismo sistema emisor, se adjuntan varios sistemas receptores. Los valores de slip detallados son negativos cuando la falla es normal y/o sinistral y positivos cuando la falla es inversa y/o dextral.

Observando la tabla, en los Escenarios 1, 2 y 3 por un lado, se contempla la variación de *stress* de las estructuras en las que hay actividad sísmica registrada dentro de la zona de estudio, ubicando el foco del sismo en cada una de las tres fallas mostradas en el modelo conceptual y viendo como varía el esfuerzo de Coulomb en fallas receptoras específicas, es decir, fallas con un determinado rumbo, buzamiento y rake pertenecientes a estructuras existentes medidas e identificadas en el campo. Además, se calculan las variaciones de *stress* para fallas óptimas normales, inversas y de rumbo repitiendo la operación de ubicar el foco del sismo en cada una de las fallas mostradas en el modelo conceptual, esperando que el programa encuentre la orientación de la falla (normal, inversa o de rumbo) que sea óptima para percibir la mayor variación de *stress* (positivo) posible, esto es útil cuando se sabe que hay fallamientos en el área pero estos no fueron identificados o medidos. El valor de magnitud de los sismos a modelar en las estructuras pertenecientes al área de estudio fue de 4, debido a que este es el valor más elevado de magnitud que se encontró dentro del rango de valores que presentan todos los sismos con epicentro en la zona de estudio en el lapso de tiempo estipulado en capítulos anteriores (2012-2016).

En el escenario 4 se optó por modelar la variación de *stress* de las mismas estructuras pero esta vez afectadas por terremotos de mayor magnitud sucedidos en áreas cercanas a la zona de estudio pero no dentro de ella, lo que correspondería en este caso a los terremotos sucedidos en el límite de placas Nazca-Sudamericana (Chile) con magnitudes del orden de entre 6-9. Con este fin, se buscó entre los sismos ocurridos en los últimos años, más específicamente entre el 2012 y el 2016, en la página de CMT catalog <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> y se seleccionó aquel con magnitud mayor a 5 lo más cercano posible a la zona de estudio (Fig. 10). El terremoto elegido para este caso fue uno sucedido en la costa chilena el 3/10/2015 a 165km de Temuco con epicentro de coordenadas lat: -37.57 lon: -73.71 y magnitud 5.7Mw, es el más reciente y el más cercano a la zona de estudio con una magnitud significativa (Fig. 11).

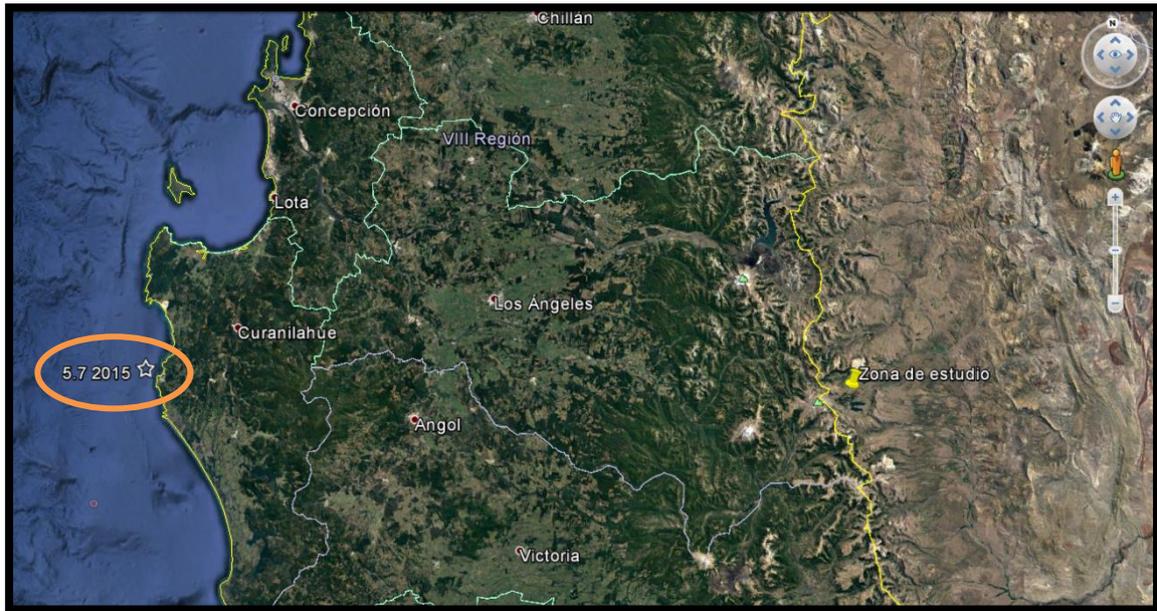


Figura N° 10: Ubicación del sismo seleccionado para realizar la modelación con Coulomb 3.3.

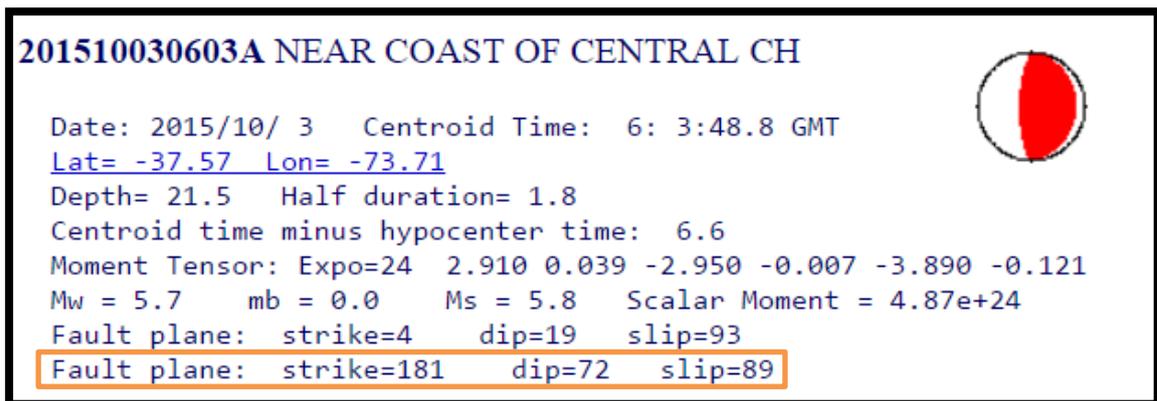


Figura N° 11: Información obtenida de CMT Catalog del sismo sucedido en la costa de Chile más cercano al área de estudio y con magnitud mayor a 5 seleccionado para realizar la modelación con Coulomb 3.3. El rectángulo naranja indica el plano de falla seleccionado para la modelación.

El sismo seleccionado fue cargado en el software y se realizaron los cálculos de variación de *stress* de Coulomb correspondientes para cada sistema de los descriptos anteriormente como principales lineamientos estructurales en la zona de estudio relacionados con el sistema hidrotermal. El mecanismo focal de un terremoto genera dos posibles soluciones para el plano de ruptura que le dio origen, es por esto que en este trabajo, el plano de falla seleccionado para el sismo fue el plano que generara mayor variación de *stress* en la zona de estudio (Fig. 11). De igual manera, cabe destacar que ambos generaron resultados similares.



Por último, también se calcularon la dilatación y el desplazamiento, cuando fue posible, a partir de los eventos de interés registrados en los últimos años para los escenarios planteados.

## 6 Resultados y discusión

Los resultados de la modelación se presentan agrupados por aspectos analizados bajo los cuatro escenarios simulados. Primero se indica el estado tensional resultante, luego se muestra la variación de permeabilidad con la dilatación y los movimientos asociados. Por último, en función de estos resultados se analiza la dinámica posible de las manifestaciones hidrotermales.

A efecto de simplificar los resultados dentro de cada aspecto analizado, se presenta una tabla de resultados generales y luego se han representado gráficamente aquellos casos (emisor-receptor) que tienen mayor relevancia. El resto de resultados de casos posibles de la modelación se presentan en Anexos.

### 6.1 Estado de tensiones parciales del área (Variación parcial de *stress* de Coulomb)

#### 6.1.1 Resultados generales del Escenario 1 con emisor en el Sistema de fallas N° 1

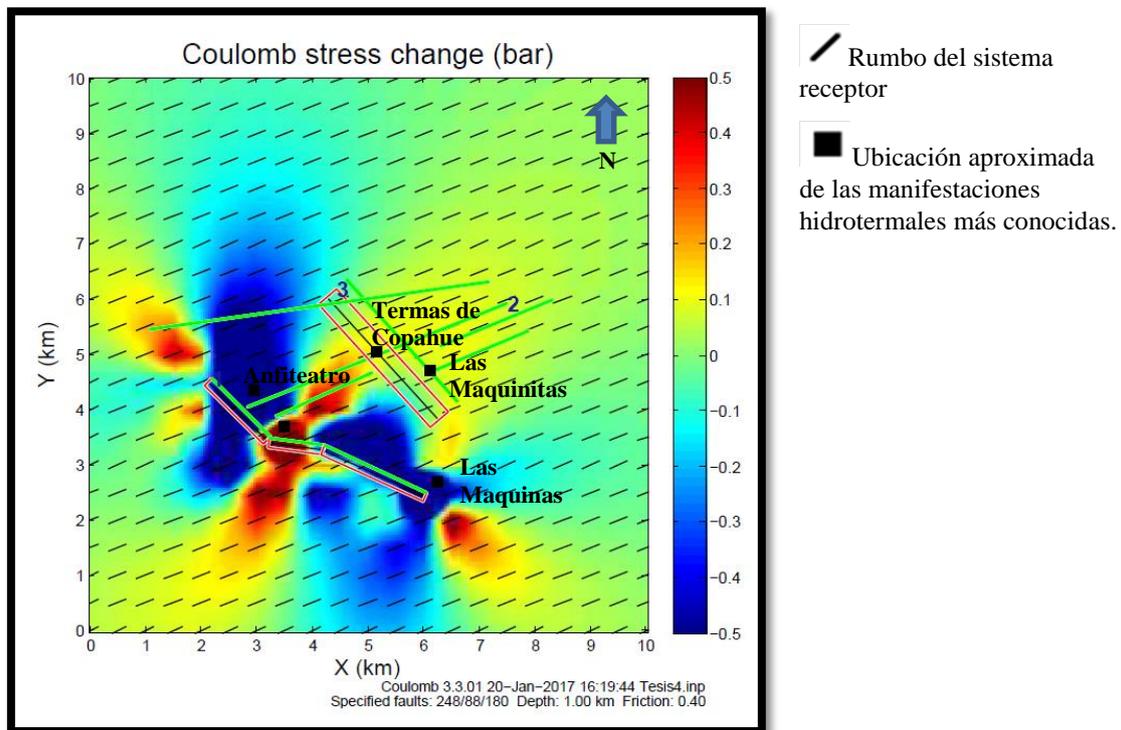
Escenario	Sistema emisor	Sistema receptor	Variación de <i>stress</i> general (+) o (-)	Rango de valores de variación de <i>stress</i> (bares)	Actividad hidrotermal (aumento o disminución)
1	1	2	(-)	-0.5 a 0.5	Incremento de actividad en Las Maquinas y Anfiteatro. Disminución de actividad en Las Maquinitas y Copahue.
		3	(+)	-0.3 a 0.5	Disminución de actividad en todas las manifestaciones hidrotermales conocidas, principalmente en Las Maquinas y Anfiteatro.
		optima normal	Simétrica	-0.5 a 0.5	Incremento de actividad en Anfiteatro. Disminución de actividad en Las Maquinas principalmente, también en Las Maquinitas y Copahue en menor medida.
		optima inversa	(+)	-0.4 a 0.4	Leve incremento de actividad en Las Maquinitas y Copahue. Disminución de actividad en Las Maquinas y Anfiteatro.

		optima de rumbo	(-)	-0.5 a 0.5	Leve incremento de actividad en Anfiteatro y Copahue. Disminución de actividad en Las Maquinas y Las Maquinitas.
--	--	-----------------	-----	------------	--

**Tabla 4:** Resultados de la variación de *stress* del escenario 1 según cada sistema receptor y la posible influencia sobre el incremento o disminución de actividad en las manifestaciones hidrotermales conocidas. (Los valores de slip son negativos cuando la falla es normal y/o sinistral y positivos cuando la falla es inversa y/o dextral).

### 6.1.2 Resultados relevantes

- Receptor en Sistema N° 2



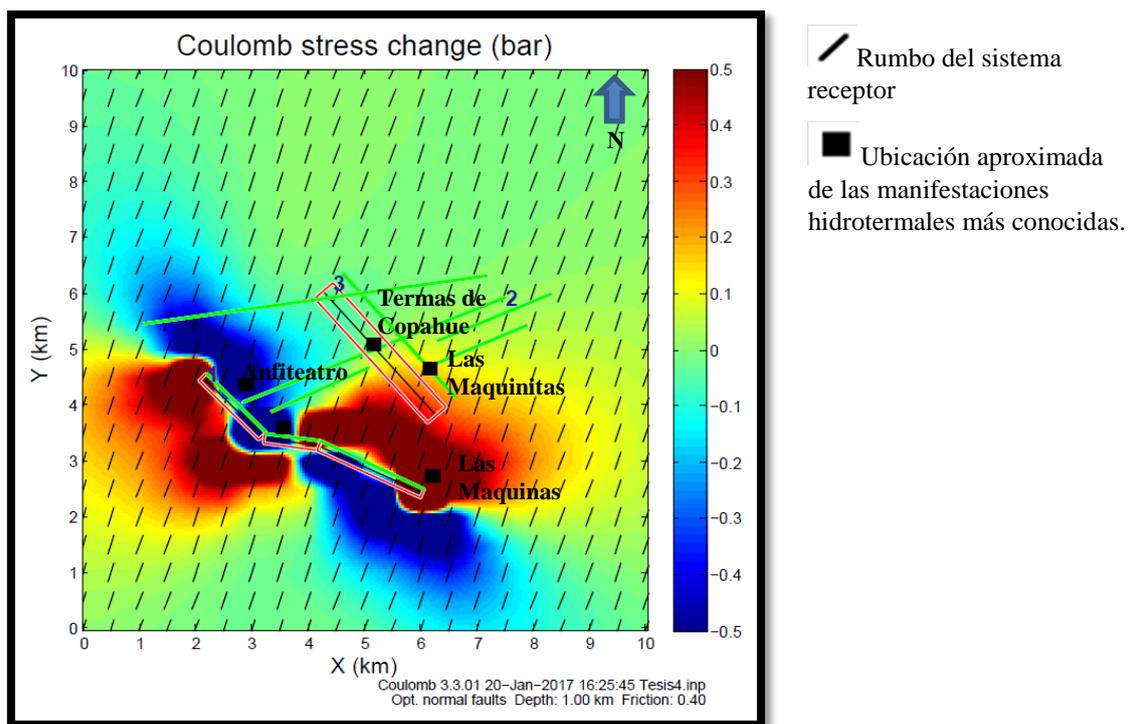
**Figura N° 12:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas con la misma orientación que el sistema de fallas N° 2 provocada por un sismo de magnitud 4 generado por el sistema de fallas N° 1.

Como se observa a la derecha del modelo, la escala de colores indica variaciones positivas y negativas del *stress* de Coulomb, lo que significa que si la variación es positiva, esa área recibió *stress* y tiene más probabilidades de generar un sismo en un futuro cercano. Por el contrario, si la variación es negativa, esa área perdió *stress* y disminuyen las probabilidades de que haya fractura de roca en un futuro cercano.

De acuerdo a los resultados se puede interpretar que el área que involucra el sistema de fallas N° 2 presenta una variación de *stress* con un rango de entre -0.5 a 0.5 bares pero es positiva en su mayor parte, lo cual indica que este conjunto de fallas y cualquier falla

que presente orientación similar ubicada en las zonas de colores rojos a amarillos y verdes tienen más probabilidades de fallar en un futuro cercano que las áreas celestes-azules que presentan variación de *stress* negativa y, por lo tanto, menos probabilidad de fallar. Si relacionamos esta situación con la actividad del sistema hidrotermal ubicado en el área, esperaríamos una menor actividad en el sistema de fallas N° 2 luego de un sismo de magnitud 4 en el sistema de fallas N° 1 debido al mayor *stress* en las estructuras, lo que dificultaría el paso de fluidos calientes particularmente en zonas de color rojo oscuro, esto significaría a su vez, un incremento de actividad hidrotermal en Las Maquinas y Anfiteatro, y una disminución de actividad hidrotermal en Las Maquinitas y Copahue.

- Receptor en fallas óptimas normales



**Figura N° 13:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas normales con orientación óptima luego de un sismo de magnitud 4 generado en el sistema de fallas N° 1.

De acuerdo a los resultados se puede interpretar que en áreas cercanas a la zona de falla en el bloque norte-noreste es posible observar cómo la variación de *stress* en el lado sureste del bloque es positiva, del orden de 0.5 bares, mientras que en el lado noroeste del bloque sucede exactamente lo contrario, del orden de -0.5 bares. En el bloque sur-suroeste de la falla sucede lo opuesto, por esto es posible sugerir que la variación de *stress* es sumamente simétrica a ambos lados del sistema. Este patrón de variación del

*stress* de coulomb es propio de fallas con componente de rumbo sinestral como es el caso del sistema de fallas N° 1. También es posible observar que el rumbo de las fallas normales consideradas óptimas no coincide con ninguno de los sistemas representados en el modelo, es decir que si existen en el área fallas normales con una orientación distinta a la óptima, percibirán una variación de *stress* menor que la que muestra este modelo. Asumiendo la existencia de fallas con esta orientación en la zona de estudio y relacionándolo con el sistema hidrotermal ubicado en el área, sería correcto esperar mayor actividad hidrotermal en el Anfiteatro y menor actividad hidrotermal en Las Máquinas principalmente, y en menor medida en Las Maquinitas y Copahue.

Los demás modelos resultados del escenario 1 se pueden encontrar en la sección Anexos de este trabajo.

### 6.1.3 Resultados generales del Escenario 2 con emisor en el Sistema de fallas N° 2

Escenario	Sistema emisor	Sistema receptor	Variación de <i>stress</i> general (+) o (-)	Rango de valores de variación de <i>stress</i> (bares)	Actividad hidrotermal (aumento o disminución)
2	2	1	(--)	-0.5 a 0.3	Incremento de actividad en Las Maquinitas, Copahue y Anfiteatro. Leve disminución de actividad en Las Maquinas.
		3	(++)	-0.1 a 0.5	Leve incremento de actividad en Las Maquinas, Las Maquinitas y Anfiteatro. Leve disminución en Copahue.
		optima normal	(+)	-0.2 a 0.15	Leve incremento de actividad en Anfiteatro. Leve disminución de actividad en Copahue, Las Maquinitas y Las Maquinas.
		optima inversa	simétrica	-0.1 a 0.15	Incremento de actividad en Las Maquinitas. Disminución de actividad en Copahue y Anfiteatro principalmente, también en Las Maquinas pero muy leve.
		optima de rumbo	(+)	-0.15 a 0.15	Disminución de actividad en todas las manifestaciones hidrotermales conocidas, principalmente en Las Maquinitas y Copahue.



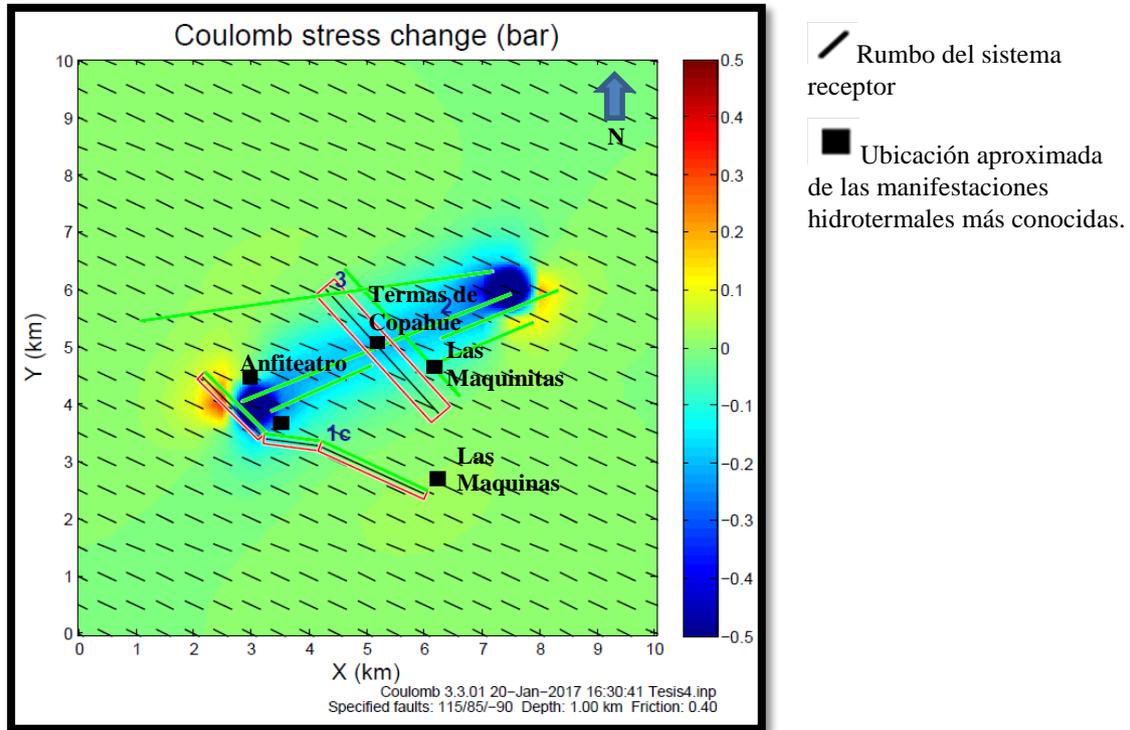
Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas.

Facultad de ingeniería - Universidad Nacional del Comahue.

**Tabla 5:** Resultados de la variación de *stress* del escenario 2 según cada sistema receptor y la posible influencia sobre el incremento o disminución de actividad en las manifestaciones hidrotermales conocidas.

### 6.1.4 Resultados relevantes

- Receptor en el Sistema N° 1

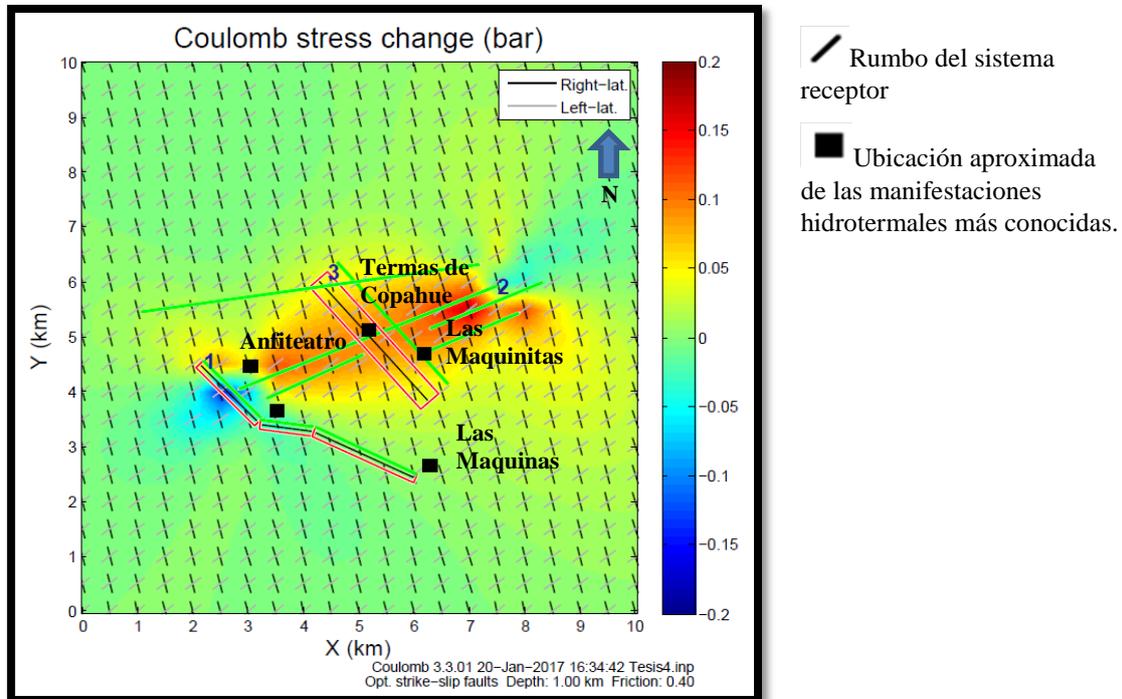


**Figura N° 14:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas con la misma orientación que el sistema de fallas N° 1 luego de un sismo generado en el sistema de fallas N° 2.

Como este sistema presenta tres orientaciones, se evaluó la variación de *stress* utilizando la orientación promedio de las 3 que presenta. De acuerdo a los resultados se puede interpretar que en áreas cercanas a la zona de falla la variación de esfuerzo es negativa del orden de los -0.5 bares en los extremos y continúa hacia el centro con menor intensidad (-0.1 bar) esto indica una menor probabilidad de ruptura para el área donde se ubica el sistema de fallas N° 1 excepto hacia el NO del mismo sistema, donde la variación de *stress* es positiva, del orden de 0.3 bares, indicando una mayor probabilidad de ruptura. Si relacionamos esta situación con la actividad del sistema hidrotermal ubicado en el área, esperaríamos una mayor actividad en el sistema de fallas N° 1 luego de un sismo de magnitud 4 en el sistema de fallas N° 2 debido al menor *stress* en las estructuras, lo que propiciaría una mayor facilidad para el paso de fluidos calientes excepto al NO del mismo sistema donde la actividad hidrotermal podría verse levemente disminuida por el aumento de *stress* en las rocas. En cuanto a las manifestaciones, se podría esperar un incremento de actividad hidrotermal en Las

Maquinitas, Copahue y Anfiteatro y una leve disminución de actividad hidrotermal en Las Maquinas.

- Receptor en fallas óptimas de rumbo



**Figura N° 15:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas de rumbo con orientación óptima luego de un sismo generado en el sistema de fallas N° 2.

De acuerdo a los resultados se puede interpretar que la variación del *stress* de Coulomb es positiva en general y leve, manteniéndose en valores entre -0.15 y 0.15 bares, siendo de mayores valores en las áreas cercanas a la zona de falla (del orden de los 0.15 bares). Solamente en los extremos de las estructuras se observa una variación negativa del *stress* de Coulomb (del orden de los -0.05 bares a -0.15 bares). En este marco y en relación a la actividad hidrotermal, se podría esperar una disminución de actividad hidrotermal en todas las manifestaciones hidrotermales conocidas, principalmente en Las Maquinitas y Copahue por un mayor aumento de *stress* en las rocas.

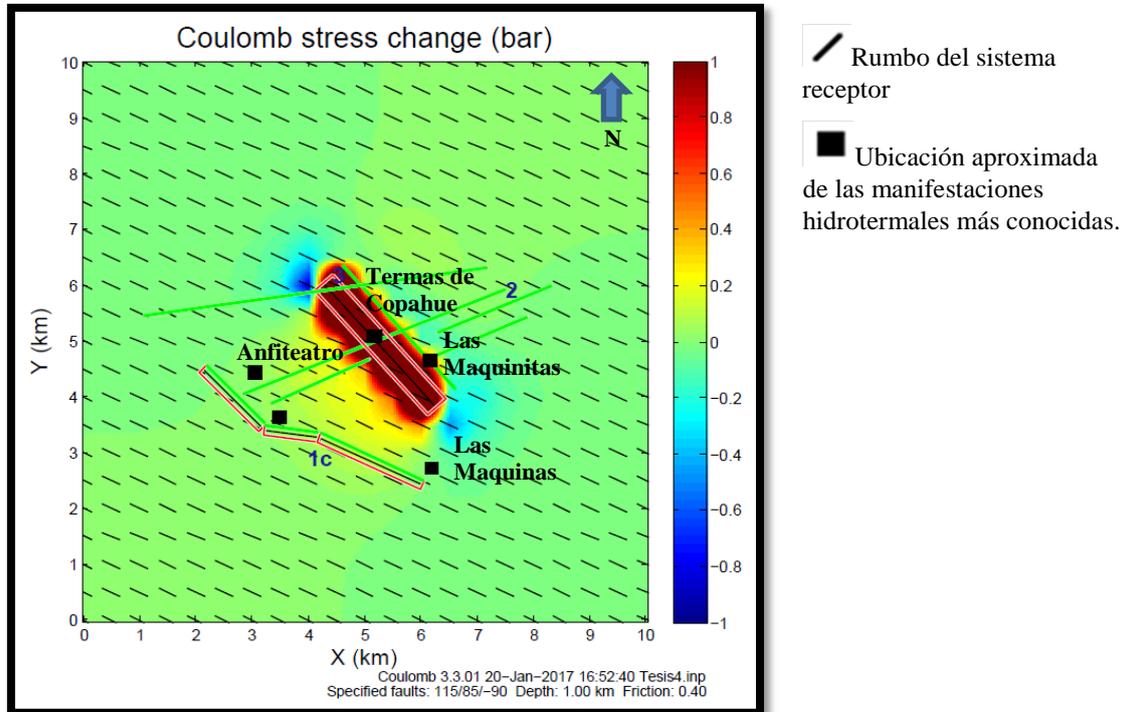
### 6.1.5 Resultados generales del Escenario 3 con emisor en el Sistema de fallas N° 3

Escenario	Sistema emisor	Sistema receptor	Variación de <i>stress</i> general (+) o (-)	Rango de valores de variación de <i>stress</i> (bares)	Actividad hidrotermal (aumento o disminución)
3	3	1	(+++)	-0.8 a 1	Leve incremento de actividad en Las Maquinas. Marcada disminución de actividad en Las Maquinitas y Copahue. Sin variaciones en el Anfiteatro.
		2	(+++)	-0.5 a 0.5	Leve disminución de actividad en Las Maquinas. Marcada disminución de actividad en Las Maquinitas y Copahue. Sin variaciones en el Anfiteatro.
		optima normal	(+++)	-0.3 a 0.5	Leve disminución de actividad en Anfiteatro. Marcada disminución de actividad en Las Maquinitas y Copahue. Sin variaciones en Las Maquinas.
		optima inversa	(---)	-0.5 a 0.5	Marcado incremento de actividad en Las Maquinitas y Copahue. Leve incremento de actividad en Anfiteatro. Sin variaciones en Las Maquinas.
		optima de rumbo	(+)	-0.4 a 0.5	Leve incremento de actividad en Copahue. Leve disminución de actividad en Las Maquinitas y Copahue. Sin variaciones en Las Maquinas.

**Tabla 6:** Resultados de la variación de *stress* del escenario 2 según cada sistema receptor y la posible influencia sobre el incremento o disminución de actividad en las manifestaciones hidrotermales conocidas.

### 6.1.6 Resultados relevantes

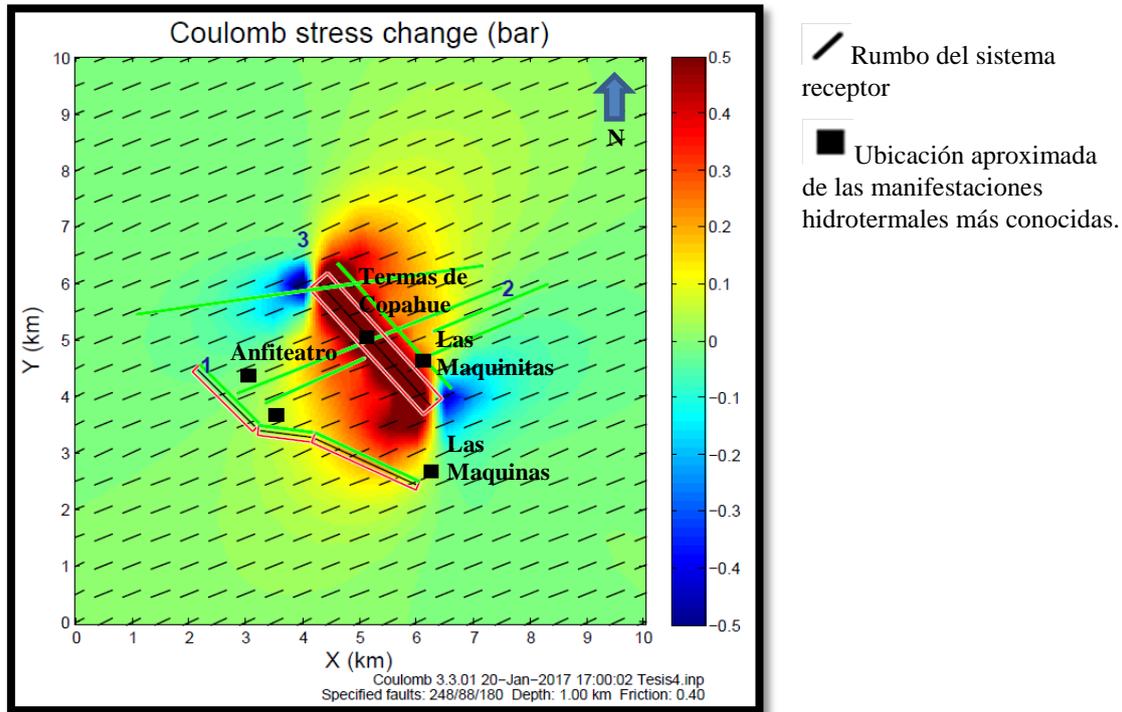
- Receptor en el Sistema N° 1



**Figura N° 16:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas con la misma orientación que el sistema de fallas N° 1 luego de un sismo generado en el sistema de fallas N° 3.

Como este sistema presenta tres orientaciones, se evaluó la variación de *stress* utilizando la orientación promedio de las 3 que presenta. De acuerdo a los resultados se puede observar que la variación de *stress* es en general positiva, particularmente del orden de 1 bar en toda el área de la zona de falla, disminuyendo hacia valores de 0.2-0.1 bar hacia el suroeste. En los extremos sureste y noroeste del sistema activo la variación de *stress* es negativa, de entre -0.8 a -0.2 bares. Si relacionamos estos valores con la actividad hidrotermal, es posible esperar un leve incremento de actividad o nulo en la manifestación Las Máquinas y una marcada disminución de actividad en Las Maquinitas y Copahue principalmente, y en Anfiteatro en menor medida.

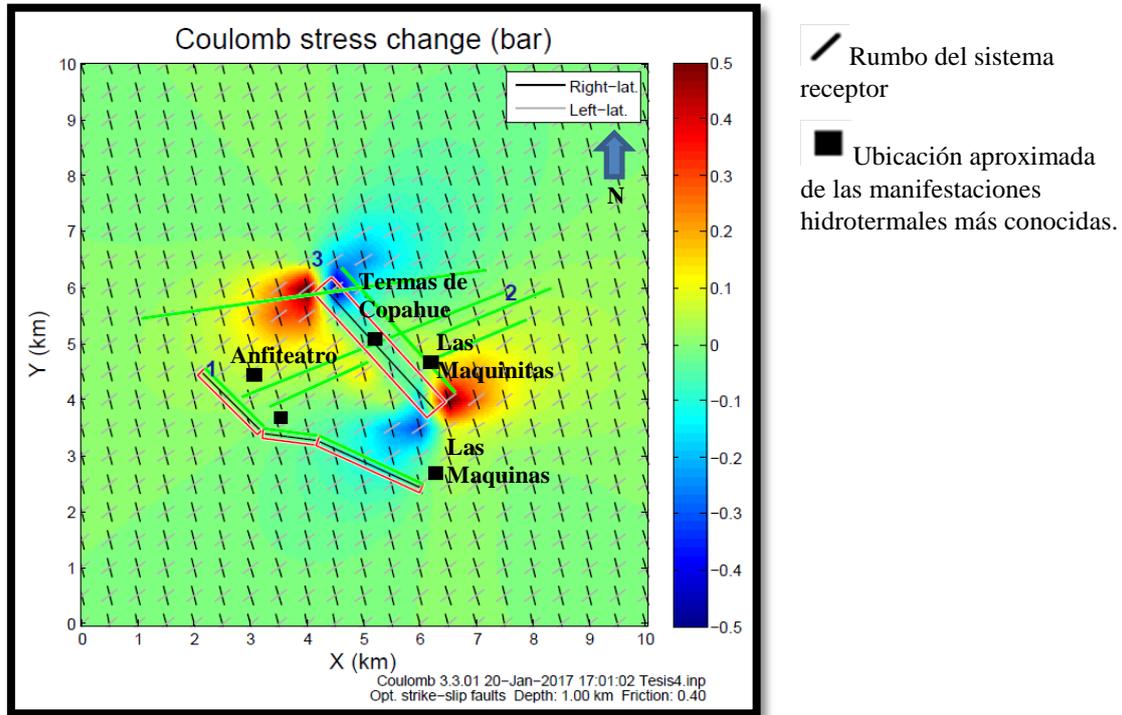
- Receptor en el Sistema N° 2



**Figura N° 17:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas con la misma orientación que el sistema de fallas N° 2 luego de un sismo luego de un sismo generado en el sistema de fallas N° 3.

De acuerdo a los resultados se puede observar que la variación de *stress* es en general positiva, del orden de entre 0.5 en la zona de falla y disminuye hasta 0.1 bares hacia el norte y sur respectivamente. En los extremos noroeste y sureste de la estructura activa, la variación de *stress* es negativa, del orden de -0.4 a -0.1 bares. Si relacionamos estos valores con la actividad hidrotermal, es posible esperar un leve a nulo incremento de actividad en Anfiteatro y una marcada disminución en Las Maquinitas y Copahue principalmente, también en Las Máquinas pero en menor medida.

- Receptor en fallas óptimas de rumbo.



**Figura N° 18:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas de rumbo con orientación óptima luego de un sismo generado en el sistema de fallas N° 3.

De acuerdo a los resultados se puede observar que la variación de *stress* es, en general, sumamente simétrica, típica para fallas sin componente de rumbo. Si bien en la zona de falla la variación de *stress* es negativa, hacia los extremos se puede observar negativa hacia un lado y positiva hacia el otro, sucediendo exactamente lo contrario en el extremo opuesto. Si relacionamos esta información con la actividad hidrotermal, es posible esperar un leve incremento de actividad en Copahue y tal vez en Las Máquinas, y una disminución de actividad en Las Maquinitas y en Anfiteatro.

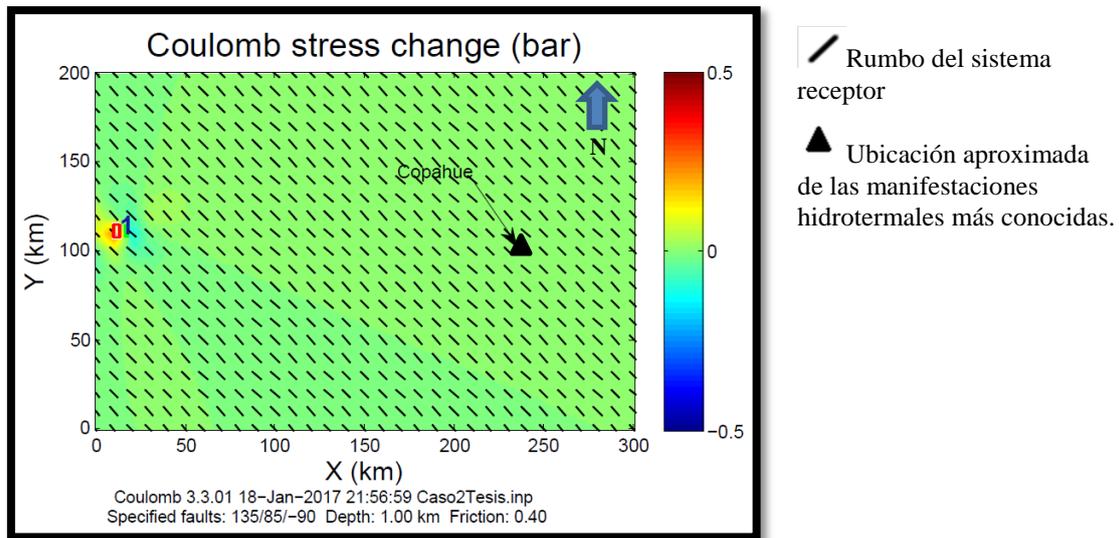
### 6.1.7 Resultados generales del Escenario 4 con emisor en terremoto sucedido en la costa chilena.

Escenario	Sistema emisor	Sistema receptor	Variación de <i>stress</i> general (+) o (-)	Rango de valores de variación de <i>stress</i> (bares)	Actividad hidrotermal (aumento o disminución)
4	Terremoto en Chile (Mw5.7)	1	(+)	-0.1 a 0.1	Leve a nula disminución de la actividad en el área de estudio.
		2	(-)	-0.1 a 0.1	Leve a nulo incremento de actividad en el área de estudio.
		3	(-)	-0.1 a 0.1	Leve a nulo incremento de actividad en el área de estudio.

**Tabla 7:** Resultados de la variación de *stress* del escenario 2 según cada sistema receptor y la posible influencia sobre el incremento o disminución de actividad en las manifestaciones hidrotermales conocidas.

### 6.1.8 Resultados relevantes

- Receptor en Sistema N° 1.



**Figura N° 19:** Variación de *stress* para fallas con la misma orientación que el sistema 1 generada por el sismo de 5.7Mw en la costa de Chile.

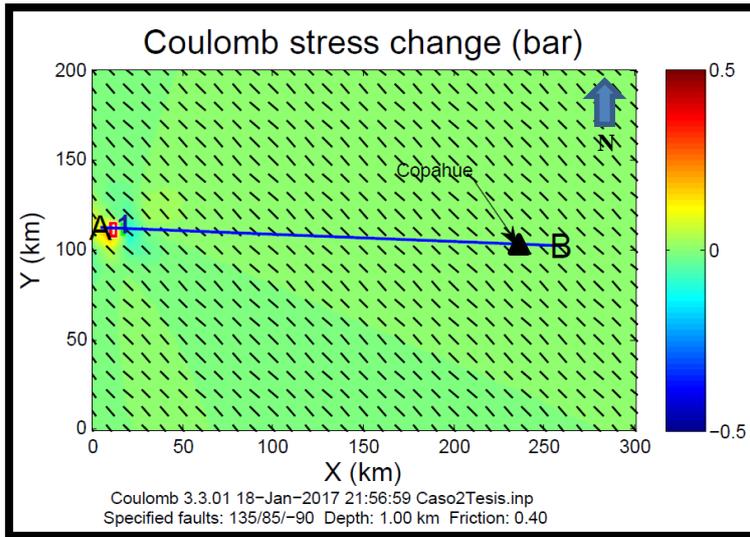


Figura N° 20: Línea A-B para obtener la sección A-B.

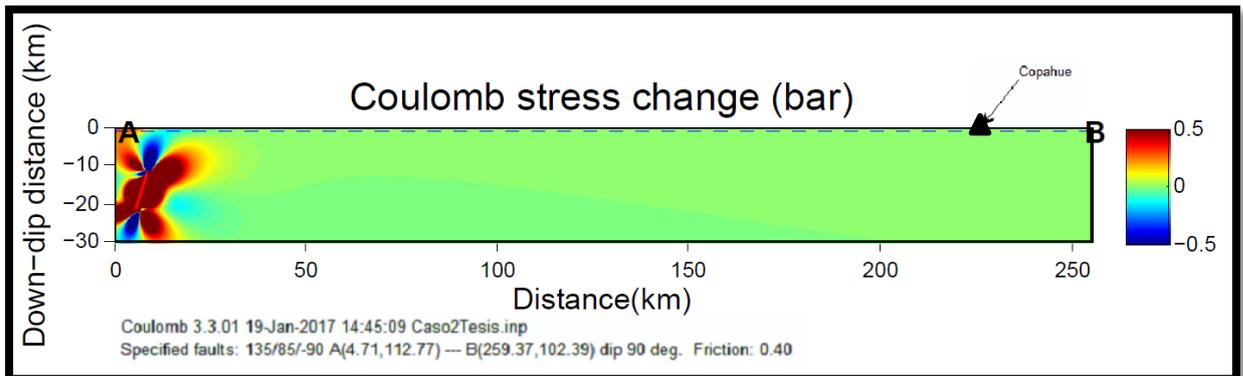
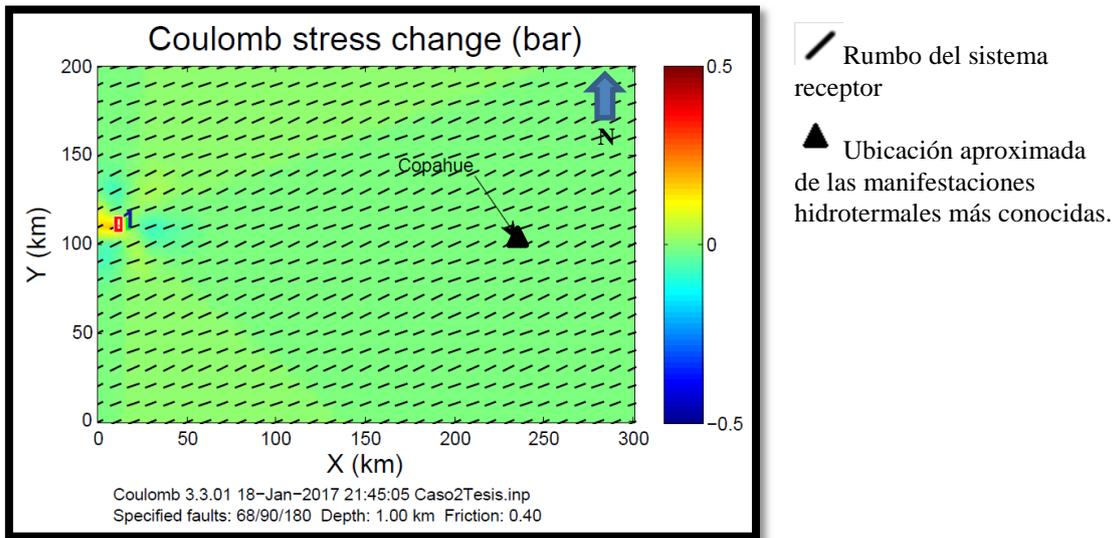


Figura N° 21: Sección A-B de la Fig N° 19.

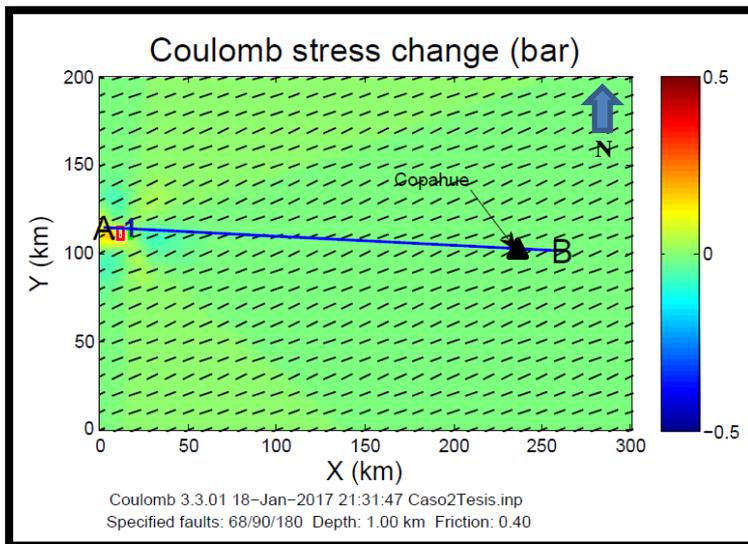
De acuerdo a los resultados se puede interpretar que la variación de *stress* es positiva para la ubicación de la zona de estudio, del orden de 0.05 a 0.1 bares, es decir que, en rasgos generales, es mayor la probabilidad de futura activación de estructuras con la misma orientación que el sistema N° 1. En relación al sistema hidrotermal, es posible esperar una menor actividad en la zona de estudio, también para estructuras con la misma orientación que el sistema N° 1.

La sección A-B del modelo permite observar la variación de *stress* generada por un sismo de magnitud 5.7 ubicado a menos de 250km de la zona de estudio, la cual no es significativa en lo que respecta a variación de *stress*.

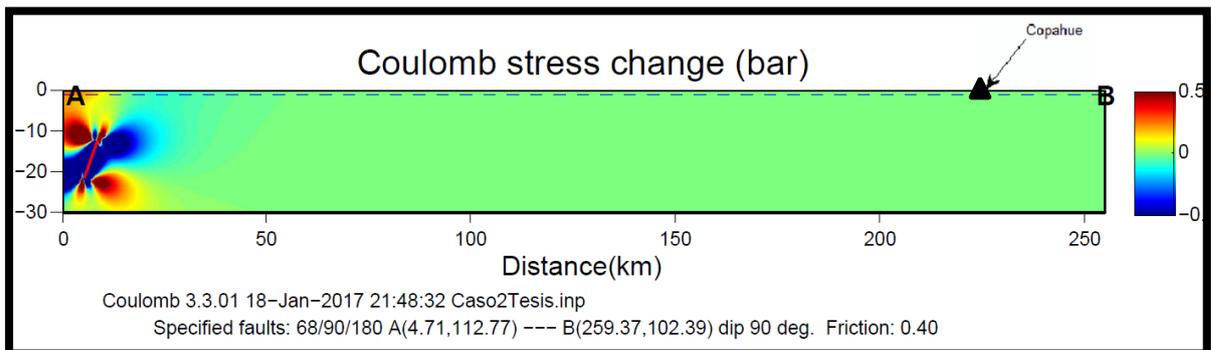
- Receptor en Sistema N° 2.



**Figura N° 22:** Variación de *stress* para fallas con la misma orientación que el sistema N° 2 generada por el sismo de 5.7Mw en la costa de Chile.



**Figura N° 23:** Línea A-B para obtener la sección A-B.



**Figura N° 24:** Sección A-B de la Fig N° 22.

De acuerdo a los resultados se puede observar que la variación de *stress* es negativa para la ubicación de la zona de estudio, del orden de -0.05 bares, es decir que, en rasgos generales, es menor la probabilidad de futura activación de estructuras con la misma orientación que el sistema 2. En relación al sistema hidrotermal, es posible esperar una mayor actividad en la zona de estudio, también para estructuras con la misma orientación que el sistema 2.

La sección A-B del modelo permite observar la variación de *stress* generada por un sismo de magnitud 5.7 ubicado a menos de 250km de la zona de estudio, la cual no es significativa en lo que respecta a variación de *stress*.

## 6.2 Estimación de la variación de la permeabilidad con la dilatación

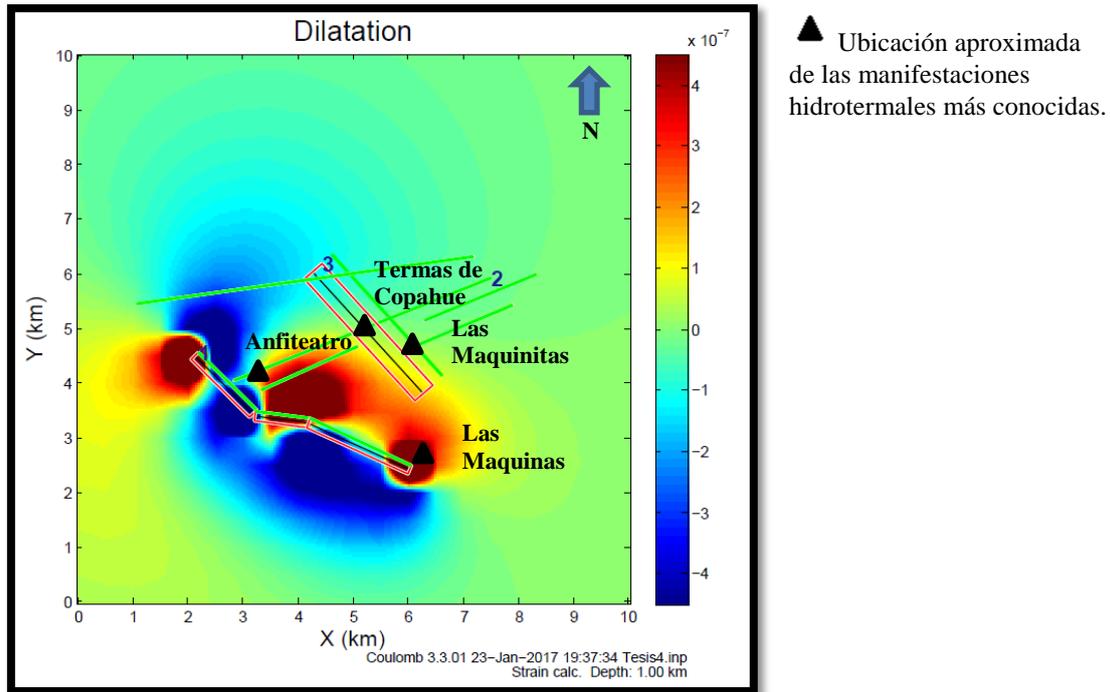
El cálculo de la dilatación es de utilidad a la hora de relacionar la dinámica de las estructuras con la permeabilidad de las mismas, algo que se traduce en el aumento o disminución de la actividad hidrotermal en el lugar. Particularmente, esta relación sirve para variaciones de *stress* de pequeña magnitud donde la dilatación o contracción de las fracturas afecta significativamente a la permeabilidad de la roca sin involucrar nuevos episodios de fracturamiento de la misma. Por el contrario, para grandes valores de variación de *stress*, es posible hablar de alta probabilidad de fracturas nuevas en la roca y, por lo tanto, generación de nuevos valores de permeabilidad para la estructura en cuestión.

Los cálculos de dilatación se realizaron para los escenarios locales, es decir, los escenarios 1, 2 y 3 y los valores de dilatación son adimensionales, habiendo dilatación cuando los valores son positivos.

### 6.2.1 Resultados generales del Escenario 1 con emisor en el Sistema N° 1

Escenario	Sistema emisor		Dilatación general (+) o (-)	Rango de valores de dilatación (metros)	Actividad hidrotermal (aumento o disminución)
1	1	1	(-)	-4 a $4 \times 10^{-7}$	Incremento de actividad en Las Maquinas principalmente y en menor medida en Las Maquinitas y Copahue. Disminución leve de la actividad en Anfiteatro.

**Tabla 8:** Observar que el resultado de este cálculo es la dilatación de la misma estructura que presenta el fallamiento, es decir que no involucra otros sistemas con distintas orientaciones.



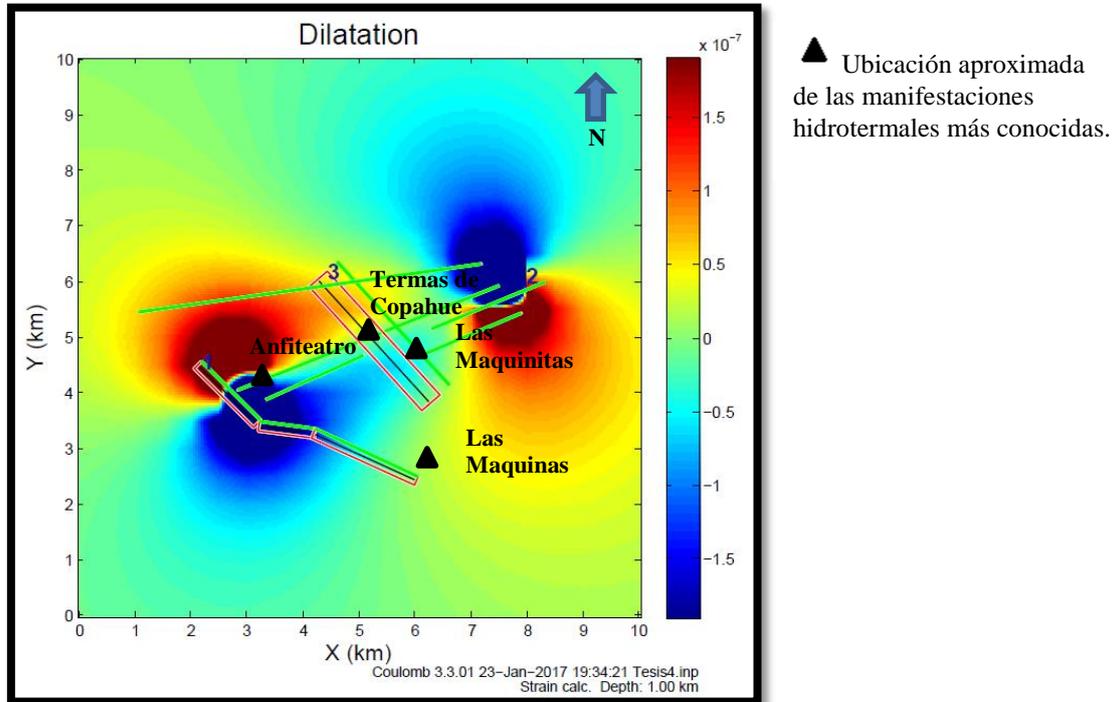
**Figura N° 25:** Dilatación generada por el sistema de fallas N° 1 luego de un sismo de magnitud 4

De acuerdo a los resultados se puede notar que en general la dilatación es positiva hacia el área de manifestaciones hidrotermales, del orden de entre  $4 \times 10^{-7}$  y  $0.5 \times 10^{-7}$  unidades desde la zona de falla hacia el NE. Relacionando esta información con el sistema hidrotermal, el aumento de actividad es generalizado, es decir que es posible esperar mayor actividad en Las Máquinas principalmente y en Las Maquinitas y Copahue en menor medida. En Anfiteatro es posible más bien una leve disminución de la actividad hidrotermal.

### 6.2.2 Resultados generales del Escenario 2 con emisor en el Sistema N° 2

Escenario	Sistema emisor		Dilatación general (+) o (-)	Rango de valores de dilatación (metros)	Actividad hidrotermal (aumento o disminución)
2	2	2	simétrica	$-2$ a $2 \times 10^{-7}$	Incremento de actividad en Anfiteatro. Disminución de actividad en Las Maquinitas. Sin variación en Copahue y en Las Maquinas.

**Tabla 9:** Observar que el resultado de este cálculo es la dilatación de la misma estructura que presenta el fallamiento, es decir que no involucra otros sistemas con distintas orientaciones.



**Figura N° 26:** Dilatación generada por el sistema de fallas N° 2 luego de un sismo de magnitud 4

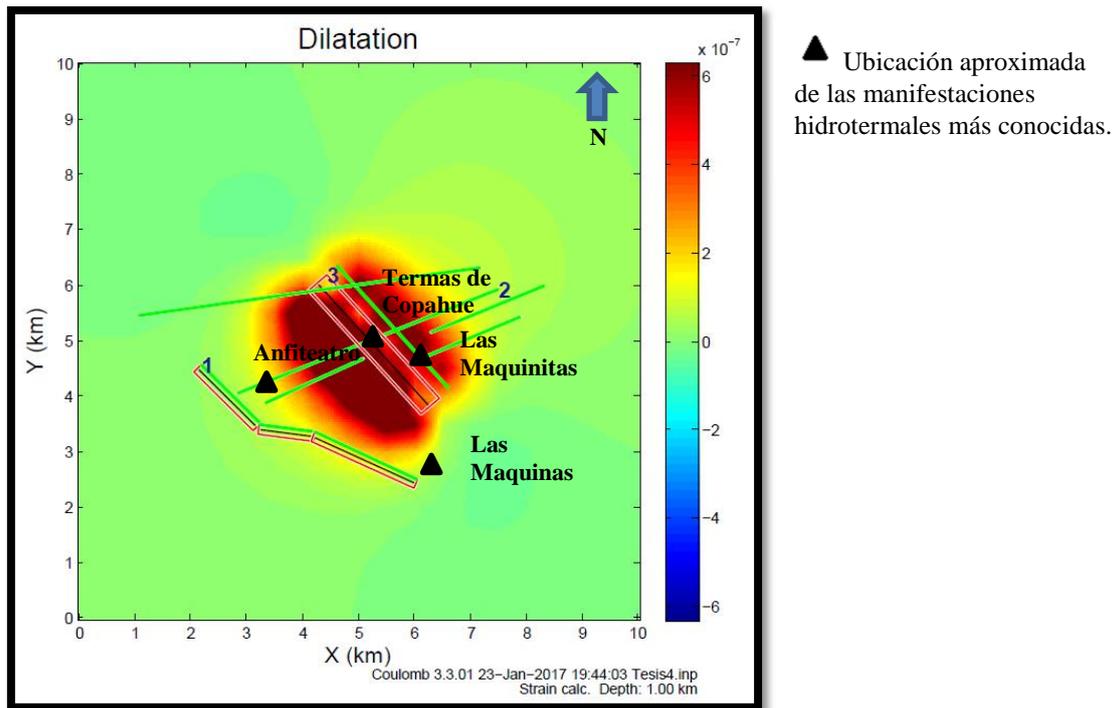
De acuerdo a los resultados se puede interpretar que, en general, la dilatación es simétrica hacia ambos lados de la zona de falla y particularmente toma valores negativos mayormente en lo que respecta al área de las manifestaciones hidrotermales, del orden de entre  $-0.5 \times 10^{-7}$  y  $-1.5 \times 10^{-7}$  unidades, es decir que es posible esperar una disminución de actividad para todas las manifestaciones menos tal vez para Copahue y Las Máquinas, que se encuentran en el límite con áreas que si presentaron dilatación aunque en valores pequeños.

### 6.2.3 Resultados generales del Escenario 3 con emisor en el Sistema N° 3

Escenario	Sistema emisor		Dilatación general (+) o (-)	Rango de valores de dilatación (metros)	Actividad hidrotermal (aumento o disminución)
3	3	3	(+)	-1 a $6 \times 10^{-7}$	Incremento de actividad principalmente en Las Maquinitas y Copahue. También en Anfiteatro pero en menor medida. Leve disminución de

					actividad en Las Maquinas.
--	--	--	--	--	----------------------------

**Tabla 10:** Observar que el resultado de este cálculo es la dilatación de la misma estructura que presenta el fallamiento, es decir que no involucra otros sistemas con distintas orientaciones.



**Figura N° 27:** Dilatación generada por el sistema de fallas N°3 luego de un sismo de magnitud 4.

De acuerdo a los resultados se puede interpretar que, en general, predomina la dilatación en toda el área que involucra las manifestaciones hidrotermales conocidas, siendo sumamente positiva, del orden de  $6 \times 10^{-7}$  unidades predominantemente. En relación a la actividad hidrotermal, es posible esperar que aumente en Las Maquinitas y Copahue principalmente, también en Anfiteatro y Las Máquinas pero en menor medida.

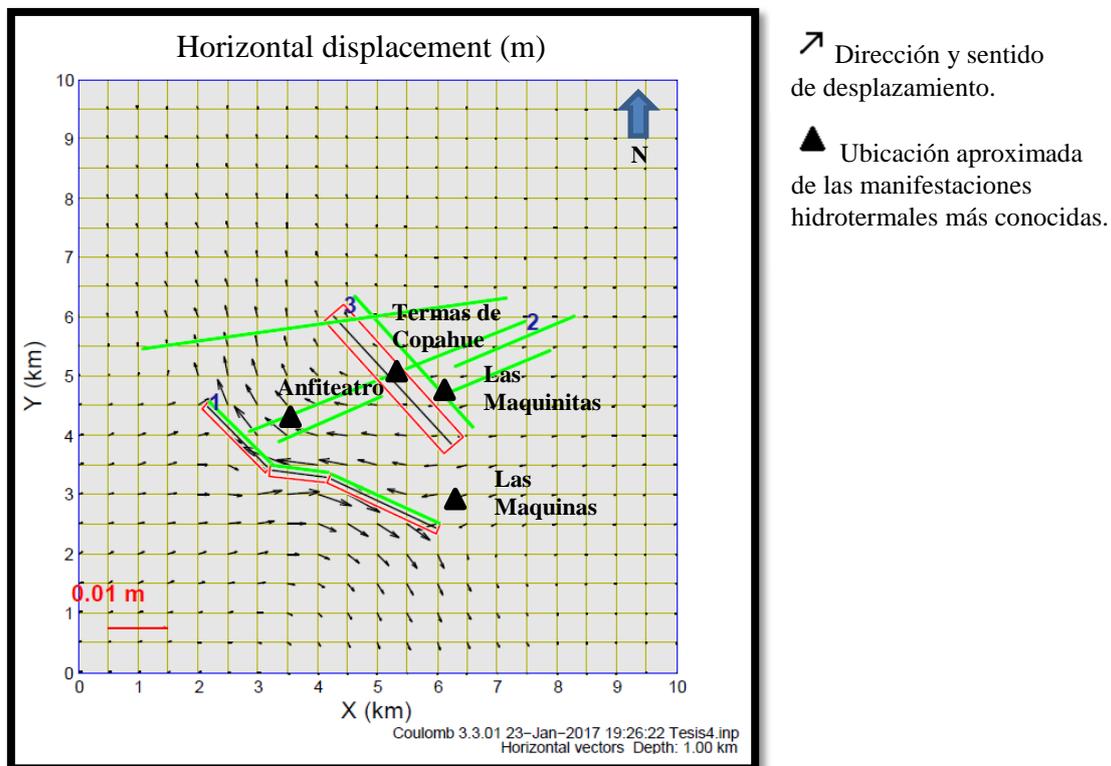
### 6.3 Caracterización de los desplazamientos asociados a los sistemas de fallas

El cálculo del desplazamiento muestra la cantidad de metros de roca desplazados a la profundidad de cálculo seleccionada, en este caso 1km, y su dirección y sentido acorde a la dinámica del sistema que presentó el *slip*. Para los escenarios 1, 2 y 3 se mostrarán los modelos de desplazamiento horizontal y vertical.

Estos resultados se muestran a modo de complemento para los cálculos realizados anteriormente, además de ser útiles para mostrar más herramientas del software Coulomb 3.3 que pueden servir para entender la dinámica de las estructuras, pero no aportan información significativa en cuanto a cambios en la actividad hidrotermal de la zona.

### 6.3.1 Horizontal

- Resultados generales del Escenario 1 con emisor en el Sistema N° 1



**Figura N° 28:** Desplazamiento horizontal generado por el sistema de fallas N° 1 luego de un sismo de magnitud 4.

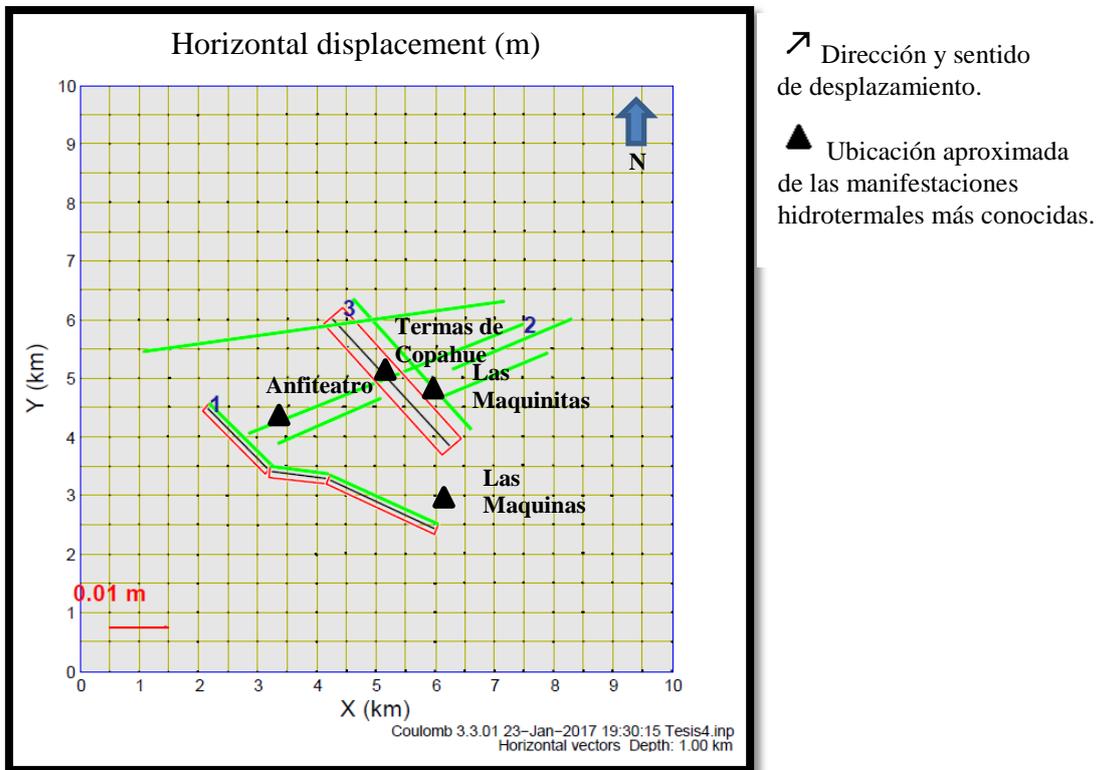
De acuerdo a los resultados se puede interpretar que, como es de esperar para una falla con componente de rumbo sinistral (siempre siguiendo la regla de la mano derecha y tomando el número de la falla como el punto de inicio de la estructura), el desplazamiento de roca es en la dirección que muestran las flechas de la figura, siendo mayor el desplazamiento cuanto más larga es la flecha. La línea roja en el margen izquierdo inferior del modelo muestra la escala de referencia en metros para la cantidad de desplazamiento. Esto significa que el máximo desplazamiento horizontal de roca sucede en el centro de la estructura y en la zona más cercana al plano de falla, con



Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas.  
Facultad de ingeniería - Universidad Nacional del Comahue.

valores de poco más de medio centímetro. Para el resto del área afectada, los valores son cada vez menores llegando a 0 un par de kilómetros a la redonda.

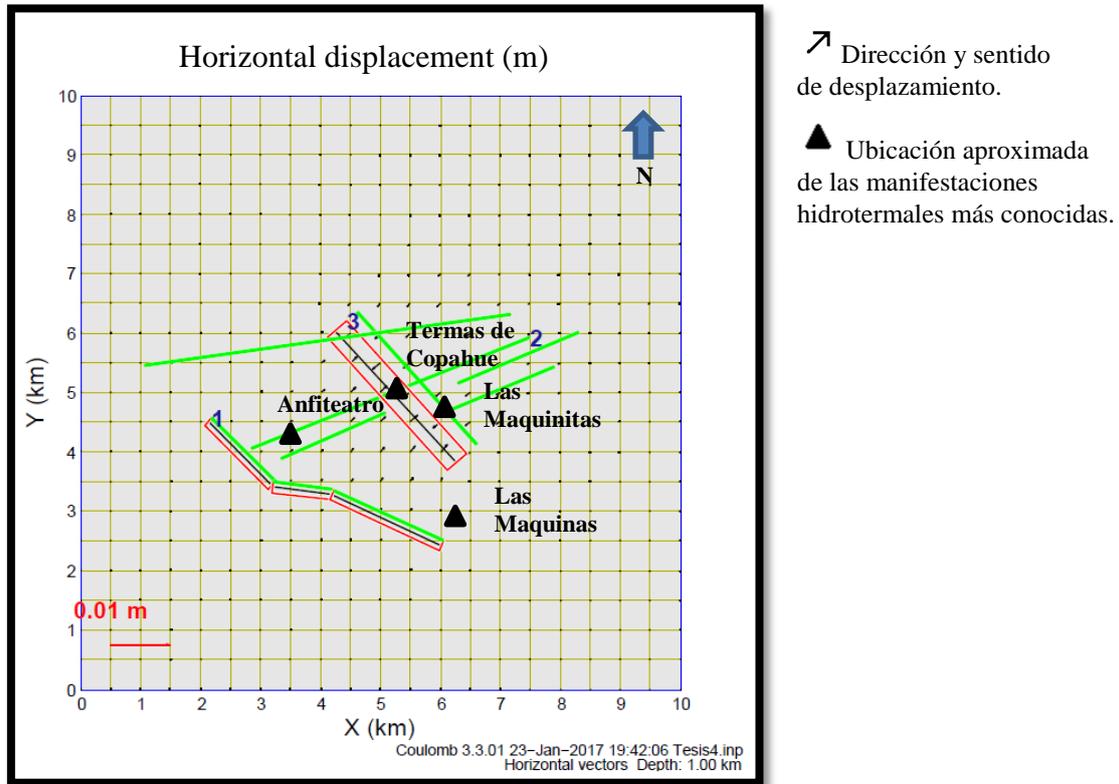
- Resultados generales del Escenario 2 con emisor en el Sistema N° 2



**Figura N° 29:** Desplazamiento horizontal generado por el sistema de fallas N° 2 luego de un sismo de magnitud 4.

De acuerdo a los resultados se puede interpretar que el desplazamiento de roca que genera un sismo de magnitud 4 en el sistema N° 2 no genera prácticamente desplazamiento horizontal de roca, siendo ya mínimo en la zona de falla. Esto probablemente tenga que ver con la longitud del sistema que es bastante mayor a la del sistema N° 1 además de presentar menor componente de rumbo.

- Resultados generales del Escenario 3 con emisor en el Sistema N° 3.

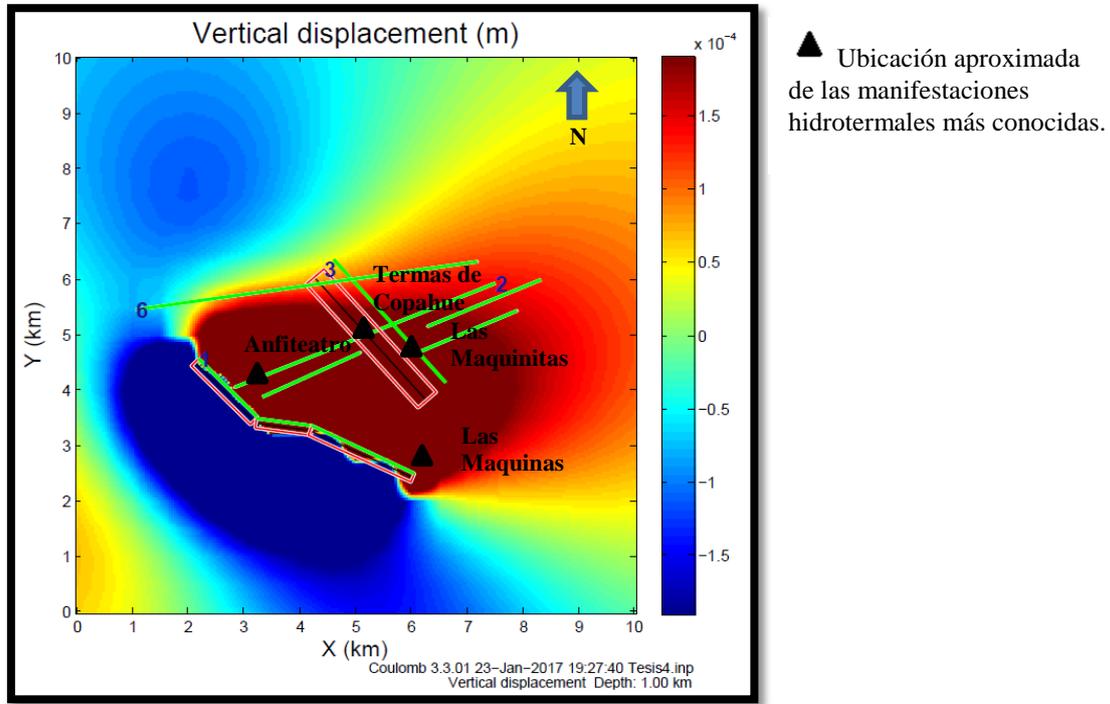


**Figura N° 30:** Desplazamiento horizontal generado por el sistema de fallas N° 3 luego de un sismo de magnitud 4.

De acuerdo a los resultados se puede interpretar que el desplazamiento horizontal de roca es propio de una falla que no presenta componente de rumbo, por lo tanto la dirección y sentido del desplazamiento son opuestos a ambos lados del plano de ruptura. El mayor desplazamiento sucede en el área más cercana al plano de falla y es de poco más que un milímetro.

### 6.3.2 Vertical

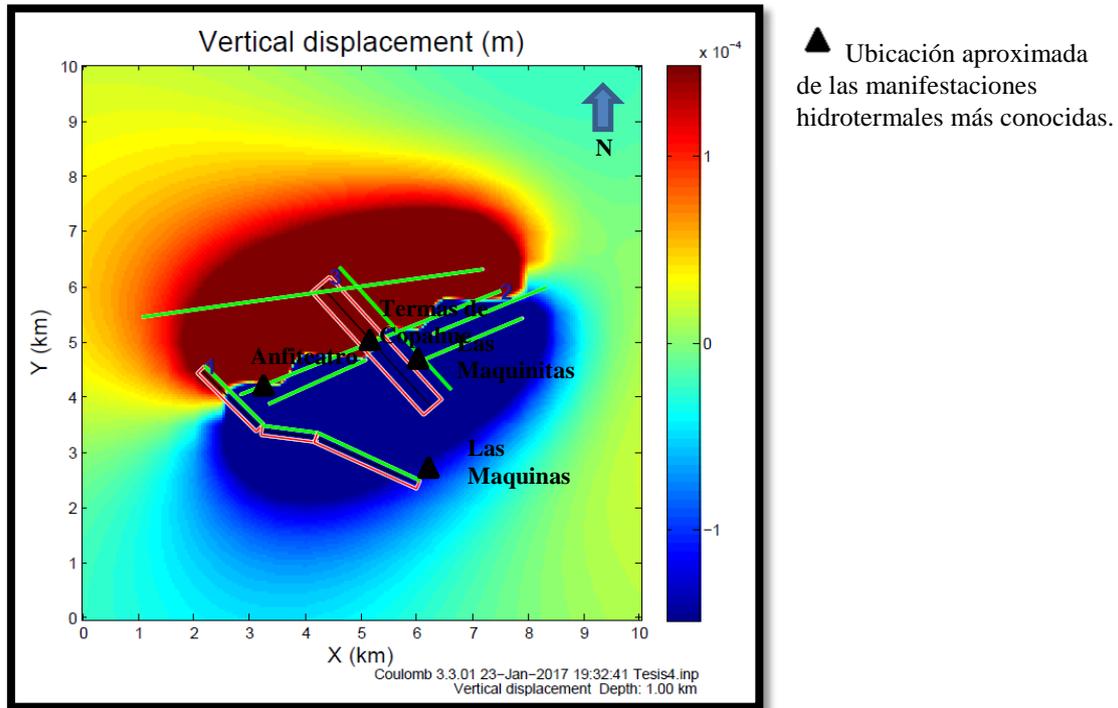
- Resultados generales del Escenario 1 con emisor en el Sistema N° 1.



**Figura N° 31:** Desplazamiento vertical generado por el sistema de fallas N° 1 luego de un sismo de magnitud 4.

El desplazamiento vertical es mostrado en metros utilizando escala de colores para indicar la elevación del bloque (valores positivos) o el descenso o caída del mismo (valores negativos). De acuerdo a los resultados se puede interpretar que, como es de esperarse para una falla normal, el bloque NE o superior es el que se eleva ( $2 \times 10^{-4}$ mts), elevando prácticamente toda el área de estudio, y el bloque SW o inferior es el que cae ( $-2 \times 10^{-4}$ mts).

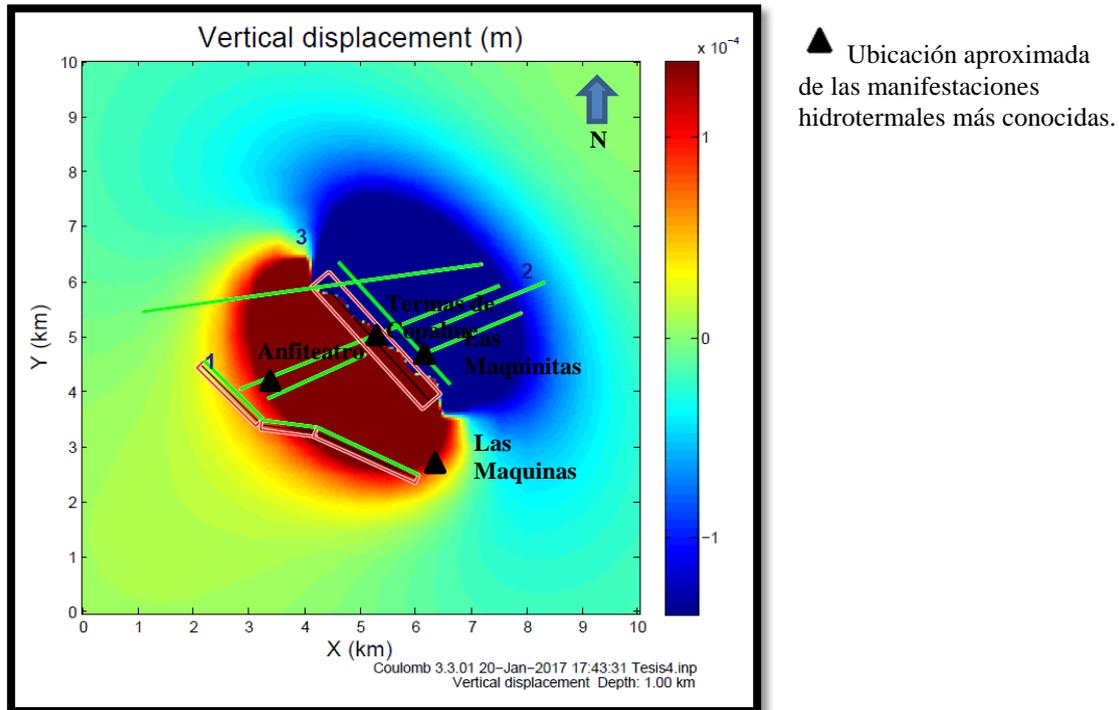
- Resultados generales del Escenario 2 con emisor en el Sistema N° 2



**Figura N° 32:** Desplazamiento vertical generado por el sistema de fallas N°2 luego de un sismo de magnitud 4.

De acuerdo a los resultados se puede interpretar que, para una falla inversa con buzamiento prácticamente vertical, el bloque NW es el que se eleva ( $2 \times 10^{-4}$ mts) y el bloque SE es el que cae ( $-2 \times 10^{-4}$ mts). El bloque bajo es el que incluye todas las manifestaciones hidrotermales conocidas.

- Resultados generales del Escenario 3 con emisor en el Sistema N° 3



**Figura N° 33:** Desplazamiento vertical generado por el sistema de fallas N° 3 luego de un sismo de magnitud 4.

De acuerdo a los resultados se puede interpretar que, para una falla inversa, el bloque SW es el que se eleva con un máximo desplazamiento de  $2 \times 10^{-4}$  mts sobre el bloque NE que es el que cae con un máximo desplazamiento de  $-2 \times 10^{-4}$  mts.

#### 6.4 Posible dinámica de las manifestaciones hidrotermales en relación al funcionamiento estimado de los sistemas de falla

##### 6.4.1 Las Máquinas

La actividad de esta manifestación hidrotermal se observa principalmente afectada por valores negativos ante la mayoría de los escenarios modelados con Coulomb 3.3, es decir que la actividad en el área disminuiría para la mayoría de los casos. En lo que respecta la variación de *stress* de Coulomb, solamente el escenario 1 con el sistema N° 2 como receptor, el escenario 2 con el sistema N° 3 como receptor, el escenario 3 con el sistema N° 1 como receptor y el escenario 4 con los sistemas N° 2 y 3 como receptores generarían un incremento de actividad en este sector. Por otro lado, respecto a la dilatación, solo la generada por el sistema N° 1 en el escenario 1 propiciaría mayor actividad hidrotermal.



En cuanto a la disminución de actividad hidrotermal en esta área, sería muy leve y solo generada por la variación de *stress* en el escenario 1 con el sistema N° 3, fallas óptimas normales, inversas y de rumbo como receptores, el escenario 2 con el sistema N° 1 y fallas óptimas normales, inversas y de rumbo como receptores, el escenario 3 con el sistema N° 2 como receptor y el escenario 4 con el sistema N° 1 como receptor. Por último, solo el escenario 3 dio valores de dilatación levemente negativos para esta área.

#### 6.4.2 Las Maquinitas

La actividad hidrotermal en esta área se ve afectada por valores tanto positivos como negativos ante los escenarios modelados con Coulomb 3.3. En lo que respecta a la variación de *stress* de Coulomb, los escenarios 1, 2 y 3 con las fallas óptimas inversas como receptoras, el escenario 2 con los sistemas N°1 y 3 como receptores y el escenario 4 con los sistemas N° 2 y 3 como receptores generarían un incremento de actividad en este sector. Por otro lado, respecto a la dilatación, solo la generada por el sistema N° 3 en el escenario 3 propiciaría mayor actividad hidrotermal.

En cuanto a la disminución de actividad hidrotermal en esta área, sería y solo generada por la variación de *stress* en los escenarios 1, 2 y 3 con las fallas óptimas normales y de rumbo como receptoras, el escenario 1 con los sistemas N° 2 y 3 como receptores, el escenario 3 con el sistema N° 2 como receptor y el escenario 4 con el sistema N° 1 como receptor. Por último, solo el escenario 2 dio valores de dilatación levemente negativos para esta área.

#### 6.4.3 Termas de Copahue

Termas de Copahue es la manifestación hidrotermal con mayor área de las mencionadas en este trabajo y su actividad es notablemente elevada. Respecto a los modelos realizados con Coulomb 3.3, particularmente la variación de *stress* de Coulomb, los escenarios 1 y 3 con las fallas óptimas inversas (marcado) y de rumbo (leve) como receptoras, el escenario 2 con el sistema N° 1 como receptor y el escenario 4 con los sistemas N° 2 y 3 como receptores generarían un incremento de actividad en este sector. Por otro lado, respecto a la dilatación, solo la generada por el sistema N°3 en el escenario 3 propiciaría mayor actividad hidrotermal.

En cuanto a la disminución de actividad hidrotermal en esta área, sería solo generada por la variación de *stress* en el escenario 1 con los sistemas N° 2 y 3 y fallas óptimas



normales como receptores, el escenario 2 con el sistema N° 3 y fallas óptimas normales, inversas y de rumbo como receptores, el escenario 3 con los sistemas N° 1 y 2, fallas óptimas normales y de rumbo como receptores y el escenario 4 con el sistema N° 1 como receptor. Por último, el escenario 2 dio valor 0 de dilatación para esta área.

#### 6.4.4 Anfiteatro

La actividad hidrotermal en esta área se ve afectada por valores mayormente positivos ante los escenarios modelados con Coulomb 3.3. En lo que respecta a la variación de *stress* de Coulomb, el escenario 1 con el sistema N° 2 y fallas óptimas normales y de rumbo como receptores, el escenario 2 con los sistemas N° 1 y 3 y fallas óptimas normales como receptores, el escenario 3 con fallas óptimas inversas como receptoras y el escenario 4 con los sistemas N° 2 y 3 como receptores generarían un incremento de actividad en este sector. Por otro lado, respecto a la dilatación, solo la generada por los sistemas N° 2 y 3 en los escenarios 2 y 3 respectivamente, propiciarían mayor actividad hidrotermal.

En cuanto a la disminución de actividad hidrotermal en esta área, sería solo generada por la variación de *stress* en el escenario 1 con el sistema N° 3 y fallas óptimas inversas como receptores, el escenario 2 con fallas óptimas inversas y de rumbo como receptoras, el escenario 3 con fallas óptimas normales como receptoras y el escenario 4 con el sistema N° 1 como receptor. Por último, el escenario 2 dio valor 0 de dilatación para esta área.

## 7 Conclusiones y recomendaciones

El área de estudio se encuentra fuertemente influenciada por la dinámica de la tectónica regional, lo que le da rasgos locales muy marcados que permitieron realizar un mapa estructural que refleja lineamientos dominantes bien definidos, denominados sistema de fallas N° 1 con rumbo promedio N135 y buzamiento 85SO, N° 2 con rumbo N68 y buzamiento 88N y N° 3 con rumbo N138 y buzamiento 65O. También, gracias al gran número de trabajos realizados en la zona y ya más arriba citados en este trabajo, fue posible relacionar estos sistemas con la actividad geotermal asociada a ellos y que se manifiesta a través de numerosas emanaciones hidrotermales, dentro de las cuales se encuentran Las Máquinas, Las Maquinitas, la Villa Copahue y Anfiteatro como las más conocidas y tenidas en cuenta en el análisis de los cálculos realizados con el programa Coulomb 3.3. Con dicho programa, fue posible crear un modelo conceptual de las estructuras representativas de los 3 sistemas de fallas definidos y realizar distintos cálculos de las variaciones de *stress*, deslizamientos y dilatación de la roca involucrada y analizarlos en relación a la dinámica del sistema hidrotermal asociado.

A partir de lo de arriba descrito, fue posible arribar a las siguientes conclusiones:

- La variación de *stress* de Coulomb es muy dependiente de la orientación de las fallas receptoras, por lo tanto es el principal condicionante respecto de la cantidad de *stress* a recibir o liberar por parte de las fallas involucradas.
- El Sistema de fallas N° 1, con rumbo promedio N135 y buzamiento 85SO, presenta en particular una falla principal de gran magnitud ubicada al norte de las lagunas Las Mellizas, que ejerce una marcada influencia en la manifestación hidrotermal Las Máquinas, además de ser una importante zona de recarga y de permeabilidad secundaria con gran productividad desde el punto de vista geotérmico.
- El Sistema de fallas N° 2, con rumbo N68 y buzamiento 88N, genera muy pequeñas variaciones de *stress* en todo el área, a pesar de ser un sistema de gran extensión formado por múltiples fallamientos paralelos y semi paralelos que afectan prácticamente a toda la zona de estudio.
- En cuanto al Sistema de fallas N° 3, con rumbo N138 y buzamiento 65°, no presenta manifestaciones hidrotermales hacia el este, dando la idea de que tal vez estas fallas actúen como una zona impermeable que inhibe el flujo

hidrotermal. Dichas fallas no causaron desplazamientos en las capas superiores de la formación Las Mellizas, por lo que no se observan lineamientos claros en las fotografías aéreas, lo que hizo difícil su identificación y mapeo. En cuanto a las variaciones de *stress*, generó mayores variaciones que el Sistema N° 2. Por último, a pesar de ser inferida como una zona impermeable que inhibe el flujo hidrotermal, los resultados en cuanto a la dilatación indican que la permeabilidad se vería incrementada de ser afectada esta estructura por un sismo de magnitud 4.

- El terremoto en Chile de 5.7Mw no causó grandes variaciones de *stress* en el área de estudio, además de ser un sismo de intensidad media y sucedido a una distancia considerable de la zona de estudio, cabe asumir que las orientaciones de los sistemas de fallas en los que se evaluó la variación de *stress* no presentaban orientaciones realmente favorables.

A pesar de las limitaciones presentadas, dadas principalmente por la calidad de los datos y el programa utilizado para modelar, fue posible realizar estimaciones que permiten elaborar una serie de recomendaciones que tienen como objetivo servir de base para nuevos interrogantes a tratar en el área de estudio y cualquier lugar donde se pretenda utilizar el programa Coulomb 3.3 como software de modelado estructural.

- Al momento de elegir el evento sísmico a ser modelado, es preferible que este sea de magnitudes relevantes, mayores a 3Mw por lo menos a nivel regional. Teniendo en cuenta que en el área de estudio de este trabajo encontramos mucha actividad sísmica de muy baja magnitud (1-4Mw, mayormente), y solo algunos eventos de mayor magnitud (5-7Mw), es importante la disminución en la cantidad de datos útiles para realizar la modelación.
- Asimismo, es preferible que la estructura involucrada refleje un rechazo (slip) significativo, puesto que, en la presente experiencia, esto también llevó a disminuir los datos de sismos idóneos para realizar los cálculos deseados.
- Es recomendable que el espesor de roca a modelar sea lo más homogéneo posible debido a que el programa modela optando por unificar la roca a nivel corteza, al punto que no discrimina entre capas de distinto espesor y propiedades físicas puntuales, utiliza un mismo coeficiente de Poisson y módulo de Young



para todo el espesor modelado. Esto es útil para tener en cuenta a la hora de buscar precisión en la modelación.

- Por último, es recomendable trabajar con rocas lo más frescas posible, con superficies limpias y sin alteración, ya que esto es lo mejor para obtener datos de buena calidad y mejorar la fidelidad del modelo. En el presente estudio las mediciones de indicadores cinemáticos para caracterizar la dinámica de las estructuras fue sumamente difícil, dado que se trató de rocas con alteración hidrotermal avanzada y bandeado ignimbrítico.

## 8 Bibliografía

- Angermann, D., Klotz, J., & Reigber, C. (1999). Space-geodetic estimation of the Nazca-South America Euler vector. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 171, pp. 329-334.
- Bravo Ojeda, F. J. (2015). Nuevas perspectivas geológicas y estructurales sobre el control de la circulación de fluidos del sistema geotermal copahue – caviahue y su relación con isótopos de helio. Santiago de Chile, Chile. .
- Cembrano, J., & Moreno, H. (1994). Geometría y naturaleza contrastante del volcanismo Cuaternario entre los 38°S y 46°S: ¿dominios compresionales y tensionales en un régimen transcurrente? *Congreso Geológico Chileno*, n. 7, (págs. Actas, Vol. 1, pp. 240-244.). Concepción.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., & Stein, S. (1990). Current plate motions. *Geophysical Journal International*, págs. Vol. 101, pp. 425-478.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., & Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time-scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 21, n. 20, pp. 2191-2194.
- Folguera, A., & Ramos, V. (2000). Control estructural del volcán Copahue (38°S-71°O): implicancias tectónicas para el arco volcánico cuaternario (36-39° S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol. 55, n. 3, pp. 229-244.
- Folguera, A., Ramos, V., Hermanns, R., & Naranjo, J. (2004). *Neotectonics in the foothills of the southernmost central Andes (37–38° S): Evidence of strike-slip displacement along the Antñir-Copahue fault zone*. *Tectonics*, Vol. 23, n. 5.
- Forte, P., Bengoa, C., & Caselli, A. (2012). Análisis preliminar de la actividad sísmica del complejo volcánico Copahue-Caviahue mediante técnicas de array. *XIII Congreso Geológico Chileno*, (págs. pp. 574-576). Antofagasta.
- Global CMT Catalog. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- González, O., & Vergara, M. (1962). Reconocimiento geológico de la Cordillera de Los Andes entre los paralelos 35° y 38°S. *Universidad de Chile, Instituto de Geología*, Publicación 24, 119 pp.
- Hantusch, Marcia. (2016). Estudio estructural del flanco NE del Volcán Copahue y el sector sur de las lagunas Las Mellizas (Neuquén). Universidad Nacional del Comahue, Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas.
- JICA. (1992). *The Feasibility Study on the Northern Neuquén Geothermal Development Project*. Japan International Cooperation Agency: Final Report.
- Lavenu, A. (2006). Neotectónica de los Andes entre 1°N y 47°S (Ecuador, Bolivia y Chile): una revisión. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol. 61, n. 4, pp. 504-524.
- Lavenu, A., & Cembrano, J. (1999). Compression-and transpressional-stress pattern for Pliocene and Quaternary brittle deformation in fore arc and intra-arc zones (Andes of Central and Southern Chile). *Journal of Structural Geology*, Vol. 21, n. 12, pp. 1669-1691.
- Linares, E., Ostera, H., & Mas, L. (1999). Cronología potasio-argón del Complejo Efusivo Copahue- Caviahue, provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 54 (3):240-247.
- Mas, G., Mas, L., & Bengochea, L. (1996). Alteración ácido-sulfática en el campo geotérmico Copahue, Provincia de Neuquén. *Resvista de la Asociación Geológica Argentina* 51 (1), 78-86.



- Mas, L., Mas, G., & Bengochea, L. (2000). *Heat flow of Copahue geothermal field, its relation with tectonic scheme*. Kyushu-Tohoku, Japan: Proceedings World Geothermal Congress.
- Melnick, D., Folguera, A., & Ramos, V. A. (2006). Structural control on arc volcanism: the Caviahue-Copahue complex, Central to Patagonian Andes transition (38° S). *Journal of South American Earth Sciences*, págs. Vol. 22, pp. 66-88.
- Moreno, H. (1976). The Upper Cenozoic Volcanism in the Andes of Souther Chile (From 40°00' to 41°30' S.L.). *Symposium on Andean and Antarctic Volcanology Problems, Intarnational Association of Volcan and Chemistry of the Earth Interior (IAVCEI) (González-Ferrán, O.; editor).*, Proceedings, pp. 143-173.
- Nakamura, K. (1977). *Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation: principle and proposal*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 2, pp. 1-16.
- Niemeyer, H., & Muñoz Bravo, J. (1983). *Geología de la Hoja Laguna de La Laja*. Santiago.: SERNAGEOMIN 57, pp.52.
- Norambuena, E., Leffer-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, S., y otros. (1998). Space geodetic observations of Nazca-South America convergence across the Central Andes. *Science*, Vol. 279, pp. 358-362.
- Okada, Y. (1992). Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 82, n. 2, pp. 1018-1040.
- Panarello, H. (2002). Características Isotópicas y Termodinámicas de Reservorio del Campo Geotérmico Copahue-Caviahue, Proviencia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina.*, 57 (3): 328-340.
- Pardo-Casas, F., & Molnar, F. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates from Late Cretaceous time. *Tectonics*, Vol. 6, n. 3, pp. 233-248.
- Pesce, A. (1989). Evolución volcano-tectónica del complejo efusivo Copahue-Caviahue y su modelo geotérmico preliminar. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 44(1-4), 307-327.
- Radic, J. (2010). *Las cuencas cenozoicas y su control en el volcanismo de los Complejos Nevados de Chillán y Copahue-Callaqui (Andes del Sur, 36°-39° S)*. *Andean geology*, Vol. 37, n. 1, pp. 220-246.
- Rojas Vera, E., Folguera, A., Spagnuolo, M., Gímenez, M., Ruiz, F., & Martínez, P. y. (2009). La neotectónica del arco volcánico a la latitud del volcán Copahue (38°S), Andes de Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol. 65, n. 1, pp. 204-214.
- Smithsonian Global Volcanism Program and NOAA's National Geophysical Data Center. <http://volcano.si.edu/>
- Somoza, R. (1998). Updated Nazca (Farallon)-South American relative motions during the last 40 My: implications for the mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, págs. Vol. 11, n. 3, pp. 211-215.
- Sruoga, P., & Consoli, V. C. (2011). El Volcán Copahue. En relatorio del XVIII congreso geológico argentino (págs. 613-620). Neuquen.
- Sruoga, V., & Consoli, P. (2004). Evolución volcanológica y geoquímica del volcán Copahue. *Informe SEGEMAR (inérito)*. 35 pág.
- Stern, C. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile*, Vol. 31, n. 2, pp. 161-206.



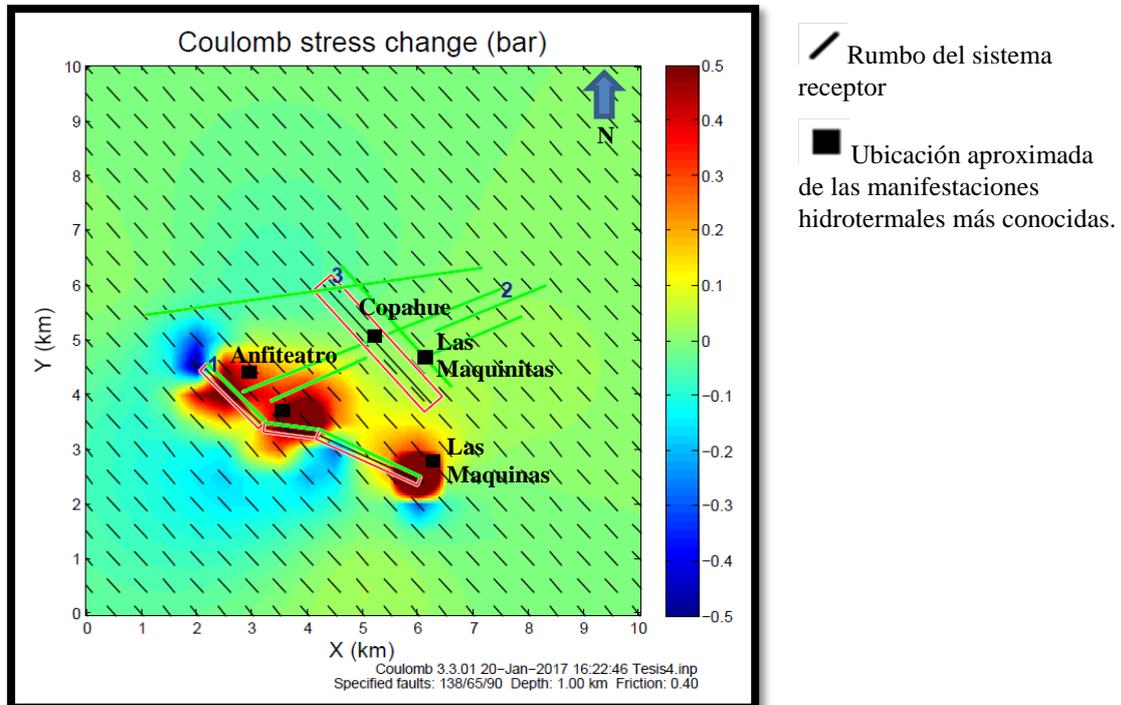
- Tamaki, K. (1999). *Nuvel-1A calculation results*. Ocean Research Institute, University of Tokyo. <http://manbow.ori.u-tokyo.ac.jp/tamaki-bin/post-nuvella>.
- Tassara, A., & Yáñez, G. (2003). Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47° S). *Revista geológica de Chile*, Vol. 30, n. 2, pp. 159-186.
- Toda, S., Stein, R. S., Lin, J., & Sevilgen, V. (2011). *Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching—user guide*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1060, 63 p., available at <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1060/>.



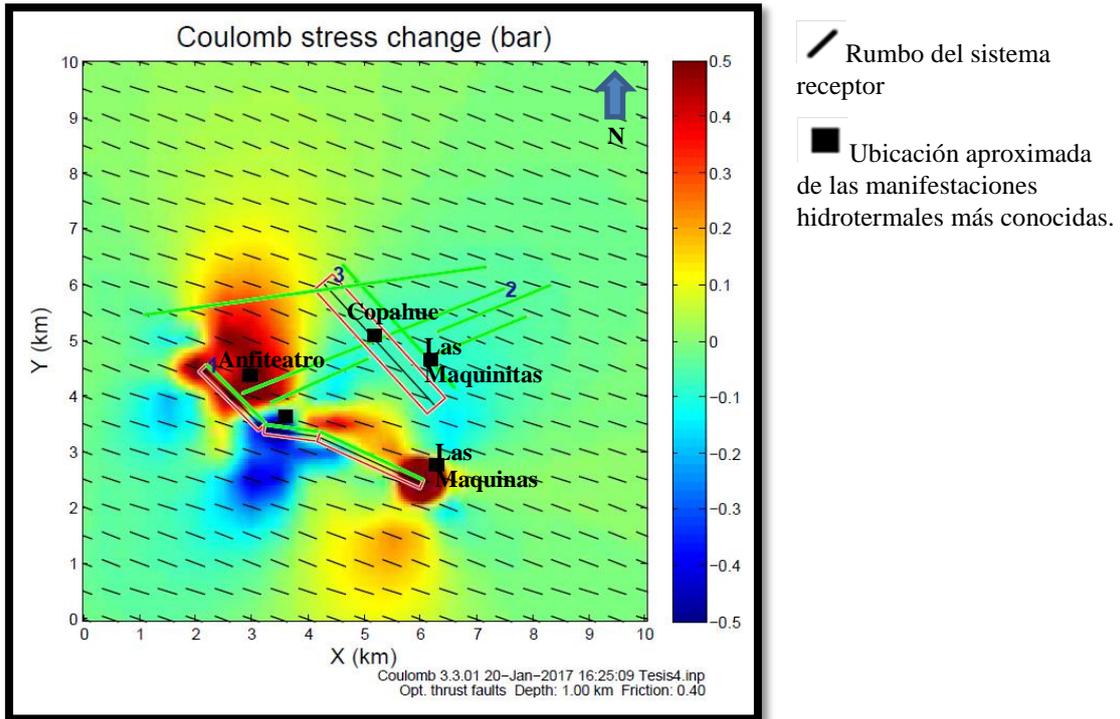
Trabajo Final de Licenciatura en Ciencias Geológicas.  
Facultad de ingeniería - Universidad Nacional del Comahue.

# **ANEXOS**

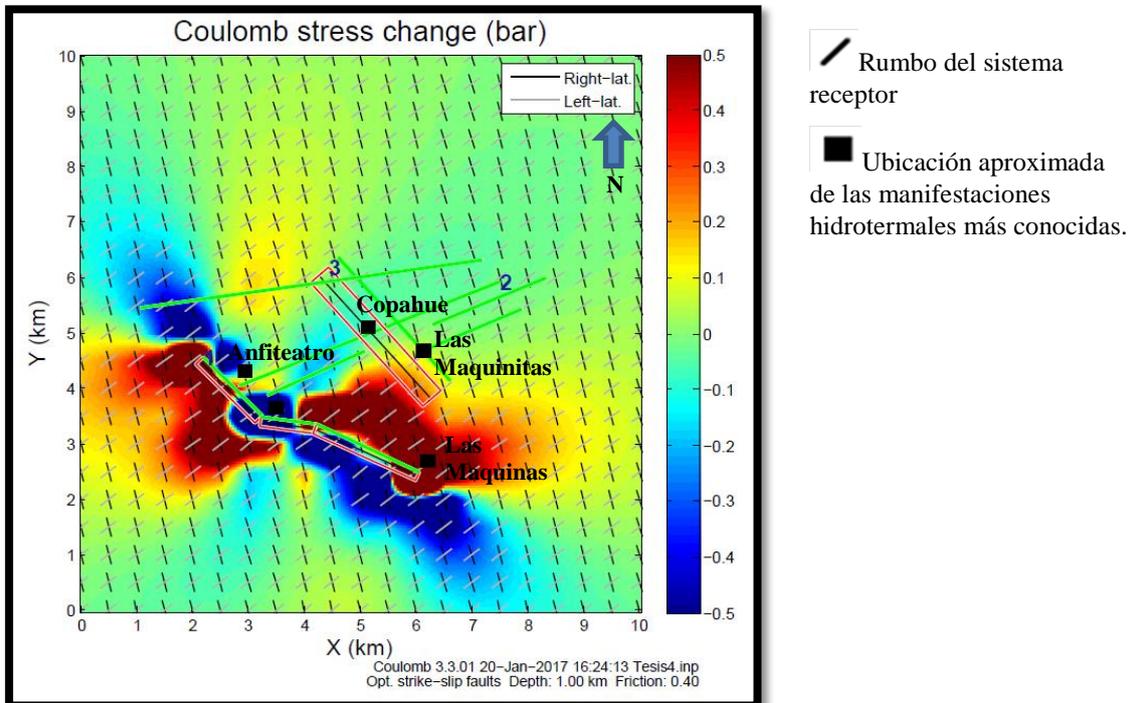
Anexo A1: Resultados pertenecientes al cálculo de *stress* en el Escenario 1 con emisor en el Sistema N° 1.



**Figura N° 34:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas con la misma orientación que el sistema de fallas N° 3 luego de un sismo generado en el sistema de fallas N° 1.

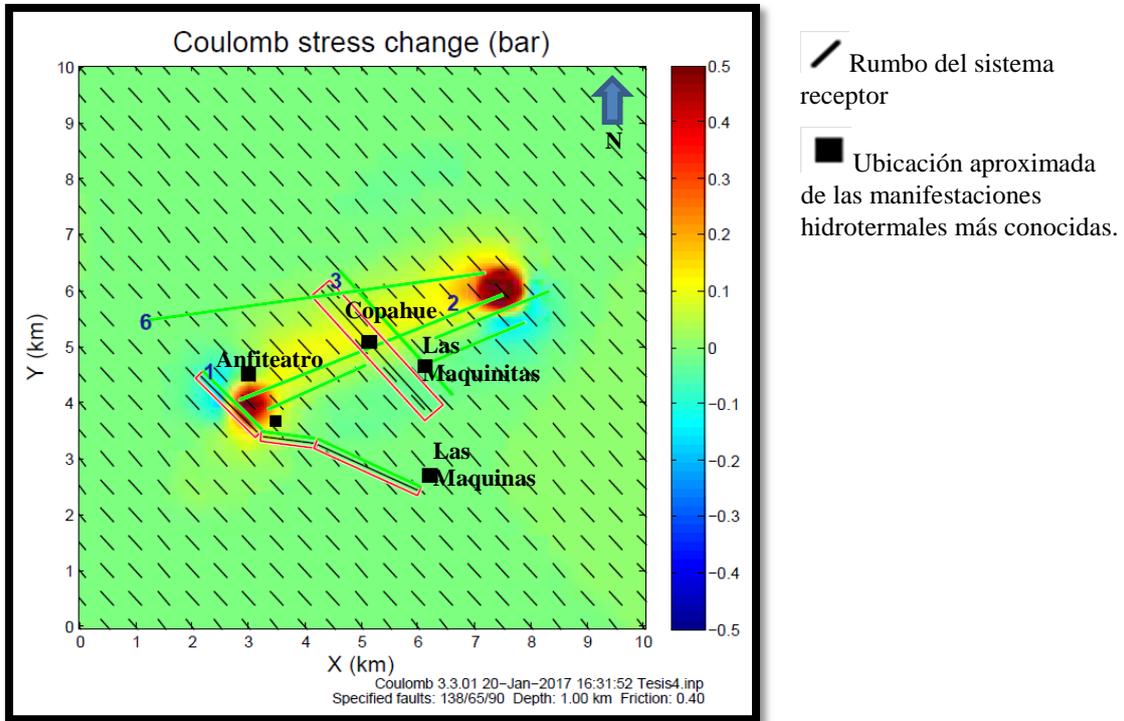


**Figura N° 35:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas inversas con orientación óptima luego de un sismo de magnitud 4 generado en el sistema de fallas N° 1.

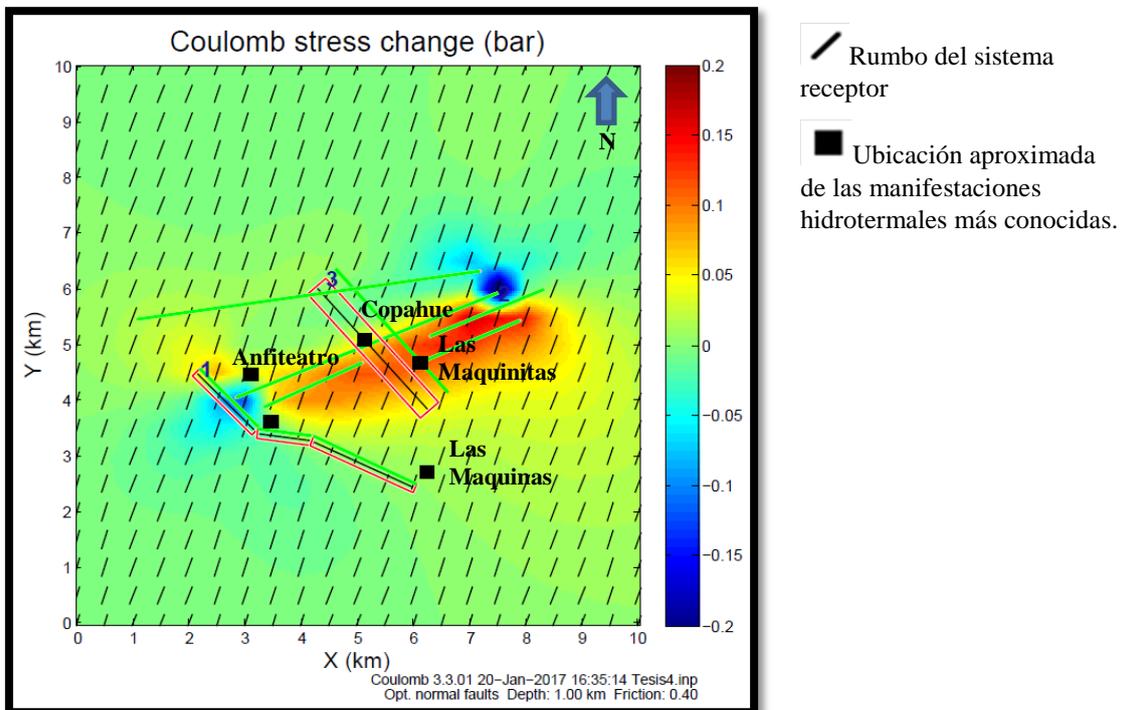


**Figura N° 36:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas de rumbo con orientación óptima luego de un sismo de magnitud 4 generado en el sistema de fallas N° 1.

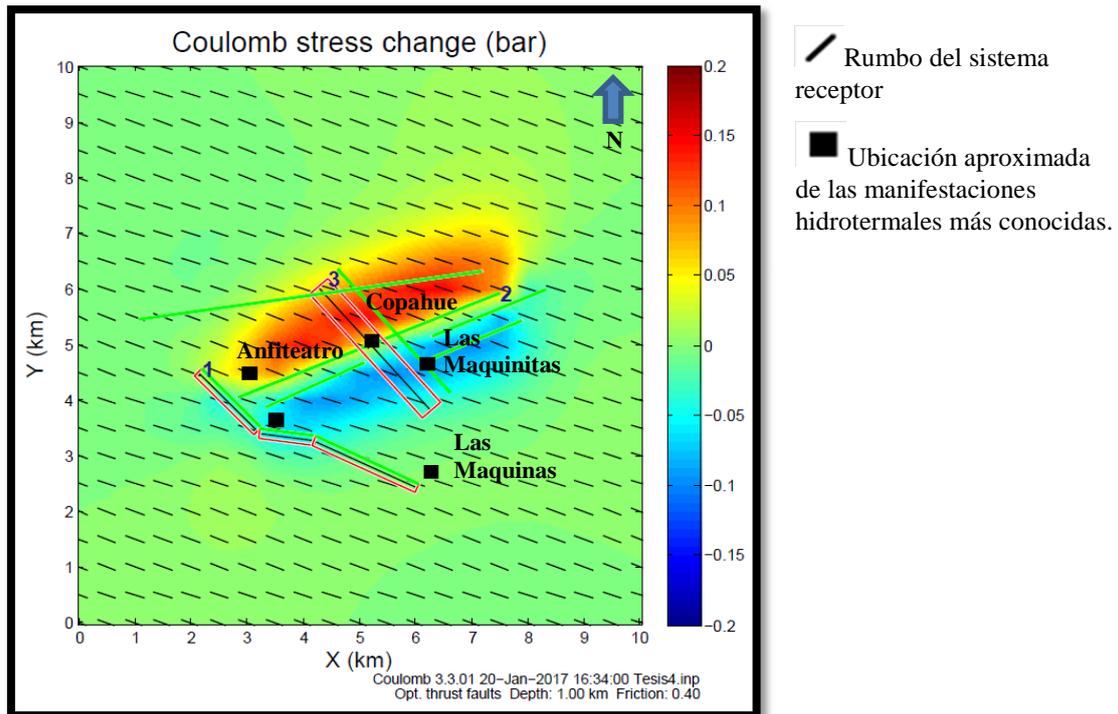
**Anexo A2: Resultados pertenecientes al cálculo de *stress* en el Escenario 2 con emisor en el Sistema N° 2.**



**Figura N° 37:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas con la misma orientación que el sistema de fallas N° 3 luego de un sismo generado en el sistema de fallas N° 2.

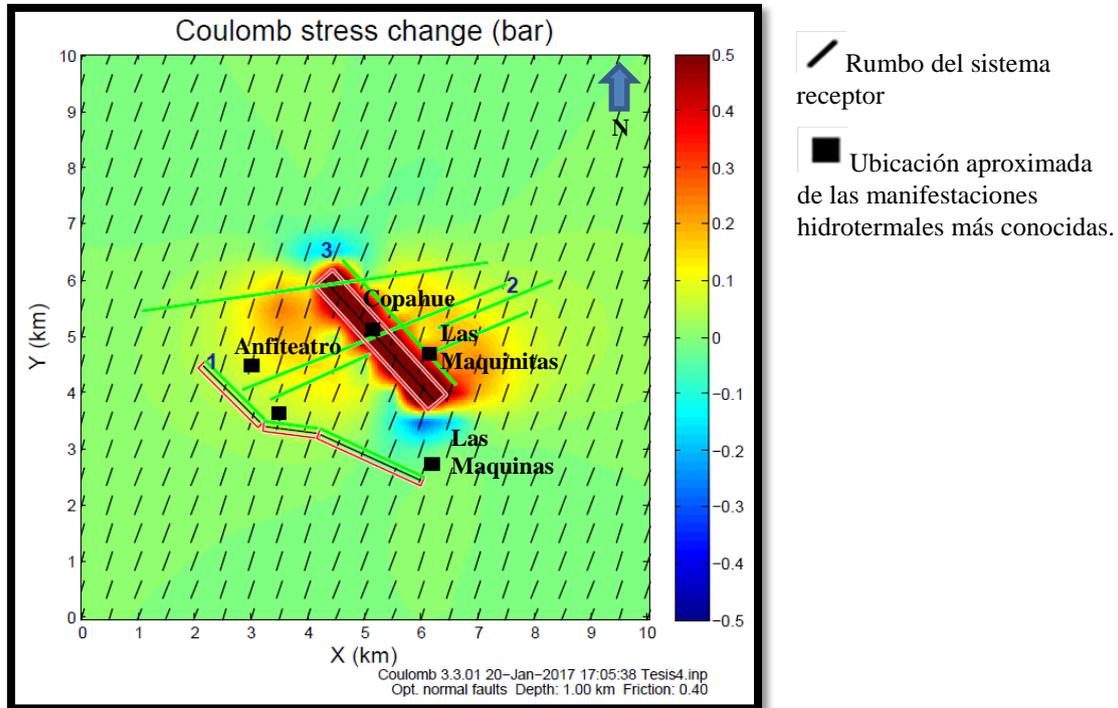


**Figura N° 38:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas normales con orientación óptima luego de un sismo de magnitud 4 generado en el sistema de fallas N° 2.

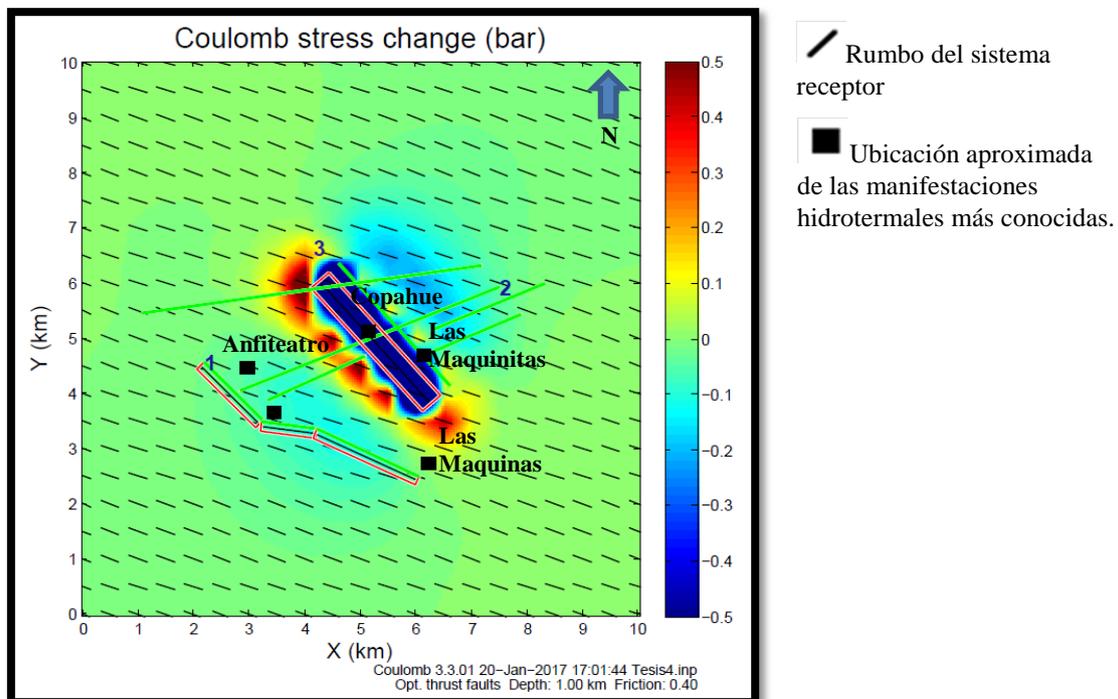


**Figura N° 39:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas inversas con orientación óptima luego de un sismo de magnitud 4 generado en el sistema de fallas N° 2.

**Anexo A3: Resultados pertenecientes al cálculo de *stress* en el Escenario 3 con emisor en el Sistema N° 3.**

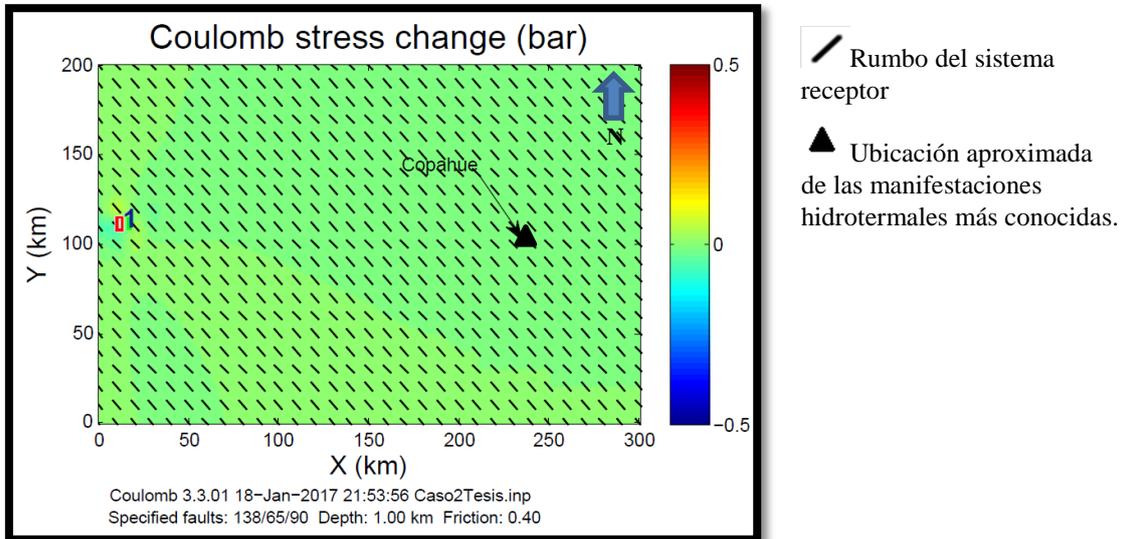


**Figura N° 40:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas normales con orientación óptima luego de un sismo de magnitud 4 generado en el sistema de fallas N° 3.

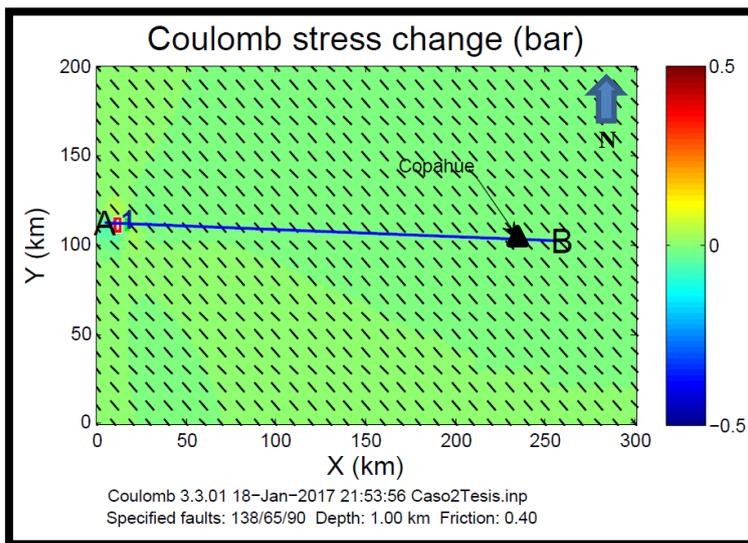


**Figura N° 41:** Variación del *stress* de Coulomb para fallas inversas con orientación óptima luego de un sismo de magnitud 4 generado en el sistema de fallas N° 3.

**Anexo A4:** Resultados pertenecientes al cálculo de *stress* en el Escenario 4 con emisor en el Sistema N° 4.



**Figura N° 42:** Variación de stress para fallas con la misma orientación que el sistema N° 3 generada por el sismo de 5.7Mw en la costa de Chile.



**Figura N° 43:** Línea A-B para obtener la sección A-B.

