

CONDICIONES DE FAVORABILIDAD PARA LA EXISTENCIA DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO ACTIVO EN EL ÁREA DEL VOLCÁN SOCOMPA, DEPARTAMENTO LOS ANDES, PROVINCIA DE SALTA

Alejandro R. Conde Serra



Vista sureste del volcán Socompa.

SERIE CONTRIBUCIONES TÉCNICAS - GEOTERMIA N° 6

CONDICIONES DE FAVORABILIDAD PARA LA EXISTENCIA DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO ACTIVO EN EL ÁREA DEL VOLCÁN SOCOMPA, DEPARTAMENTO LOS ANDES, PROVINCIA DE SALTA

Alejandro R. Conde Serra¹

¹ Instituto de Geología y Recursos Minerales - Servicio Geológico Minero Argentino

Supervisión: Pablo Esteban Johanis
Validación: Lidia Inés Korzeniewski
Edición: Marcos Vila

ISSN 2618-4818

BUENOS AIRES 2023

SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

Presidente: Dr. Eduardo O. Zappettini

Secretaria Ejecutiva: Lic. Silvia Chavez

INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

Director: Dr. Martín Gozalvez

DIRECCIÓN DE RECURSOS GEOLÓGICO-MINEROS

Director: Lic. Pablo E. Johanis

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Esta publicación debe citarse como:

Conde Serra, Alejandro R. 2023. Condiciones de favorabilidad para la existencia de un sistema geotérmico activo en el área del Volcán Socompa, Departamento Los Andes, Provincia de Salta. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas Geotermia N° 6, 14 pp. Buenos Aires.

ISSN 2618-4818

ES PROPIEDAD DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES - SEGEMAR
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN



Av. General Paz 5445 (Colectora provincia) 1650 - San Martín - Buenos Aires - República Argentina

Edificios 14 y 25 | (11) 5670-0100

www.segemar.gov.ar

CONTENIDO

RESUMEN	.....	1
ABSTRACT	.....	1
1. INTRODUCCIÓN	.....	2
2. EVIDENCIAS GENERALES	.....	2
3. EVIDENCIAS DE ACTIVIDAD GEOTÉRMICA ACTUAL	.....	7
3.1. Calor	.....	7
3.2. Fluidos geotérmicos	.....	7
3.3. Circulación de fluidos	.....	9
3.4. Reservorio	.....	10
4. CONCLUSIONES	.....	11
5. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO	.....	13

RESUMEN

El prospecto geotérmico Volcán Socompa a través de las evidencias halladas recientemente, evolucionó en su conocimiento de constituirse según la clasificación del *Best Practices Guide for Geothermal Exploration en un Blind Geothermal System* (sistema geotérmico ciego) a convertirse en un sistema geotérmico oculto, en donde se destacan indicios de actividad asociados a la existencia de calor, emitido por la cámara magmática del citado volcán, la constancia de circulación de fluidos geotérmicos e indicios de la presencia de un primer reservorio somero (600 m de profundidad) con alta probabilidad de contener una salmuera termal y condiciones litológicas para la presencia de reservorios profundos. Todo ello en un escenario estructural que favorece la permeabilidad necesaria para distribuir y almacenar fluidos calientes.

Desde el punto de vista de la capacidad entálpica del sistema para generación eléctrica, la alta concentración de sales registradas en los sitios de toma de muestras de las manifestaciones termales y el no acceso directo a los fluidos que ascienden por fallas profundas no ha permitido un cálculo geotermométrico no obstante, la existencia de actividad volcánica coadyuva a hipotetizar una concentración térmica en la roca subyacente más profunda que podría alcanzar niveles entálpicos suficientes como para generar energía.

La información obtenida mediante los estudios realizados hasta la fecha alienta a proseguir la investigación para fijar blancos de perforación que permitan interceptar un primer acuífero-reservorio detectado mediante geofísica magnetotélúrica y en adelante alumbrar potenciales reservorios infrayacentes deducidos por la misma técnica. Y en caso que mediante perforaciones no se alumbren niveles que concentren volúmenes de fluidos geotérmicos de interés como para alimentar una planta de generación eléctrica, bien se podrá obtener muestras de roca caliente para investigar sus condiciones geomecánicas y en adelante aplicar los nuevos desarrollos tanto en permeabilidad asistida (fracturación hidráulica) como de captación de calor para conversión eléctrica.

Palabras Clave: *evidencias, calor, fluidos, permeabilidad, reservorio, conductivo, inflación.*

ABSTRACT

The Volcán Socompa geothermal prospect based on evidence found to date has evolved from being- according to the Best Practices Guide for Geothermal Exploration a Blind Geothermal System to a Hidden Geothermal System. There are indicators of activity associated with the heat emitted from the magma chamber of the mentioned volcano. There is permanent geothermal fluid circulation and the presence of a shallow reservoir with high probability of containing thermal brine. All of this occurs in a structural setting that favors the necessary permeability to distribute and store hot fluids.

From the perspective of the enthalpy capacity of the system for the electricity generation, the high concentration of salts registered in mixing waters present in the thermal manifestations of the prospect has not allowed a reliable geothermometric calculation of the first aquifer-reservoir detected immediately below 600 meters, even within fluids from deep faulting. However the existence of volcanic activity contributes to the hypothesis of thermal concentration in the deeper underlying rock that could reach sufficient enthalpic levels to generate energy.

The information obtained through the studies carried out to date encourages further research to set drilling targets that allow intercepting a first aquifer-reservoir detected by magnetotelluric geophysics and henceforth illuminate potential underlying reservoirs deduced by the same technique. And if drilling does not capture levels that concentrate volumes of geothermal fluids of interest to feed a power generation plant, it will be possible to obtain hot rock samples to investigate their geomechanical conditions and henceforth apply the new developments both in permeability assisted (hydraulic fracturing) and heat capture for electrical conversion

Keywords: *evidence, heat, fluids, permeability, reservoir, conductive, inflation*

1. INTRODUCCIÓN

Los diferentes estudios geotérmicos llevados a cabo por el SEGEMAR desde el año 2017 tuvieron como objetivo primordial la identificación y caracterización de áreas favorables para la generación de energía geotérmica como energía renovable no convencional y así, promover el desarrollo sostenible y el aprovechamiento de este recurso natural que posibilite el crecimiento y diversificación de las economías regionales.

En este trabajo se analiza la presencia en el área del Volcán Socompa (provincia de Salta) de diferentes rasgos geológicos que son favorables para la existencia de un sistema geotérmico de tipo *volcanic play* (Moeck 2014). Las características geológicas para el desarrollo de un sistema geotérmico de este tipo son:

- Existencia de una **fuentes de calor activa** en cualquiera de sus formas, sean cámaras magmáticas, calor radiogénico emanante, plumas magmáticas ascendentes, conductividad calórica entre unidades rocosas, *feeders* y/o *outflows* calóricos conducidos convectivamente por fallas comunicadas con fuentes de calor, etc.
- Indicios de circulación de **fluidos geotérmicos** en todas sus posibles fases: sea vapor seco, vapor dominante agua, agua dominante vapor o agua sobrecalentada.
- Permeabilidad primaria de unidades litológicas con capacidad de almacenar fluidos geotérmicos (rocas reservorios) o con una permeabilidad secundaria adquirida por daño tectónico (*e.g.* basamentos precaldera craquelados o basamentos de cuencas fracturados en bloques).
- Un marco estructural suficientemente abierto para la circulación de fluidos del sistema y/o el entrapamiento de campos geotermiales.

2. EVIDENCIAS GENERALES

El SEGEMAR en sus primeros estudios, siguiendo el criterio de Garg *et al.* 2010, tipificó al prospecto Volcán Socompa dentro de los modelos de tipo *Blind Geothermal Systems*. Con el progreso de las investigaciones (Conde Serra 2018, Lelli 2018, Raco 2018, Favetto *et al.* 2018, Conde Serra *et al.* 2020) se alcanzó un modelo conceptual geotérmico suficiente para una recategorización a sistema oculto (*Hidden Geothermal System*).

Las evidencias geológicas generales identificadas en el área del prospecto que respaldan esta recategorización son:

- Existencia de volcanismo de edad holocena con rasgos de actividad.
- Unidades rocosas con condiciones de permeabilidad para albergar fluidos (ver secuencia estratigráfica favorables en cuadro 1).
- Manifestaciones termales (*hot springs*) con participación de fluidos calientes.
- Presencia de alteraciones (argílica avanzada, fílica, propilitica y sílicea, además de alunita, jarosita e illita) y depósitos hidrotermales (Conde Serra *et al.* 2020) como resultado de la circulación y el accionar de fluidos geotérmicos sobre el marco rocoso.
- Por otra parte, en el área se observan numerosas geoformas carbonáticas (tufas) e improntas de vegetación en los alrededores de la laguna Socompa, en lechos y orillas de bajos lagunares secos aledaños al volcán (Figs. 1 y 2) que se interpretan como producto de la desgasificación magmática de CO₂ circulante que, en parte, se concentra en acuíferos-reservorios subyacentes y/o superan la presión hidroestática con difusión hacia la superficie (Piersigilli *et al.* 2020). Estas geoformas carbonáticas son evidencias de yacencias de sistemas geotermiales, por ejemplo el sistema geotermal de Mono Lake (California, División of Mines and Geology 2009), y han servido como guías para el hallazgo de campos geotermiales ciegos (Coolbaugh *et al.* 2009, Geothermal Minerals of Nevada 2022).
- Se identificaron además depósitos de diatomitas, cuyo origen se debió a la circulación de fluidos con sílice disuelta que ha sido captada por los microorganismos (diatomeas) para construir sus frústulas y colonias de cianobacterias vivas y acumuladas en estromatolitos cuya existencia se debe al ambiente geotermal activo imperante en la laguna Socompa (Fariás *et al.* 2013).

Desde el punto de vista estructural el área es favorable al emplazamiento de una fuente de calor, a la circulación y/o entrapamiento de fluidos y a la conformación de cuencas endorreicas e imbríferas (Galliski *et al.* 1987) como depocentros y reservorios en profundidad, en este caso en un marco de posibles calderas anidadas (Figs. 3, 4 y 5).

Otras de las características geológicas importantes que se identificaron son las unidades litológicas con permeabilidad primaria capaces

de almacenar fluidos tanto en fase vapor como líquida. En el área del prospecto estas unidades están representadas por el Complejo Volcánico Quebrada del Agua (Oligoceno superior – Mioceno

Superior) (Figs. 6 y 7) que sobreyace al Complejo Volcánico Santa Inés y que se apoya sobre rocas que conforman el basamento paleozoico (Cuadro 1) (Seggiaro *et al.* 2018).



Figura 1: Restos de una tufa tipo "torre" como expresión de la desgasificación de una zona saturada en CO_2 . Al fondo se aprecia un bajo estructural con posibilidad de almacenar fluidos en sus niveles profundos. Foto tomada por Conde Serra (2021).



Figura 2: Tufa bioquímica en donde se aprecia (señalizado con flecha) carbonato de calcio adherido a los tallos de vegetación en las orillas de la laguna Socompa y otros bajos aledaños. Foto tomada por Conde Serra (2021).

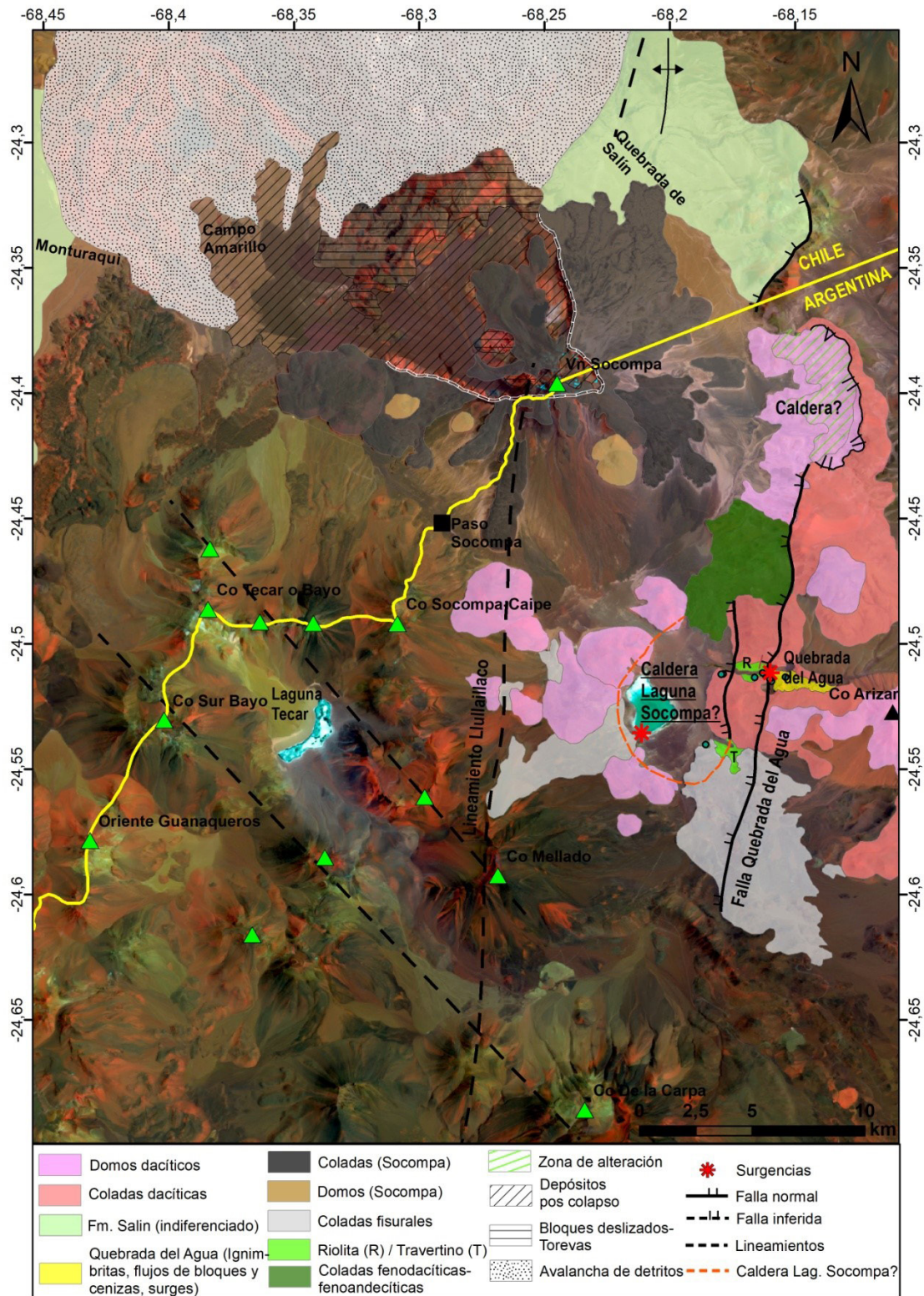


Figura 3. Mapa geológico y estructural de la región (Seggiaro *et al.* 2018).

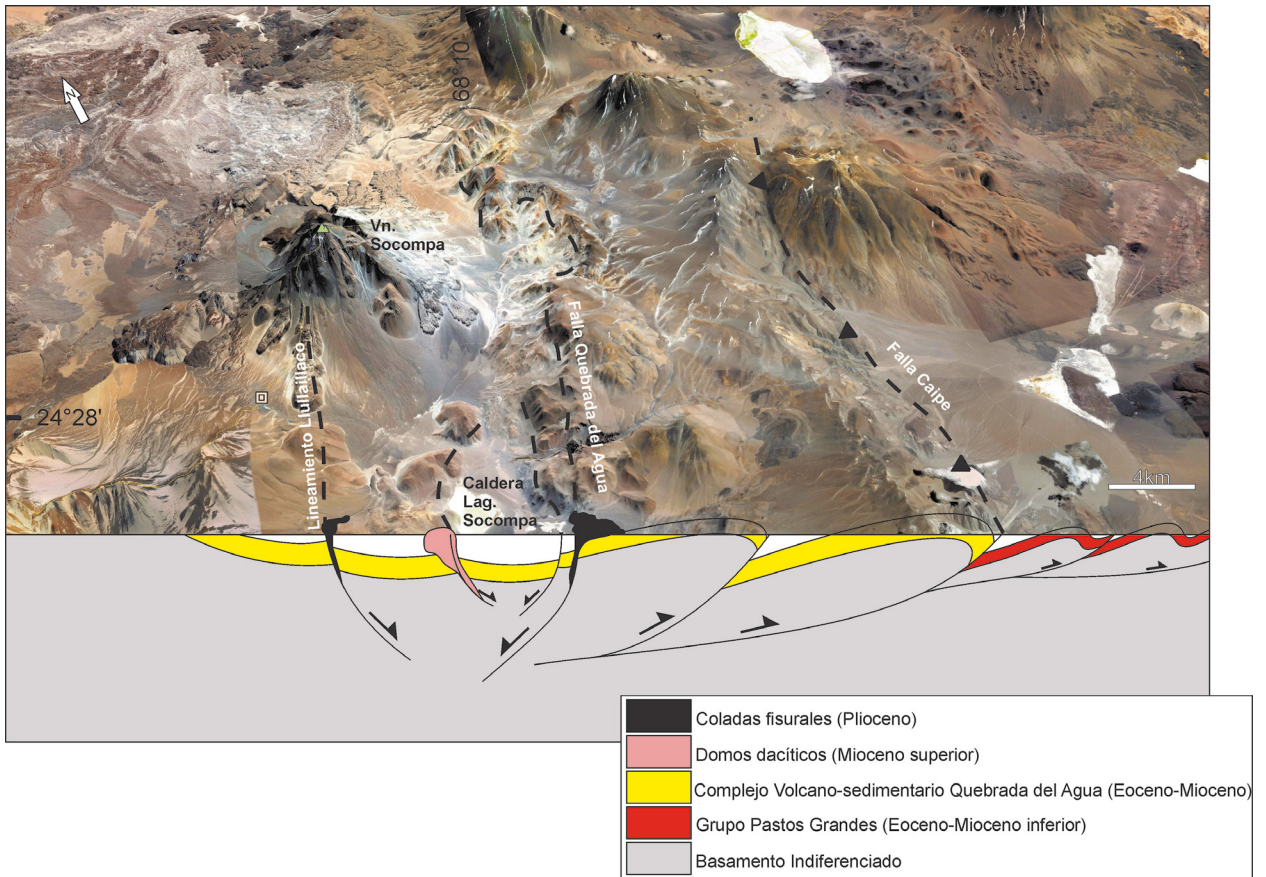


Figura 4. Esquema estructural que se constituye en el marco favorable a contener una cuenca imbrífera como lo es laguna Socompa (Seggiaro *et al.* 2018).

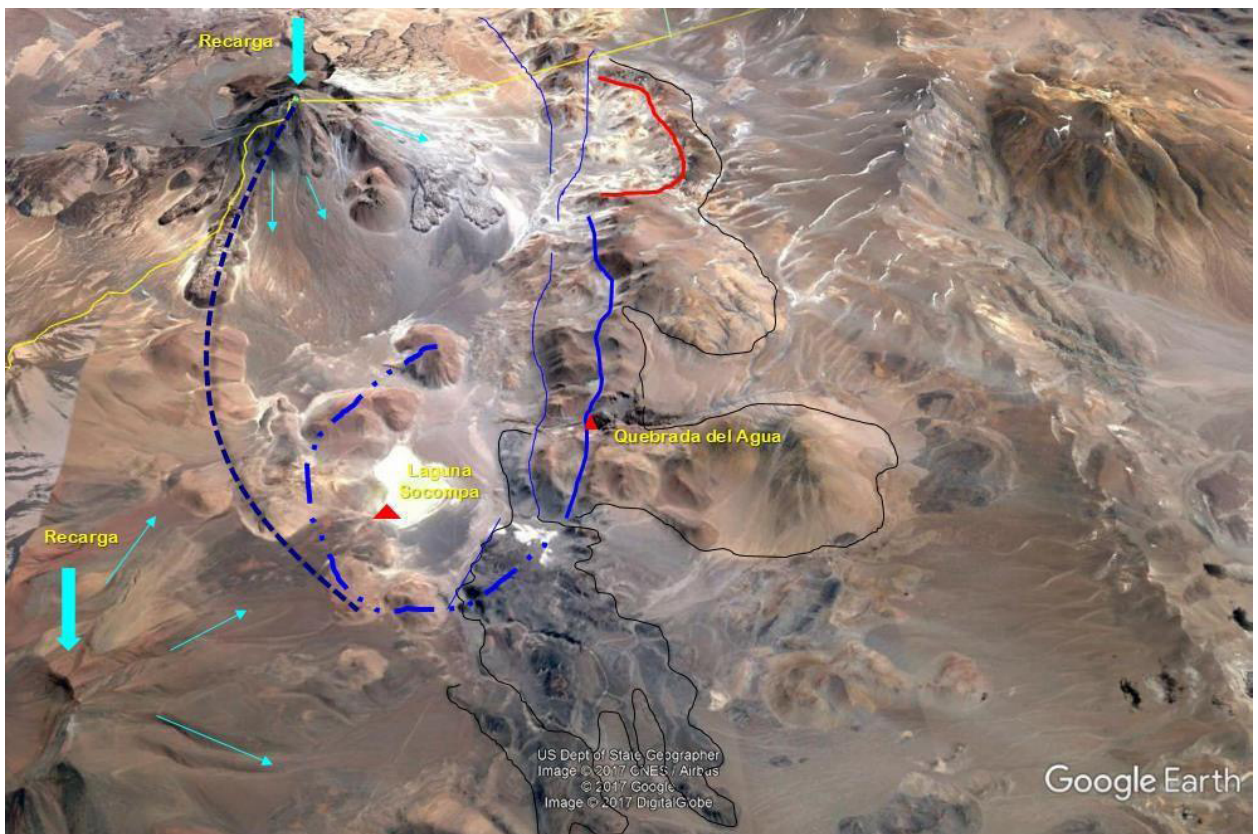


Figura 5. Esquema estructural donde se identifican los sectores favorables para el desarrollo de reservorios geotérmicos profundos.



Figura 6. Complejo Volcánico Santa Inés (CVSI) y Complejo Volcánico Quebrada del Agua (CVQA) identificadas por su permeabilidad favorable para almacenar fluidos. Ambas se proyectan a profundidades del orden de los 2.000 metros (Conde Serra 2017 y Seggiaro *et al.* 2018).



Figura 7: Aglomerado volcánico con alta permeabilidad perteneciente al Miembro Inferior del Complejo Volcánico Quebrada del Agua (Conde Serra 2017 y Seggiaro *et al.* 2018).

EDAD	FORMACIÓN	COMPOSICIÓN	Espesor/Prof. (metros)
Oligoceno superior - Mioceno superior	Complejo Volcánico Quebrada del Agua Mioceno superior –Mioceno medio – Mioceno inferior	Coladas andesíticas – Tobas - Conglomerados-Aglomerados volcánicos - Ignimbritas riolacitas.	1300-700
Eoceno -Oligoceno	COMPLEJO VOLCÁNICO SANTA INÉS	Dacitas + Ignimbritas + Diques Riolacíticos – Riolíticos + Alteraciones Hidrotermales (Pórfiros Cu) + Pórfiros	?
Pérmico-Triásico-Jurásico-Cretácico	BASAMENTO PREVOLCANITAS	Cuarcitas marinas devónicas + Volcanitas silíceas + Granitoides + Lavas + Sedimentitas + Gravas	Fin de secuencia/ Basamento

Cuadro 1: Resumen de la secuencia estratigráfica con condiciones de almacenar fluidos geotérmicos conformándose en posibles reservorios.

3. EVIDENCIAS DE ACTIVIDAD GEOTÉRMICA ACTUAL

3.1. CALOR

Guevara y Giordanengo (2023) determinaron la presencia de una cámara magmática (fuente de calor activo) en el área del volcán Socompa mediante prospección geofísica profunda utilizando la técnica magnetotelúrica (MT) de largo período. Al respecto se la identificó como señal conductiva (ver figura 8 nominada como C3) en estado fundido y posiblemente conteniendo agua andesítica. Esta cámara constituye la fuente de calor que alimenta a las manifestaciones termales ubicadas en el ámbito de la laguna Socompa y explica la presencia de suelos calientes vaporosos fumarólicos en el cráter del volcán (Costello *et al.* 2009, Galliski *et al.* 1987). Más allá de numerosos antecedentes similares, un ejemplo tipo de la asociación de una señal conductiva con la presencia de una cámara magmática fue registrada por Sainato y Pomposiello (1997) en el prospecto geotérmico Volcán Tuzgle ubicado en la puna jujeña.

Otra evidencia de la presencia de una fuente de calor activa lo dan estudios recientes de interferometría radar (DInSAR) satelital desarrollados por Liu *et al.* (2022) en el área del volcán Socompa quienes han registrado un estado de inflación del aparato volcánico como consecuencia de la presión calórica magmática profunda.

Por otra parte, en la Unidad de Sensores Remotos (Wright *et al.* 2022) y SIG del SEGEMAR fueron analizadas 59 imágenes Sentinel 1 SLC IW de series ascendentes y 67 escenas del mismo sensor para series descendentes, aplicándose la corrección troposférica ERA5 en ambas series. El análisis de las series de tiempo del registro interferométrico realizadas desde enero 2018 hasta febrero 2023 permitieron caracterizar la deformación acumulada en el lapso de tiempo. De este análisis surgió que la inflación del terreno en el área del volcán es del orden de aproximadamente 1,5 cm/año lo que suma un total de 7,5 cm aproximadamente en el lapso comprendido entre 2018 y 2023 (Fig. 9).

La anomalía detectada señala modificaciones morfológicas del volcán Socompa asociadas a la presión magmática, lo que implica actividad calórica bien avenida para el desarrollo de campos geotermales.

3.2. FLUIDOS GEOTÉRMICOS

En lo concerniente al ascenso de fluidos geotérmicos existen manifestaciones termales en el ámbito del volcán constituidas por mezclas de aguas meteorológicas con componentes hidrotermales procedentes de un reservorio somero, alcanzando en superficie temperaturas del orden de los 26 °C (Lelli 2018). Las manifestaciones termales (*hot springs*) constituyen otro aval para la existencia de calor activo.

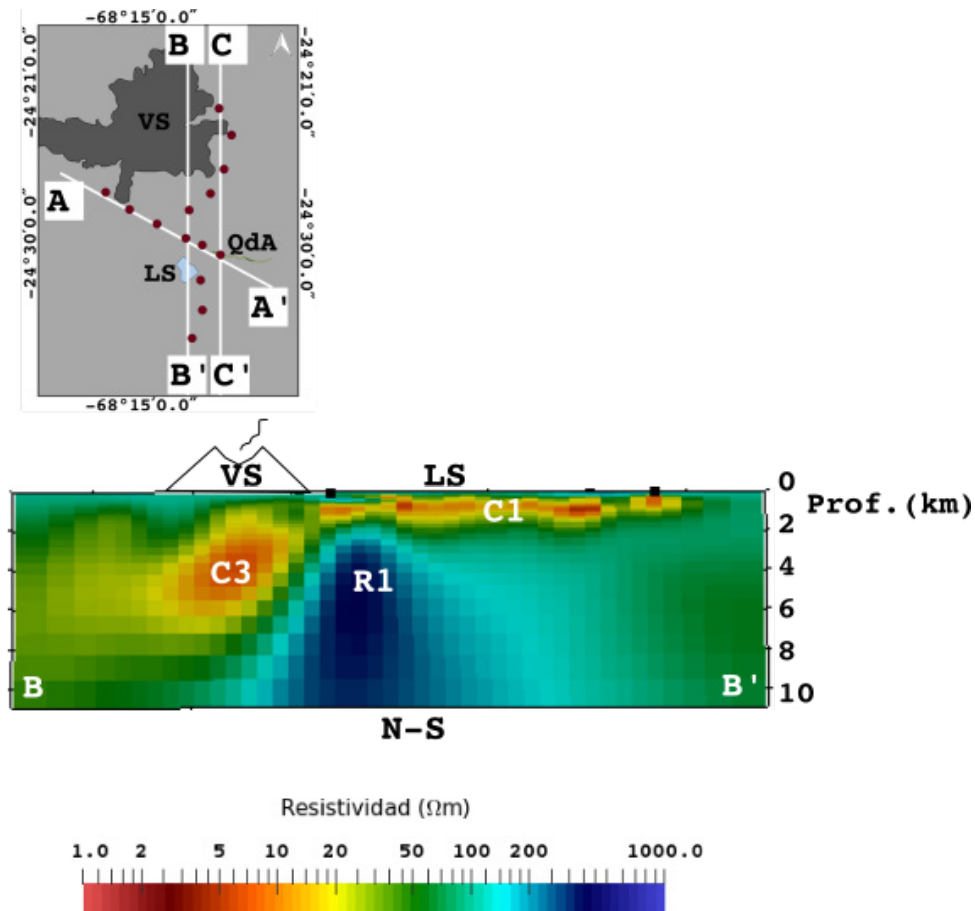


Figura 8: Pseudosección geoelectrica del modelo MT 2D (Guevara y Giordanengo 2023). Se observa el alto conductivo C3 sobre el perfil B-B' asociado a la presencia de la cámara magmática del volcán Socompa.

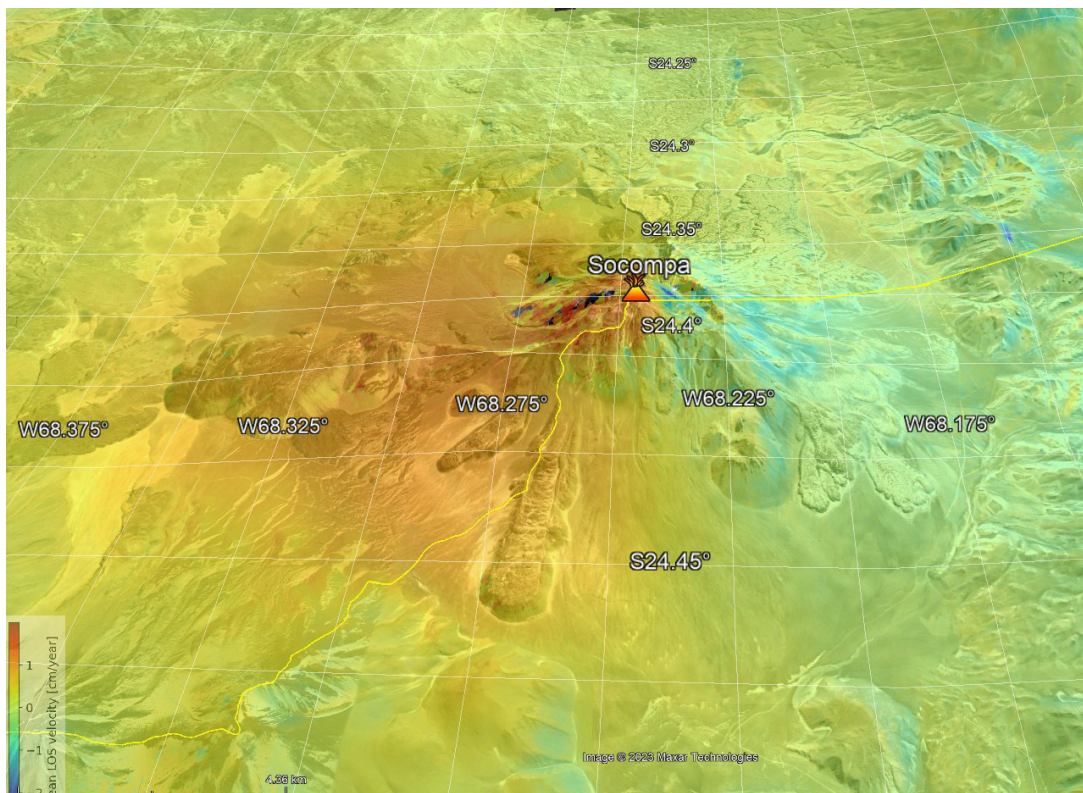


Figura 9. Se ilustra la anomalía de resultados del análisis de la velocidad promedio en LOS - 59 Imágenes Sentinel 1 Ascending ERA 5 GNSS entre enero 2018 hasta febrero de 2023. Una evidente anomalía por inflación que sugiere la presencia de una cámara magmática activa.

3.3. CIRCULACIÓN DE FLUIDOS

Las evidencias de circulación de los fluidos están dadas por estudios geofísicos (Guevara y Giordanengo 2023) que marcan una anomalía de baja resistividad (Fig. 10, señaladas en el perfil como C1 y C2) y que se asocian a roca alterada por hidrotermalismo dando probablemente una argilitización que conformaría un *claycap*. Por otra parte, la circulación de fluidos sobre los planos de la falla Quebrada del Agua dieron lugar a una alteración argílica que marca

una respuesta de señal electronegativa. Debajo de esta unidad conductiva subyace hasta los 2 km rocas posiblemente permeables por su respuesta resistiva, especialmente el nivel celeste sobreyacente a R1 (miembro inferior Quebrada del Agua? / Complejo Volcánico Santa Inés?).

Los resultados 2D que se ilustran en el perfil MT B-B' (Fig. 11) ratifican la presencia de una unidad alto conductiva y refuerza la idea de la existencia de una capa arcillosa (*claycap*) que actúa de sello y techo en reservorios geotérmicos.

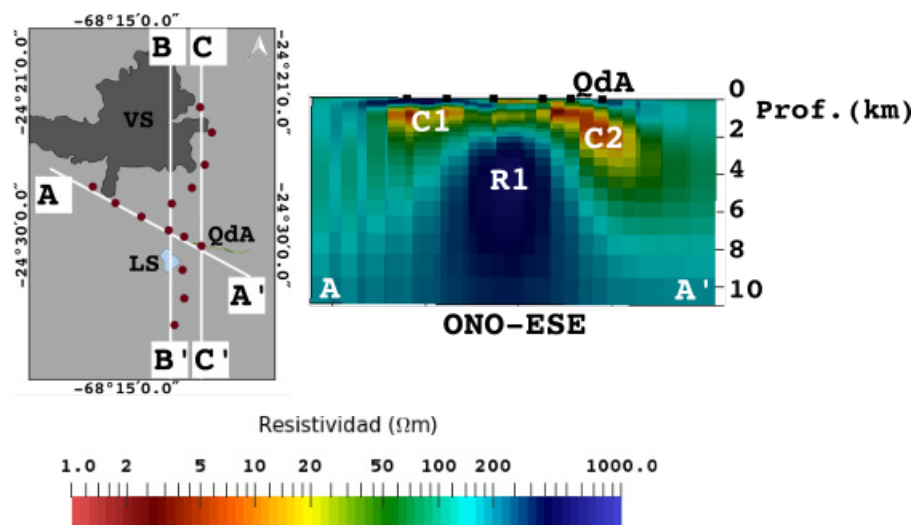


Figura 10. La pseudosección A-A' muestra el conductivo C2 ubicado en el plano de la falla Quebrada del Agua, cuyos espacios se hallan rellenos de material probablemente argílico (baja resistividad) producto de la alteración hidrotermal por circulación de fluidos geotérmicos. C1 es parte de la continuidad en el perfil de un nivel conductivo asociado a un *claycap* (Guevara y Giordanengo 2023).

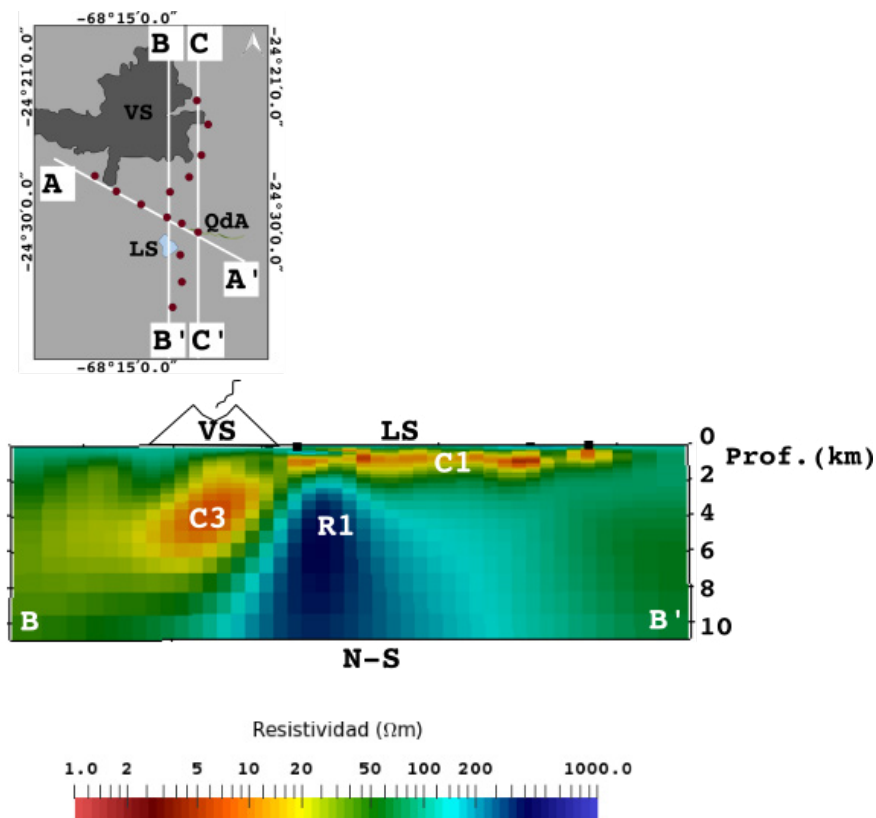


Figura 11. Pseudosección MT 2D correspondiente a la transecta de medición B-B'. C3 representa la cámara del volcán Socompa y C1 la unidad *claycap* techo de reservorio.

3.4. RESERVORIO

La detección de posibles reservorios tuvo en cuenta los resultados obtenidos mediante la técnica geofísica Audio Magnetotelúrica (AMT) (Favetto *et al.* 2018) en el ámbito de la cuenca imbrífera de la laguna Socompa (Fig. 12). Esta técnica geofísica por razones de período de registro y frecuencias que utiliza, tiene un poder de auscultamiento en profundidad limitado a los 1.000 m aproximadamente, siempre que no se presente un material muy conductivo que absorba la señal, acotando aún más el alcance de medición. Una característica de la aplicación de este método geofísico magnetotelúrico es el desarrollo de modelos de buen detalle. En el área de estudio se detectó una unidad conductiva a una profundidad del orden de los 700 m que

se interpreta como la conjunción de un *claycap* (Guevara *et al.* 2021), y una salmuera termal subyacente inferida por estudios de trazabilidad geoquímica efectuados sobre las manifestaciones termales surgentes de la misma (Lelli 2018). A escala de prospecto se puede considerar como un primer reservorio (Conde Serra *et al.* 2020) ubicado sobre los niveles resistivos detectados por MT de largo período, asignados a reservorios más profundos. La existencia de varios niveles de reservorios en campos geotermales es común en modelos de tipo volcánico en otros países y en la República Argentina son ejemplos de éstos los campos geotermales del volcán Tuzgle en la provincia de Jujuy o el conocido caso del sistema geotérmico estratificado del volcán Copahue, en la provincia de Neuquén (Barcelona *et al.* 2019).

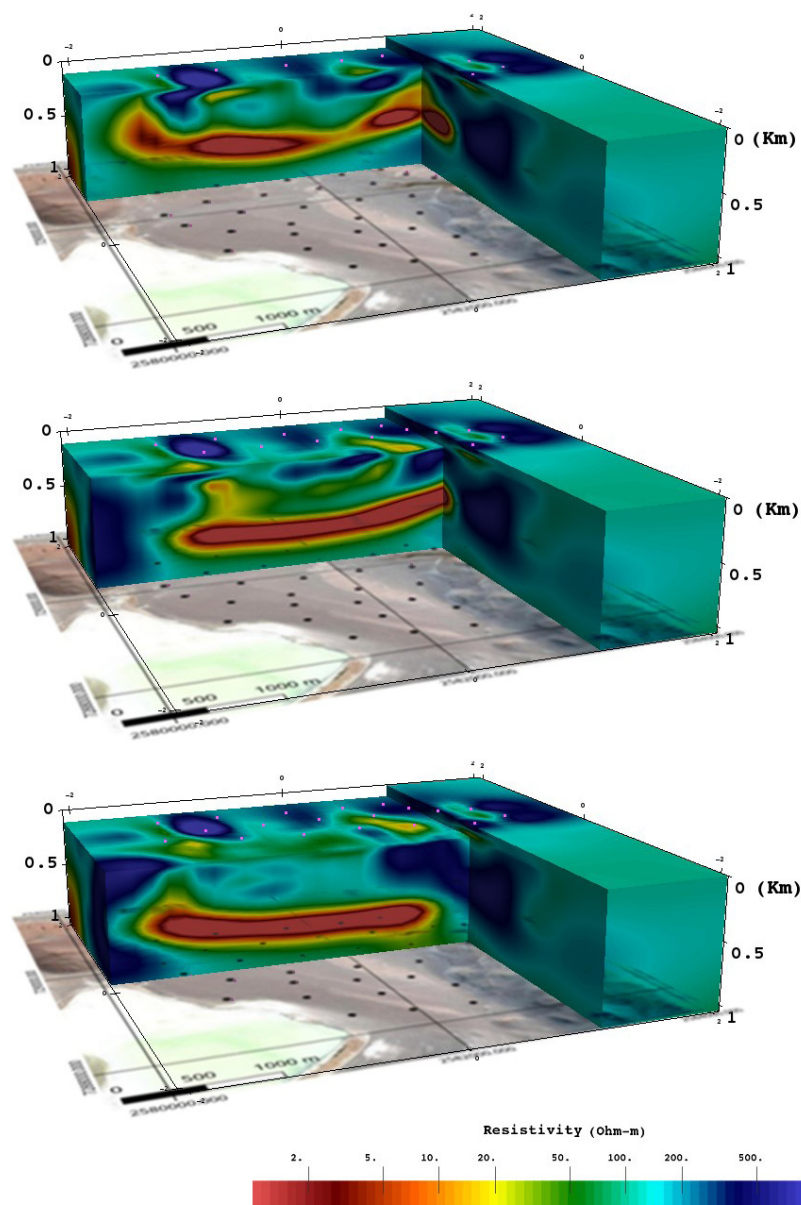


Figura 12: Modelo geofísico 3D resultado del relevamiento AMT (Audio Magnetotelúrico) en el ámbito de la laguna Socompa (Favetto *et al.* 2018). Presenta una unidad conductiva asociada al conjunto *claycap* y salmuera termal. Nótese las proyecciones de las señales de conductividad que se coligan con las surgencias termales observadas en superficie.

4. CONCLUSIONES

En el ámbito del volcán Socompa se encontraron evidencias de un sistema geotérmico activo y oculto (Fig. 13), esto amerita la prosecución de su exploración para alcanzar un Modelo Conceptual Geotérmico permitiendo ubicar blancos de perforación y con ello la explotación y desarrollo del recurso geotérmico de manera directa.

Las condiciones de favorabilidad para la existencia de un campo geotérmico que fueron encontradas en el área son:

- La existencia de una fuente de calor.
- Una primera unidad permeable (Formación Quebrada del Agua) que contiene un acuífero termal, posible salmuera, donde su techo actúa de sello de cualquier ascenso de fluidos procedentes de reservorios más profundos (geopresurizados?). La profundidad estimada para este primer reservorio, es del orden de los 700 metros, determinado mediante geofísica AMT y estudios de trazabilidad geoquímica para analizar su composición a partir de las manifestaciones termales surgentes.
- Litología de basamento (Complejo Volcánico Santa Inés y/o el basamento granitoide) con posibilidades de presentar permeabilidad primaria o adquirida por daño tectónico regional o volcanotectónico local. Para el modelo geotérmico propuesto en el presente trabajo en el área del volcán Socompa, de tipo “*volcanic play*”, es común encontrar reservorios más profundos, en este caso detectados como unidades resistivas mediante la aplicación de la geofísica MT de largo período y que se hallarían a profundidades del orden de los 2.000 (nivel sobreyacente a R1, figuras 10 y 11).

Hay que tener presente la posibilidad que el escenario geológico (baja permeabilidad) en profundidad no sea el propicio para disponer de rocas-reservorios con capacidad de almacenar volúmenes económicos de fluidos en condiciones termodinámicas suficientes como para alimentar una planta de generación eléctrica. Más aún, una perspectiva menos favorable, es que tales unidades litológicas profundas, infrayacentes a la salmuera termal en el ámbito de la laguna Socompa y todos los bajos aledaños contenidos por las criotcalderas, se comporten directamente según la clasificación de Moeck (2014) como medios de tipo “Roca Seca Caliente” (*Hot Dry Rock*). En esta condición solo recibirían calor

conductivo y no convectivo. Esta situación ha sucedido en varios prospectos geotérmicos en el mundo (*e.g. Desert Peak* o *Forge* en la localidad de Fallon, en el estado de Nevada, EE.UU.) inclusive hay casos en que la unidad acuífera ha sido sellada por mineralización secundaria como resultado de la actividad geotérmica perdiendo toda posibilidad de permeabilidad (*e.g. campo geotermal de Coso* en California, U.S. Department of Energy 2004). En tales casos, la explotación se resolvió mediante el empleo de técnicas de estimulación EGS (*Enhanced Geothermal Systems*) que han sido evaluadas y empleadas con éxito en Europa y Estados Unidos (Darnet *et al.* 2006 y Cuenot *et al.* 2008). Estos métodos involucran fracturamiento hidráulico que generan una permeabilidad controlada, y mejoran la capacidad de circulación en campos geotermiales que no se hallan en condición extrema de “roca seca”. La disponibilidad de agua en el área del volcán Socompa para alimentar un reservorio estimulado, está asegurada por la presencia del curso permanente del arroyo Quebrada del Agua.

Un ejemplo de explotación sin acuífero es la planta de 8,5 MWe en Geretsried, Baviera, Alemania que es alimentada por un sistema de ductos intercambiadores de calor (Eavor-Loop™) a 4.500 m de profundidad. Este sistema podría ser utilizado en el área del volcán Socompa dado que el gradiente geotérmico es anómalo a profundidades menores.

En una segunda etapa de investigación se proponen las siguientes acciones para alcanzar un Modelo Conceptual Geotérmico definitivo: Aumentar la grilla de prospección geofísica MT de largo período cubriendo la superficie de todo el prospecto para cerrar el diseño y disposición de los niveles electroconductivos hallados y resolver el arreglo estructural que los contiene.

Una prospección gravimétrica con instrumental acorde a alta montaña que cubra igual superficie. Es una técnica que se complementa muy bien con la técnica MT desde el punto de vista de la interpretación litoestratigráfica y estructural. Y sumar un levantamiento magnetométrico en campo a los efectos de distinguir unidades, especialmente aquellas que hayan superado la temperatura de Curie.

Muestreo de los niveles de agua de los pozos que se hallan en derredor a la laguna Socompa y particularmente aquel construido para captar el

agua de insumisión del arroyo Quebrada del Agua que desemboca en el bajo aledaño a la laguna. Era una asignatura pendiente en el programa inicial de exploración hidrogeológica y geoquímica. Permitirá conocer preliminarmente los volúmenes de aporte de agua y su quimismo, dato útil también para incorporar a futuros estudios de ingeniería de reservorios en caso de evaluarse la opción de aplicar un esquema EGS.

Construir un Modelo Hidrogeológico que incluya la morfometría hídrica. Sería una tarea coadyuvante a la anterior propuesta.

Datación de las tufas, diatomitas y estromatolitos.

Un relevamiento geológico y estructural de alto detalle conexas a los rasgos que determinen los modelos geofísicos 3D inclusive.

Con los resultados obtenidos de todas estas acciones se podrá perfeccionar el Modelo Conceptual

Geotérmico y seleccionar entonces blancos para una primera campaña de perforación a diamantina (con válvulas BOP en boca de pozo) con la misión de alcanzar profundidades del orden de los 1.500 metros. Se pretende con ello alumbrar el primer acuífero termal, atravesando el nivel de *claycap* y tomando muestras de los fluidos. Inclusive uno de los pozos podría interceptar en profundidad el plano de falla de la Quebrada del Agua a los efectos de quizás capturar fluidos geotérmicos que provendrían de niveles más profundos que el primer acuífero termal. Durante el proceso de perforación se deberá tener en cuenta todos los estudios que representan un *logging* completo de detalle, desde la mencionada toma de muestras de fluidos, al muestreo de las alteraciones hidrotermales (*claycap*), inclusiones fluidas, identificación litoestratigráfica con sus ensayos de permeabilidad conexos, geomecánicos y registro de gradientes de temperatura.

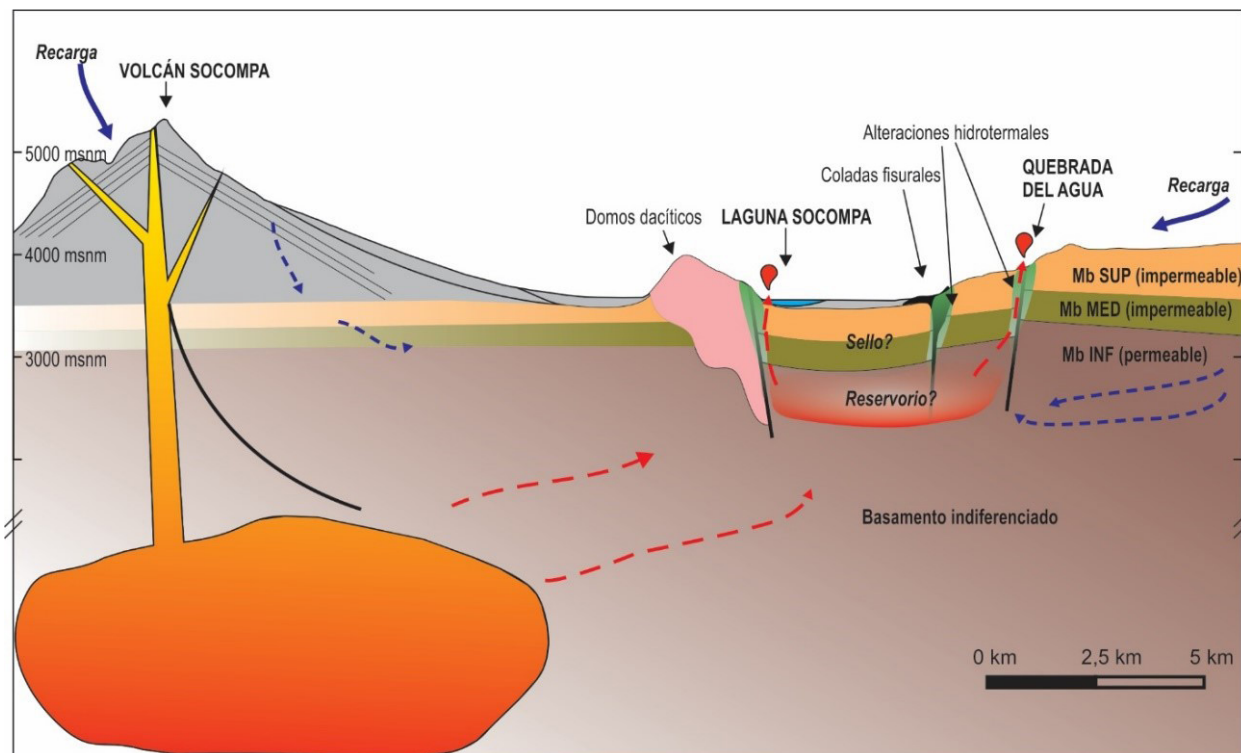


Figura 13. Primer modelo conceptual preliminar esquemático (Seggiaro *et al.* 2018).

5. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Barcelona, H., Yagupsky, D., Agosto, M., 2019. The layered model of the Copahue geothermal reservoir, Argentina. *Geothermal Energy*. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0124-9>.
- Best Practices Guide for Geothermal Exploration. 2014. IGA Service GmbH c/o Bochum University Applied Sciences (Hochschule Bochum) Bochum, 196 pp. Germany.
- California. Division of Mines and Geology. 2009. *Geothermal Systems of the Mono Basin-Long Valley Region, Eastern California and Western Nevada*. Vol. 85 N° 19.
- Conde Serra, A.R. 2017. Volcán Socompa. Exploración Geotérmica. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Argentina. Buenos Aires. 20 pp. Inédito. <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/966>.
- Conde Serra, A.R. 2018. Análisis Crítico de Resultados Geofísicos Magnetotéluricos, Primera Campaña, Significado Geotérmico. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires. 12 pp. Inédito. <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2584>.
- Conde Serra, A.R., Seggiaro, R., Apaza F., Castro Godoy S., Marquetti, C., Masa, S., Cozzi, G., Lelli, M., Raco, B., Guevara L., Carrizo, N., Azcurra, D., Carballo, F. 2020. Modelo Conceptual Geotérmico preliminar del Volcán Socompa, Departamento de los Andes, Provincia de Salta, Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas Geotermia N° 2, 92 pp. Buenos Aires. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/4016>
- Costello, E. K., Halloy, S. R., Reed, S. C., Sowell, P., Schmidt, S. K. 2009. Fumarole-supported islands of biodiversity within a hyperarid, high-elevation landscape on Socompa Volcano, Puna de Atacama, Andes. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(3): 735-747.
- Coolbaugh, M., Lechler, P., Slade, Ch., Kratt, C. 2009. Carbonate Tufa Columns as Exploration Guides for Geothermal Systems in the Great Basin. *Transactions-Geothermal Resources Council* 33:409-414.
- Cuenot, N., Faucher, J., Fritsch, D.J., Genter, A., Szablinski, D. 2008. The European EGS project at Soultz-sous-Forêts: From extensive exploration to power production. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA.
- Darnet, M., Marquis, G., Sailhac, P. 2006. Hydraulic stimulation of geothermal reservoirs: fluid flow, electric potential and microseismicity relationships. *Geophysical Journal International*, 166 (1):438-444. doi: 10.1111/j.1365246X.2006.03026.x.
- Fariás, M.E., Rascovan, N., Toneatti, D.M, Albarracín, V. H., Flores, M.R., Poiré, D.G., Collavino, M.M., Aguilar, O., Vázquez, M.P., Polerecky, L. 2013: The Discovery of Stromatolites Developing at 3570 m above Sea Level in High-Altitude Volcanic Lake Socompa, Argentinean Andes. *PLoS ONE* 8 (1): e53497. doi: 10.1371/journal.pone.0053497, 15 pp.
- Favetto, A., Pomposiello, C., Guevara, L., Giordanengo, G. 2018. Relevamiento Magnetotélurico Geofísico del Sector Compreendido entre la Quebrada del Agua y la Laguna Socompa, Puna Argentina, Instituto de Geocronología y Geología Isotópica – CONICET. 51 pp. Buenos Aires. <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2138>
- Galliski, M., Arias, J., Coira, B., Fuertes, A. 1987. Reconocimiento geotérmico del área de Socompa, provincia de Salta. *Revista del Instituto de Geología y Minería N°7*: 37-53. Universidad Nacional de Jujuy. Argentina.
- Garg, S.K., J.W. Pritchett, J. Combs, 2010. “Exploring for hidden geothermal systems.” *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*, 7 pp. *Geothermal Minerals of Nevada*. 2022. Nevada Bureau of Mines and Geology. <https://storymaps.arcgis.com/stories/624b919af8cb4382824a47fd14fef13a>.
- Guevara, L., Apaza, F.D., Favetto, A., Seggiaro, R., Conde Serra, A. 2021. Geoelectrical characterization of Socompa lagoon area in the Andean Central Volcanic Zone from 3-D audiomagnetotelluric inversion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-volcanology-and-geothermal-research>.
- Guevara, L., Giordanengo, G. 2023. Prospección Geofísica Magnetotélurica Socompa 2021. Reporte Técnico. Serie Contribuciones Técnicas Geofísicas N° 18, 12pp. Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM). Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Dirección de Geomática.
- Lelli, M. 2018. Socompa Geothermal Prospect. Report on Water Geochemistry. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Istituto de Geoscienze e Georisorse. Servicio Geológico Minero Argentino, 25 pp. Buenos Aires. <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2430>.
- Liu, F., Elliott, J., Ebmeier, S., Craig, H.A., Novoa, C., Delgado, F., Pritchard, M., Henderson, S., Walter, T., Lundgren, P., Fialko, Y., Ruch, J. 2022. First onset of unrest captured geodetically at Socom-

- pa Volcano, Northern Chile. doi: 10.22541/es-soar.167065592.28839515/v1.
- Moeck, I.S. 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37:867-882.
- Piersigilli, A.J., Mors, R.A., Astini, R.A., Gomez, F.J. 2020. Travertinos fósiles de la terma Los Hornos, Puna Austral de Catamarca, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 77(1): 1-20.
- Raco, B. 2018. Socompa Geothermal Prospect. Report on Fluid Geochemistry (Soil CO₂ degassing). Consiglio Nazionale delle Ricerche. Istituto de Geoscienze e Georisorse. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, 20pp. Buenos Aires. <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2429>.
- Sainato, C. M., Pomposiello, M. C. 1997. Two-dimensional magnetotelluric and gravity models of the Tuzgle volcano zone (Jujuy province, Argentina). *Journal of South American Earth Sciencis*. Vol. 10 (3-4): 247-261.
- Seggiaro, R. E. y Apaza, F. 2018. Geología del Proyecto Geotérmico Socompa. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, 26 pp. Buenos Aires. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/4035>.
- Wright, E.M., Pardo Duró, M.L. 2022. Detección de deformación en el Volcán Socompa (Provincia de Salta, Argentina) a partir de Interferometría Diferencial (DinSAR). XX Simposio Internacional SELPER. México. Póster, 6pp.