

# MAPA DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA APLICANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS *GEOTHERMAL PLAY FAIRWAY*

## ÁREA 4: Cuenca de Pipanaco, provincia de Catamarca y su extensión en la provincia de La Rioja. Argentina

Alejandro R. Conde Serra, Noelia Carrizo, Carlos Gabriel Asato, Analía L. Casa, Diego Azcurra, Silvia Castro Godoy, Federico Carballo, Marcelo I. Cegarra, Nicolás E. Larcher, Mariano Hernández, Eduardo A. Molina, Javier I. Peroni, Verónica Castano



Vista hacia el sector central de la cuenca de Pipanaco desde el margen occidental, donde se observa el ambiente típico de planicie aluvial con cobertura de vegetación xerófila (Monte Árido).

SERIE CONTRIBUCIONES TÉCNICAS - GEOTERMIA N° 9

# MAPA DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA APLICANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS *GEOTHERMAL PLAY FAIRWAY*

## ÁREA 4: Cuenca de Pipanaco, provincia de Catamarca y su extensión en la provincia de La Rioja. Argentina

Alejandro R. Conde Serra<sup>1</sup>, Noelia Carrizo<sup>2</sup>, Carlos Gabriel Asato<sup>1</sup>,  
Analía L. Casa<sup>1</sup>, Diego Azcurra<sup>1</sup>, Silvia Castro Godoy<sup>1</sup>,  
Marcelo I. Cegarra<sup>1</sup>, Mariano Hernández<sup>3</sup>, Eduardo A. Molina<sup>4</sup>,  
Nicolás E. Larcher<sup>5</sup>, Javier I. Peroni<sup>1</sup>, Verónica Castano<sup>6</sup>

<sup>1</sup>. Servicio Geológico Minero Argentino – Instituto de Geología y Recursos Minerales

<sup>2</sup>. Servicio Geológico Minero Argentino – Sub centro Catamarca

<sup>3</sup>. Servicio Geológico Minero Argentino – Centro General Roca, Río Negro

<sup>4</sup>. Servicio Geológico Minero Argentino – Centro Salta

<sup>5</sup>. Servicio Geológico Minero Argentino – Centro Jujuy

<sup>6</sup>. Servicio Geológico Minero Argentino – Centro Mendoza

*Coordinador e interpretación geotérmica: Alejandro R. Conde Serra*

*Ciencia de datos y procesamiento digital: Carlos G. Asato*

*Geoquímica de fluidos: Noelia Carrizo*

*Geología Estructural: Analía L. Casa, Marcelo I. Cegarra, Mariano Hernández, Eduardo A. Molina*

*Geología Regional: Eduardo A. Molina*

*Neotectónica: Analía L. Casa, Marcelo I. Cegarra*

*Sensores remotos: Silvia Castro Godoy, Diego Azcurra, Federico Carballo*

*Hidrología y manifestaciones termales: Noelia Carrizo, Nicolás E. Larcher*

*Geofísica: Javier I. Peroni*

*Sísmica: Verónica Castano*

*Base de datos: Carlos G. Asato*

*Supervisión: Pablo Esteban Johanis*

*Validación: Lidia Inés Korzeniewski*

*Edición: Marcos Vila Nina*

ISSN 2618-4818

BUENOS AIRES 2026

## SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

*Presidente:* Dr. Julio Matteo Bruna Novillo

## INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

*Director:* Dr. Martín Ricardo Gozalvez

## DIRECCIÓN DE RECURSOS GEOLÓGICO-MINEROS

*Director:* Lic. Pablo Esteban Johanis

### REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

*Esta publicación debe citarse como:*

Conde Serra, A.R., Carrizo, N., Asato, C.G., Casa, A.L., Azcurra, D. Castro Godoy, S., Cegarra, M.I., Hernández, M., Molina, E.A., Larcher, N.E., Peroni, J.I., Castano, V. 2026. Mapa de favorabilidad geotérmica aplicando el método de análisis *Geothermal Play Fairway*. Área 4: cuenca de Pipanaco, provincia de Catamarca y su extensión en la provincia de La Rioja. Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas Geotermia N° 9, 32 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](http://www.segemar.gov.ar)

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	.....	1
<b>ABSTRACT</b>	.....	2
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	.....	3
<b>2. UBICACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO</b>	.....	3
<b>3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS <i>PLAY FAIRWAY</i> APLICADA AL ÁREA 4</b>	.....	5
3.1. MÉTODO DE ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE DATOS	.....	5
<b>4. ZONAS DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA DEL ÁREA 4</b>	.....	6
4.1. MODELO DEL SUBSISTEMA CALOR	.....	6
4.1.1. EVIDENCIAS SÍSMICAS	.....	6
4.1.2. TOMOGRAFÍA SÍSMICA	.....	6
4.1.3. MODELOS DE DELAMINACIÓN LITOSFÉRICA	.....	6
4.2. MODELO DEL SUBSISTEMA FLUIDOS	.....	7
4.2.1. ZONA A	.....	7
4.2.2. ZONA B	.....	13
4.2.2. ZONA C	.....	16
4.2.2. ZONA D	.....	21
<b>5. EVIDENCIAS VÁLIDAS TANTO PARA LOS SUBSISTEMAS CALOR COMO FLUIDOS</b>	.....	22
<b>6. MODELO DEL SUBSISTEMA PERMEABILIDAD</b>	.....	24
<b>7. MAPA DE POTENCIAL GEOTÉRMICO Y MAPA DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA</b>	.....	26
<b>8. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO</b>	.....	30

## RESUMEN

Este estudio presenta los resultados de la aplicación de la metodología *Geothermal Play Fairway Analysis* en la cuenca de Pipanaco, ubicada al sudeste de la provincia de Catamarca y al noreste de la provincia de la Rioja, Argentina. Abarca un área de 67.000 km<sup>2</sup> entre las coordenadas 25° - 30° de latitud Sur y 67° - 66° de longitud Oeste. La metodología aplicada integra datos geológicos, geoquímicos y geofísicos para caracterizar tres subsistemas fundamentales: calor, fluidos y permeabilidad. A partir de la ponderación de estos factores, se generaron mapas de Potencial Geotérmico y Favorabilidad Geotérmica que identifican zonas prioritarias para la exploración del recurso.

En la Cuenca de Pipanaco, la ausencia de evidencia directa de fuentes superficiales de calor vinculadas al vulcanismo activo exige el análisis de datos indirectos para interpretar la posible existencia de calor profundo. Se identificaron tres posibles fuentes del calor: (1) deshidratación y fragilización de la placa de Nazca, donde la subducción genera liberación de fluidos que incrementan el flujo térmico convectivo en la cuña de manto; (2) delaminación litosférica, que permitiría el ascenso de material del manto caliente desde la región de la Puna hacia la Cuenca de Pipanaco; y (3) hipótesis combinada, considerando la interacción de ambos procesos para crear un entorno térmico complejo, con potencial para sistemas geotérmicos de baja a media entalpía.

El análisis geofísico, mediante estudios de tomografía sísmica, sugiere la presencia de zonas de atenuación sísmica y acumulación de fluidos a grandes profundidades, mientras que la conducción térmica desde el basamento hacia los sedimentos superiores podría favorecer el entrapamiento calórico en acuíferos subyacentes. La ausencia de vulcanismo sugiere que los fluidos meteóricos son los principales responsables del transporte de calor en profundidad a través de fallas permeables.

Los resultados destacan cuatro zonas de alta favorabilidad geotérmica:

1. Cordón de Ambato, donde las estructuras tectónicas permiten la recarga de aguas meteóricas a niveles profundos y su retorno como aguas calentadas por gradiente geotérmico anómalo.
2. Cruce de fallas en las termas de Santa Teresita, La Rioja, donde la reactivación tectónica incrementa la permeabilidad secundaria permitiendo la fuga de fluidos geotérmicos hacia acuíferos someros, utilizados actualmente con fines termales.
3. Sector cordón de Velasco, que presenta condiciones estructurales similares a las anteriores, favoreciendo la circulación de fluidos termales.
4. Sierras de Fiambalá, Zapata, Vinquis y Copacabana, donde estructuras de fallamiento conjugado permiten la transferencia térmica hacia el basamento, con evidencias de surgencias termales que registran temperaturas entre 79 °C y 99 °C según geotermómetros de sílice.

El análisis concluye que la explotación de estos recursos podría desarrollarse mediante tecnologías convencionales y no convencionales, especialmente éstas últimas, con posibilidades para proyectos piloto modulares destinados al abastecimiento energético rural.

**Palabras Clave:** *Geothermal Play Fairway, Cuenca de Pipanaco, calor profundo, fluidos, permeabilidad, mapas predictivos, energía renovable, exploración geotérmica, zonas favorables.*

## ABSTRACT

This study presents the results of applying the Geothermal Play Fairway Analysis methodology in the Pipanaco Basin, located in southeastern Catamarca and northeastern La Rioja provinces, Argentina. The basin spans an area of 67,000 km<sup>2</sup> between 25°–30° South latitude and 67°–66° West longitude. The applied methodology integrates geological, geochemical, and geophysical data to characterize three fundamental subsystems: heat, fluids, and permeability. Based on the weighting of these factors, Geothermal Potential and Favorability maps were generated, identifying priority zones for resource exploration.

In the Pipanaco Basin, the absence of direct evidence of surface heat sources associated with active volcanism requires the use of indirect data to infer the possible existence of deep heat. Three potential heat sources were identified: (1) dehydration and weakening of the Nazca Plate, where subduction generates fluid release that increases convective heat flow in the mantle wedge; (2) lithospheric delamination, which may allow the ascent of hot mantle material from the Puna region into the Pipanaco Basin; and (3) a combined hypothesis, considering the interaction of both processes to create a complex thermal environment with potential for low- to medium-enthalpy geothermal systems.

Geophysical analysis, through seismic tomography studies, suggests the presence of seismic attenuation zones and deep fluid accumulation, while thermal conduction from the basement toward overlying sediments could favor heat entrapment in underlying aquifers. The absence of volcanism suggests that meteoric fluids are the main agents of heat transport to depth through permeable fault systems.

The results highlight four zones of high geothermal favorability:

1. Ambato Range, where tectonic structures allow the recharge of meteoric waters to deep levels and their return as waters heated by an anomalous geothermal gradient.
2. Fault intersection at the Santa Teresita hot springs, La Rioja\*\*, where tectonic reactivation increases secondary permeability, enabling the discharge of geothermal fluids into shallow aquifers, currently used for thermal purposes.
3. Velasco Range sector, which presents structural conditions similar to the previous zones, favoring the circulation of thermal fluids.
4. Fiambalá, Zapata, Vinkis, and Copacabana Ranges, where conjugate fault systems allow thermal transfer to the basement, with evidence of thermal springs showing temperatures between 79 °C and 99 °C, according to silica geothermometers.

The analysis concludes that the exploitation of these resources could be developed using both conventional and unconventional technologies, particularly the latter, with potential for modular pilot projects aimed at rural energy supply.

**Keywords:** *Geothermal Play Fairway, Pipanaco Basin, deep heat, fluids, permeability, predictive mapping, renewable energy, geothermal exploration, favorable zone.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde el año 2019 el Servicio Geológico Minero Argentino ha venido aplicando sistemáticamente la metodología *Geothermal Play Fairway (GPF)* en el territorio nacional dividido en áreas geológicas y geográficas y generando como producto mapas de Potencial Geotérmico y de Favorabilidad Geotérmica a escala 1:2.500.000. Para su elaboración se consideró información geológica del mayor detalle disponible.

Esta Contribución Técnica está destinada a la consulta por parte de autoridades de aplicación en minería y energía, sean nacionales o provinciales; organismos científicos y académicos nacionales o extranjeros, volcados a la investigación en la temática y empresas interesadas en la inversión en exploración y explotación de recursos geotérmicos para generación de energía renovable.

La técnica utilizada fue adaptada para la prospección de los recursos geotérmicos por Siler y Faulds (2013), quienes definieron como factores geológicos claves para la presencia de este recurso energético la existencia de calor, fluidos y permeabilidad. Esta técnica resulta eficaz para definir zonas en donde están presentes sistemas geotérmicos ciegos u ocultos (*hidden geothermal systems* o *blind geothermal systems*, respectivamente como los define Garg *et al.* 2010). Sobre esta base se sostiene el presente trabajo.

El área estudiada abarca un área de 67.000 km<sup>2</sup> entre los 25°-30° de latitud Sur y 67°-66° de longitud Oeste. Dentro de ella, se efectuó un análisis detallado de la depresión intermontana o cuenca de Pipanaco. Esta depresión se halla rodeada de distintos bloques de las Sierras Pampeanas, como el cordón de Ambato al este, las sierras de Vinquis y Zapata al oeste, la sierra de Velasco al sur y las sierras de Belén y Capillitas al norte.

El estudio específico de potencial geotérmico se enfocó sobre un modelo acorde al marco geológico, de tipo Fajas Plegadas y Corridas en cuenca antepaís (*Fold and Thrust Belt Foreland Basin*.) Específicamente el caracterizado según la clasificación de Moeck (2014) dentro del esquema tipo Faja Orogénica (*Orogenic Belt Type*) (Figura 1). En estos modelos geotérmicos el origen del calor y el mecanismo de calentamiento de posibles reservorios están asociados a procesos tectónicos y estructurales característicos de zonas de subducción con deformación compresiva. Este tipo de configuración geológica es común en márgenes continentales activos, donde las fuerzas tectónicas crean pliegues y cabalgamientos

que generan cadenas montañosas y cuencas de antepaís o *foreland basins* en sus márgenes.

## 2. UBICACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO

El Área 4 analizada se extiende por una faja entre los 25° y los 30° de latitud Sur que se ensancha con límites irregulares entre los 67° y los 66° de longitud Oeste (Figura 2). Abarca el extremo sur de la Cordillera Oriental, el sector norte de las Sierras Pampeanas Noroccidentales en el límite con la Puna y su continuidad al sur hasta cubrir gran parte del Sistema de Famatina. Comprende los bolsones intermontanos de las sierras de Quilmes, Hualfin, Las Cuevas, Belén, Capillitas, Fiambalá, Zapata, Vinquis y Paimán, las vertientes occidentales de los cordones de Aconquija, Ambato y de las Cumbres Calchaquies y engloba a las sierras de Velasco y Famatina. Integra así al extremo sur de los Valles Calchaquies, el valle de Santa María, el Campo del Arenal, los bajos de Santa Elena y su conexión con el bolsón de Fiambalá y la depresión de Pipanaco.

Las rocas aflorantes en el área registran fragmentos de la historia geológica desde el Neoproterozoico (Fauqué *et al.* 2020, Toselli *et al.* 2018, Candiani y Cravero 2017, Fauqué y Caminos 2006, Salfity *et al.* 2006, Hongn *et al.* 2001, González *et al.* 2000, Blasco *et al.* 1994 y referencias citadas). Abundan las metamorfitas neoproterozoicas de medio a alto grado (basamento metamórfico, Figura 3), las metamorfitas de bajo grado y los complejos magmáticos paleozoicos, con fajas de deformación dúctil (milonitas, protomilonitas) famatiniana sobrepuesta. Los granitoides paleozoicos (Figura 3) incluyen aquellos de composición calcoalcalina eopaleozoicos y neopaleozoicos. Las unidades mesozoicas y paleógenas se hallan principalmente expuestas en el sector norte del área, en el ámbito de Cordillera Oriental, con saltauarios afloramientos en el resto de las sierras. Este período se caracteriza por el desarrollo de cuencas extensionales colmatadas durante el Paleógeno, cuyos límites en esta región fueron obliterados por el inicio de la exhumación de bloques, su penplanización y los efectos de la compresión andina. Se destaca el volcanismo neógeno al que se asocian las distintas mineralizaciones de importancia económica como en el distrito Farallón Negro, ubicado al norte de la cuenca Pipanaco. Las acumulaciones sinorogénicas neógenas a cuaternarias rellenaron las distintas depresiones intermontanas y definieron el paisaje actual.

1	Intracratonic Basin Type	Orogenic Belt Type	Basement Type
2	Paris Basin	Unterhaching (Germany)	Habanero (Australia)
3	Intracratonic/Rift basins Passive margin basins	Fold-and-thrust belts Foreland basins	Intrusion in flat terrain Heat producing element rock
4	Sedimentary aquifers Permeability/porosity with depth	Sedimentary aquifers Permeability/porosity with depth Fault and fracture zones	Hot intrusive rock (granite) Low porosity/low permeability Fault and fracture zones
5	hydrothermal	hydrothermal	petrothermal
6	Conduction dominated systems Fault/fracture controlled Litho/biofacies controlled		

Figura 1.: Clasificación de los sistemas geotermales en donde predomina el calor por conducción en ambientes morfoestructurales que contienen cuencas (Moeck 2014).

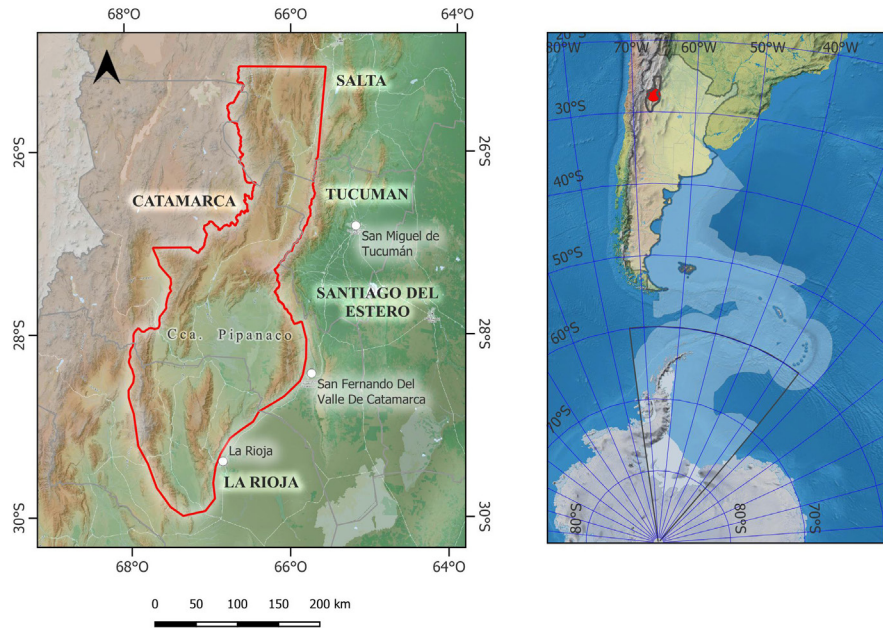


Figura 2. Ubicación del Área 4 en donde se ha realizado el estudio de potencial geotérmico según método *Geothermal Play Fairway Analysis*.

Las evidencias para el análisis GPF del Área 4 se concentraron en los alrededores de la cuenca de Pipanaco una depresión tectónica definida por los márgenes de las sierras de Vinquis, Belén, Capillitas,

Velasco y Ambato. Estas sierras constituyen bloques de las Sierras Pampeanas marginados por fallas inversas de alto ángulo y geometría lítrica (González Bonorino 1950).

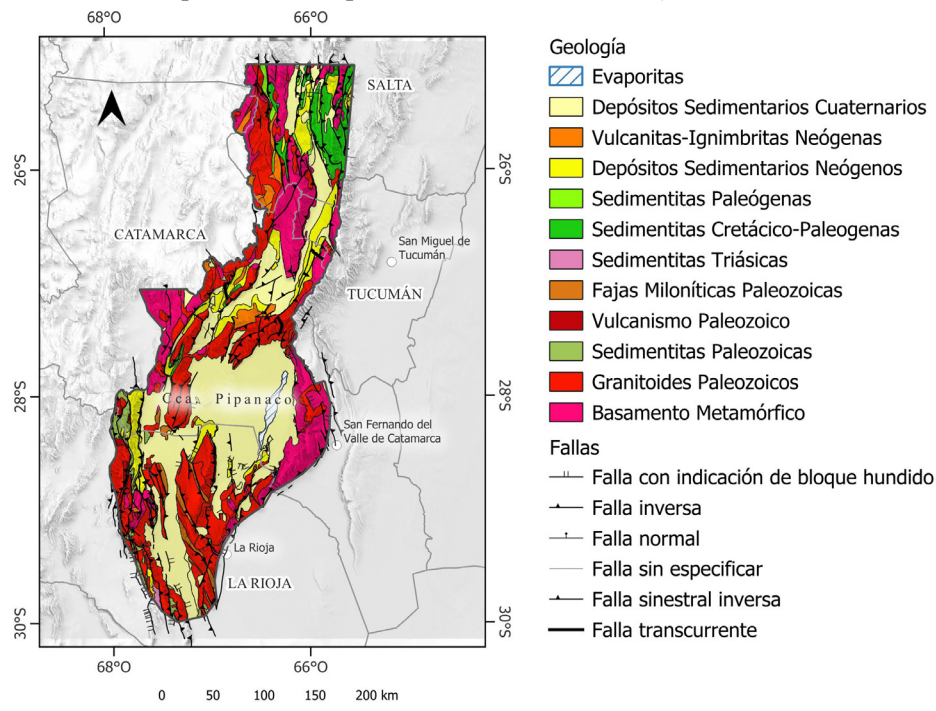


Figura 3. Mapa Geológico. Unidades modificadas de Candiani y Miró (2018).

Alrededor de los 27° de latitud Sur es donde se ubica actualmente la transición entre la inclinación normal de la placa de Nazca y el sector subhorizontal que continúa hacia el sur. La estructuración característica de las Sierras Pampeanas es la que se observa en esta región, donde se acomodan con distinta orientación bloques serranos conformados por rocas del basamento neoproterozoico y paleozoico (Figura 3). La definición de sierras y cuencas ocurrió durante el Mioceno. En la sierra de Ambato fueron identificados al menos dos pulsos principales de levantamiento, alrededor de los ~12 Ma y a los ~7 Ma (Dávila *et al.* 2012, Nóbile y Dávila 2012). Löbens *et al.* (2013) para la sierra de Aconquija propusieron entre 5 km y 8 km de exhumación en los últimos 9 Ma, con un gradiente geotermal entre 20 °C/km y 26 °C/km. Estudios previos indicaron que, en este sector de las Sierras Pampeanas y el sector sur de la Puna, la deformación andina dominante tuvo lugar durante el Plioceno (Marrett *et al.* 1994).

En el borde norte de la cuenca de Pipanaco se observan las variaciones estructurales de la Zona de Transferencia Tucumán (Urreiztieta *et al.* 1996; lineamiento de Tucumán de Mon 1976). Esta franja de alrededor de 100 km de ancho y orientación NE, actuó como una zona transpresiva dextral durante el Neógeno (Jordan *et al.* 1983).

Las evidencias de actividad neotectónica cuaternaria conocidas (Casa *et al.* 2011, 2014; García *et al.* 2017, y referencias citadas) sumadas a las halladas mediante interpretación de imágenes durante el desarrollo de esta investigación, confirman que los bloques de basamento enmarcados en el Área 4 aún continúan levantándose. La propagación y migración de estas fallas afecta los sectores aledaños a los márgenes de los cordones serranos y a las sucesiones sedimentarias que rellenan las depresiones intermontanas.

### 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PLAY FAIRWAY APLICADA AL ÁREA 4

La metodología de ciencia de datos y geoespacial de los *Geothermal Play Fairway Analysis* permite evaluar el potencial geotérmico de una región al integrar múltiples capas de datos y optimizar la identificación de áreas prospectivas para la exploración geotérmica. Este enfoque resulta útil en regiones

donde la estructura geológica y la disponibilidad de datos permiten establecer modelos de exploración basados en algoritmos de inferencias. Se basa en la ponderación de las evidencias consideradas, lo que se conoce como la aplicación del “conocimiento experto”.

Los objetivos de la aplicación del método para el Área 4, al igual que en otras áreas que han sido investigadas en Argentina desde el año 2019 (Asato *et al.* 2020, 2022; Conde Serra *et al.* 2024) son:

- Identificar zonas de alto potencial y favorabilidad de contener recursos geotérmicos sobre la base de la existencia conjunta de tres elementos fundamentales: fuentes de calor, presencia de fluidos y permeabilidad del subsuelo.
- Desarrollar mapas predictivos que resalten los sectores más prometedores para afrontar campañas exploratorias y utilizar modelos de riesgo que permitan una evaluación precisa del recurso.

#### 3.1. MODELO DE ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE DATOS

Para definir el mapa de potencial geotérmico se emplearon distintos modelos de inferencias en tres etapas bien diferenciadas: primero se realizó el modelado de cada subsistema de permeabilidad, fluidos y calor (Siler y Faulds 2013); segundo, la integración de los subsistemas en un modelo de potencial geotérmico según el *Play Fairway* y tercero, la construcción de un mapa de favorabilidad a partir del mapa de potencial geotérmico.

La base de datos que respalda cada subsistema o modelo de subsistema se construyó a partir de conjugar elementos geológicos favorables a la presencia de calor, la existencia de fluidos geotermiales y de todos aquellos componentes estructurales que coadyuvan a la permeabilidad, circulación y/o entrapamiento de los fluidos geotérmicos.

La integración de los mapas de evidencia para el subsistema permeabilidad fue realizada mediante la metodología de inferencias *Index Overlay* (Bonham-Carter *et al.* 1988), tal que:

$$Y = \sum_{i=1}^n (X_i * W_i) \div \sum_{i=1}^n W_i$$

Donde  $Y$  corresponde al subsistema permeabilidad,  $X_i$  a cada mapa de evidencia y  $W_i$  a su peso correspondiente, lo que da como resultado un mo-

delo donde los valores mayores reflejan la posible presencia de mayor permeabilidad.

Cuando se tuvo evidencias claras de los procesos estudiados, se optó por integrar los datos mediante una metodología de inferencia basada en lógica difusa, en donde a las evidencias ciertas se le asigna un valor igual a uno.

Posteriormente, para el esquema de investigación se empleó la siguiente ecuación para generar el modelo del mapa de potencial geotérmico:

$$Z = (Y_{pp} * W_{pp} + Y_{fl} * W_{fl} + Y_c * W_c) \div (W_{pp} + W_{fl} + W_c)$$

Donde  $Z$  corresponde al modelo de potencial geotérmico,  $Y$  a los modelos de subsistemas permeabilidad potencial (pp), calor (c) y fluidos (fl) respectivamente y  $W$  a los pesos de cada subsistema.

Cada mapa de evidencia correspondió a una variable independiente o elemento geológico que caracterizó al sistema geotermal. Dado que la metodología involucrada trata, como ya se ha mencionado, sobre “conocimiento experto”, los pesos asignados a cada mapa de evidencia responden a tasaciones numéricas que se deben a la valorización en lenguaje natural. Es así que un peso igual a cero corresponde a “no favorable” y el resto de valores grabarán en valoraciones intermedias hasta el valor máximo establecido como “muy favorable”.

Se tuvo en cuenta que al calcular el guarismo  $Z$  como una suma ponderada de factores, se generaron modelos de tipo “Voto” es decir, el valor en cada mapa de evidencia tuvo una incidencia directa en el modelo final. Si bien no fue considerado, una manera diferente de evaluación lo constituye el modelo de inferencias basado en productos ponderados a partir de modelos de tipo “Veto”. Pero su aplicación hubiese implicado que un valor bajo de alguno de los modelos (calor, permeabilidad, fluidos), generaría valores bajos de potencial. En ese sentido la ausencia de uno de los modelos directamente anula a los otros dos, poniendo el valor del mapa de potencial en cero.

Por otra parte, cuando se afrontó la favorabilidad geotérmica como ha sido previsto existe cierta variabilidad entre los datos que corresponden a un mismo grado de favorabilidad. Para ello se aplicó la optimización de Jenks para determinar el mejor agrupamiento y discriminación de datos en diferentes clases. Fue así en razón de que el algoritmo busca minimizar la varianza en cada clase y por otro lado maximizar la distancia entre clases mejorando su distinción.

## 4. ZONAS DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA DEL ÁREA 4

### 4.1. MODELO DEL SUBSISTEMA CALOR

En regiones como la Cuenca de Pipanaco, donde no existen evidencias directas de fuentes de calor superficiales asociadas al vulcanismo activo, es necesario recurrir a análisis indirectos y modelos geológicos para interpretar la posible existencia de un calor profundo. Este capítulo aborda las evidencias geofísicas y geológicas conexas disponibles y plantea hipótesis que sustentan la presencia de calor.

#### 4.1.1. EVIDENCIAS SÍSMICAS

El análisis del nido sísmico de Pipanaco destacó una concentración de sismos en la mitad norte de la depresión de Pipanaco con profundidades superiores a 125 kilómetros. Estas concentraciones fueron interpretadas como resultado de un arqueamiento de la placa de Nazca, en el segmento de transición, entre la subducción subhorizontal al sur y la normal al norte, ubicado alrededor de los 28° S (Mulcahy *et al.* 2014).

El modelo sugiere que este cambio en la geometría de la subducción genera empujes adicionales dentro de la placa y aumenta la presión de fluidos debido a procesos de deshidratación. Este fenómeno, conocido como fragilización por deshidratación (Hacker *et al.* 2003), puede contribuir a un incremento de calor por mecanismos convectivos en la cuña de manto.

#### 4.1.2. TOMOGRAFÍA SÍSMICA

Los estudios de tomografía sísmica realizados por Liang *et al.* (2014) revelaron una región de atenuación significativa (bajo factor  $Q_p$ ) en la cuña de manto. Estas anomalías de atenuación son consistentes con la presencia de material parcialmente fundido o zonas de alta temperatura, lo que refuerza la hipótesis de un entorno térmico favorable.

#### 4.1.3. MODELOS DE DELAMINACIÓN LITOSFÉRICA

Kay *et al.* (1994) y Kay y Coira (2009) propusieron que la pérdida de la litósfera continental debido a procesos de delaminación en la Puna podría generar fusión parcial en el manto por descompresión. Este

fenómeno explicaría las altas temperaturas del manto en áreas cercanas, incluso en ausencia de actividad magmática superficial evidente.

Entonces, sobre la base de lo expuesto se proponen las siguientes hipótesis sobre el Subsistema Calor del Área 4:

- Hipótesis de deshidratación y fragilización: La subducción de la placa de Nazca, especialmente en su segmento de transición, genera procesos de deshidratación mineral que liberan fluidos al manto superior. Este aporte incrementa el flujo térmico por convección en la cuña de manto.
- Hipótesis de delaminación litosférica: La delaminación de la litósfera continental bajo la región de la Puna ha permitido un ascenso del manto caliente produciendo anomalías térmicas que se extienden hacia el sur, hasta la Cuenca de Pipanaco.
- Hipótesis combinada: La interacción entre la deshidratación inducida por subducción y los procesos de delaminación litosférica crea un entorno térmico complejo. Esta combinación podría sustentar sistemas geotérmicos de baja a media entalpía, especialmente en sectores con estructuras permeables. Se prevé que el horizonte de alta entalpía se halle a profundidades significativas.

Si bien las evidencias son indirectas, la combinación de anomalías sísmicas, térmicas y modelos tectónicos sugiere la posibilidad de una fuente de calor profunda en la Cuenca de Pipanaco relacionada a procesos tectónicos y termales como resultado de la subducción de la placa de Nazca y la delaminación litosférica. La fricción tectónica es una condición posible para tener un gradiente geotérmico anómalo para este tipo de modelos en ambientes del tipo Faja Plegada y Corrida en Cuenca de Antepaís (*Fold and Thrust Belt Foreland Basin*). En las zonas de fracturación se concentrarían focos caloríficos a partir de los cuales el calor puede ser transmitido por conducción y convección impactando en las unidades sedimentarias que hospedan acuíferos, todo ello en el ámbito de la cuenca en cuestión. En ese sentido la conducción térmica ocurriría entre las unidades del basamento ígneo-metamórfico y las capas sedimentarias de manera gradada. Desde el punto de vista del estado entálpico la aislación térmica que genera la columna litológica (*caprock*) causaría un entrampamiento del calor específicamente en aquellos acuíferos que se hallan sobreyacentes al basamento. La presencia de fallas sumaría calor

convectivo transportado por fluidos provenientes de profundidades kilométricas. Esta sinergia calórica contribuiría a mejorar los estados entálpicos de los acuíferos, especialmente aquellos ubicados en las mayores profundidades de la Cuenca de Pipanaco.

La ausencia de un magmatismo definido conlleva a pensar que es el agua meteórica la única responsable de alcanzar esas grandes profundidades y transportar el calor. No se cuenta con evidencias de fluidos de otra procedencia.

## 4.2. MODELO DEL SUBSISTEMA FLUIDOS

Se recopilaron y analizaron para la zona de estudio un total de 89 sitios con datos físicos, químicos e isotópicos, de manantiales, perforaciones, pozos y vertientes (Consultora ESIN 1983, Carrizo 2013, Carrizo *et al.* 2025, Lopez Vazquez *et al.* 2006, Reinoso Carbonell 2023, Falcón *et al.* 2015, Cisterna *et al.* 2017, Pesce y Miranda 1997, 2003).

Para las interpretaciones hidroquímicas se consideraron todos los registros con un balance iónico aceptable (hasta  $\pm 10\%$ ).

Dada la cantidad de información, y la amplitud geográfica, se procedió a establecer cuatro áreas (Áreas A, B, C y D) (Figura 4) para una mejor interpretación de los resultados. Así mismo para graficar las características hidroquímicas de cada sitio, en la Cuadro 1 se presentan nuevos códigos de identificación (ID) estableciendo similitudes con los códigos utilizados por los autores en sus respectivas publicaciones (ID Fuente).

### 4.2.1. ZONA A

En el interior de la caldera volcánica (Figura 5) del Complejo Volcánico Farallón Negro (CVFN) existen los antecedentes de dos manantiales con surgencia termal (ID 15,16,17,18) y una perforación (ID 19) que intercepta un acuífero de alta temperatura. Todas son aguas sulfatadas bicarbonatadas sódicas (Figura 6 y 7), con pH neutro a levemente alcalino, conductividad eléctrica (CE) entre los 1319  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 2870  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y temperaturas entre 18,1 °C y 53,8 grados centígrados.

En el sector de la sierra de Hualfín, tanto en su ladera oriental como occidental y en las quebradas formadas por los ríos Las Zanjas y Villa Vil, existen una serie de manifestaciones termales que brotan entre las diaclasas del *stock* ígneo o en contactos litológicos. En este sector las manifestaciones ter-

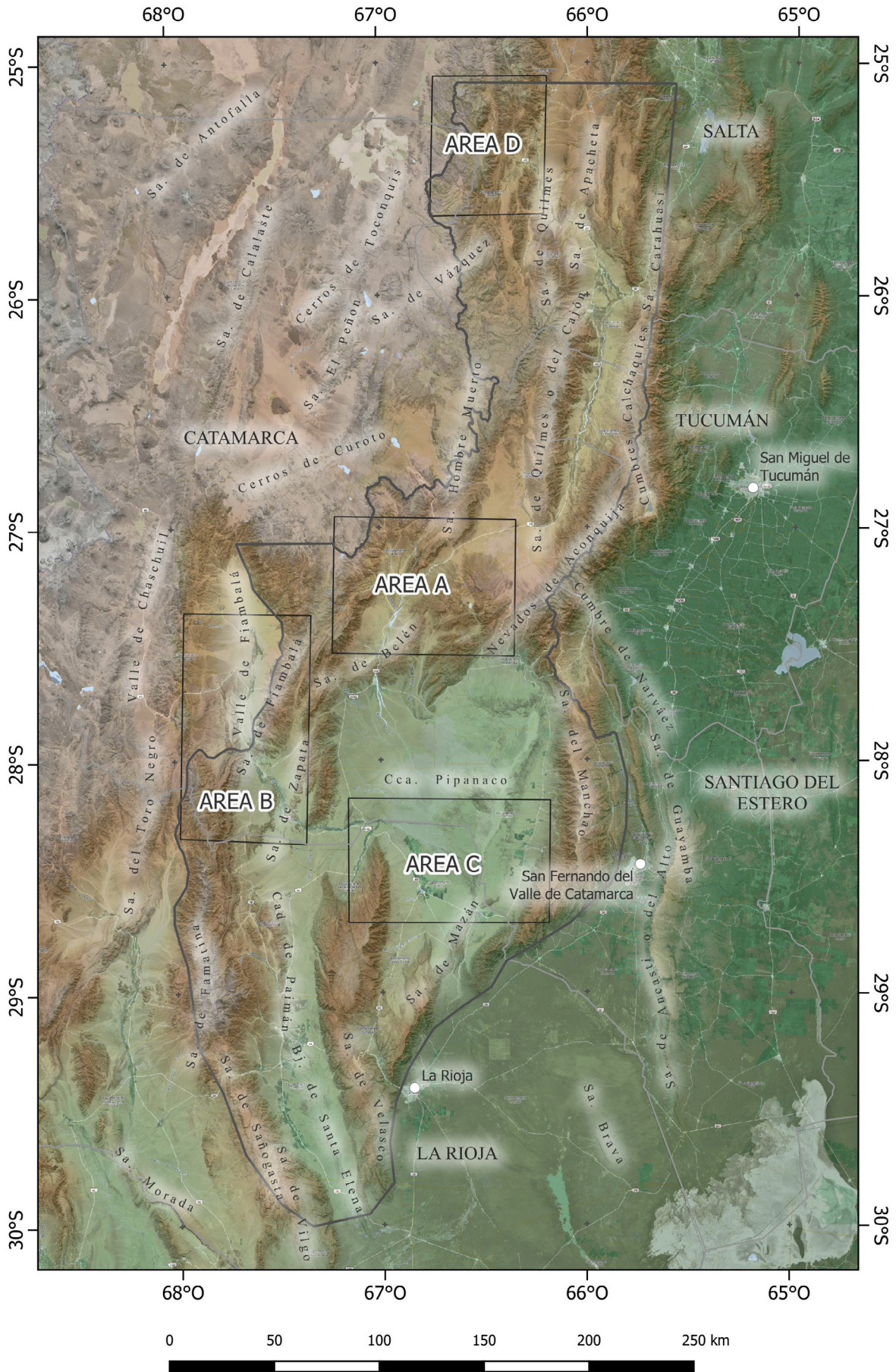


Figura 4. Áreas delimitadas para el análisis de los manantiales termales.

ZONA A			ZONA B			ZONA C			ZONA C		
ID	ID-FUENTE	REFERENCIA	ID	ID-FUENTE	REFERENCIA	ID	ID-FUENTE	REFERENCIA	ID	ID-FUENTE	REFERENCIA
1	11301	ESIN_1983	21	VS	Reinoso Carbonell 2023	27	ST-001a	SEGEMAR 1997	88	S-38-1	Pesce Miranda 2023
2	E251	Carrizo 2013	22	VF	Reinoso Carbonell 2023	28	ST-002	SEGEMAR 1997	89	S-37-2	Pesce Miranda 2023
3	11201	ESIN_1983	23	TF01	Carrizo 2025	29	ST-003	SEGEMAR 1997			
4	E254	Carrizo 2013	24	VLA	Reinoso Carbonell 2023	30	ST-004	SEGEMAR 1997			
5	w01	Carrizo 2025	25	LA01	Carrizo 2025	31	ST-005	SEGEMAR 1997			
6	w02	Carrizo 2025	26	CA-27-2	Pesce Miranda 2023	32	ST-006	SEGEMAR 1997			
7	E253	Carrizo 2013				33	ST-007	SEGEMAR 1997			
8	LNO1	Carrizo 2025				34	ST-008	SEGEMAR 1997			
9	W-02	Cistema 2017				35	ST-009	SEGEMAR 1997			
10	W-01	Cistema 2017				36	ST-010	SEGEMAR 1997			
11	W-03	Cistema 2017				43	ST-019	SEGEMAR 1997			
12	10701	ESIN_1983				49	ST-026	SEGEMAR 1997			
13	E250	Carrizo 2013				50	ST-029	SEGEMAR 1997			
14	11101	ESIN_1983 Carrizo 2013				60	ST-047	SEGEMAR 1997			
15	E255	Carrizo 2013				61	ST-048	SEGEMAR 1997			
16	ADO1	Carrizo 2025				62	ST-049	SEGEMAR 1997			
17	ADO2	Carrizo 2025				63	ST-050	SEGEMAR 1997			
18	E272	Carrizo 2013				64	ST-051	SEGEMAR 1997			
19	MYO8-sub	Lopez_Vazques 2006				65	ST-054	SEGEMAR 1997			
20	20101	ESIN_1983									

Cuadro 1. Características hidroquímicas de cada sitio. (ID): códigos de identificación utilizados en este trabajo. (ID Fuente): códigos de identificación utilizados en otras publicaciones.

males se agrupan en tres tipos de agua (Figura 6 y 7): bicarbonatada clorurada sódica (ID 1), clorurada sulfatada sódica (ID 2, 3, 13) y bicarbonatada sódica (ID 4, 5, 6, 7, 8, 12, 14). El pH es ligeramente ácido a alcalino (6,27-8,96), la CE varía entre 380  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 2930  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y la temperatura, entre 26,1  $^{\circ}\text{C}$  y 63,2 grados centígrados.

Asimismo, cerca del pueblo de Villa Vil y hacia el noroeste, camino a Los Castillos, existen pequeños alumbramientos de agua en forma de “volcancitos

de barro” de carácter bicarbonatada clorurada sódica (ID 9, 10, 11) (Figura 6 y 7) con pH levemente ácido a neutro, CE con máximos de 7750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y temperatura relativamente baja, entre 17,2  $^{\circ}\text{C}$  y 24,2 grados centígrados.

Al sur de los sectores antes mencionados, se encuentra un manantial en la localidad de La Ciénaga, en las terrazas del río Belén, del tipo bicarbonatado sódico cálcico (ID 20) (Figura 6 y 7), con pH 7,8, CE 702  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y temperatura de 28,8  $^{\circ}\text{C}$ .

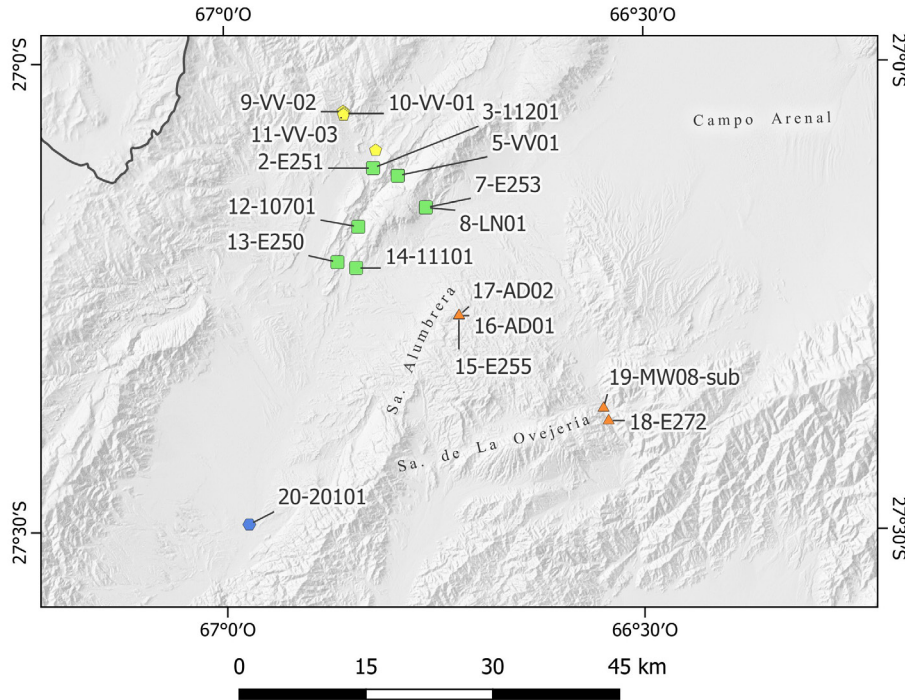


Figura 5. Ubicación de manantiales termales y perforación, considerados en la zona A. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

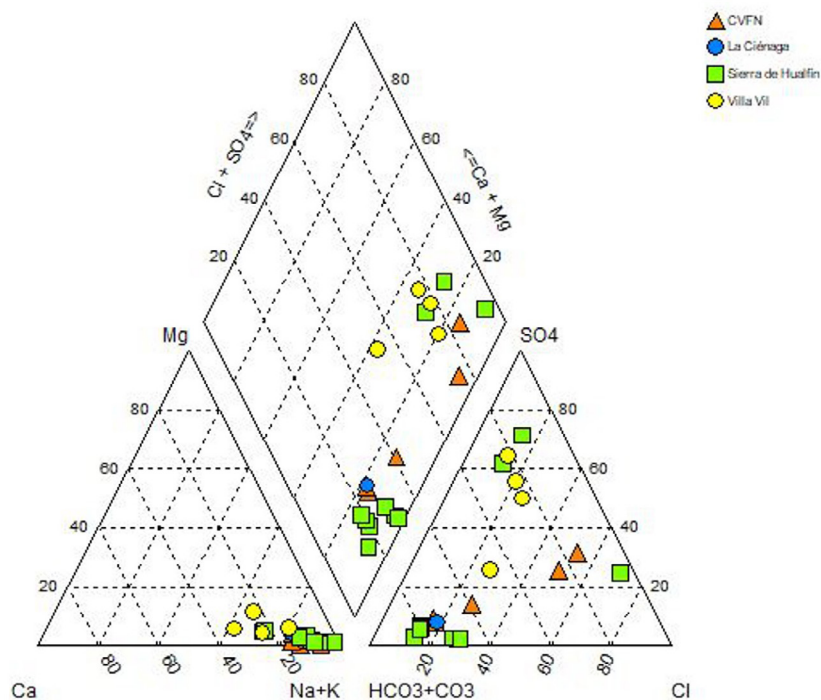


Figura 6. Diagrama de Piper de clasificación de aguas para la zona A. Concentraciones expresadas en meq/L. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

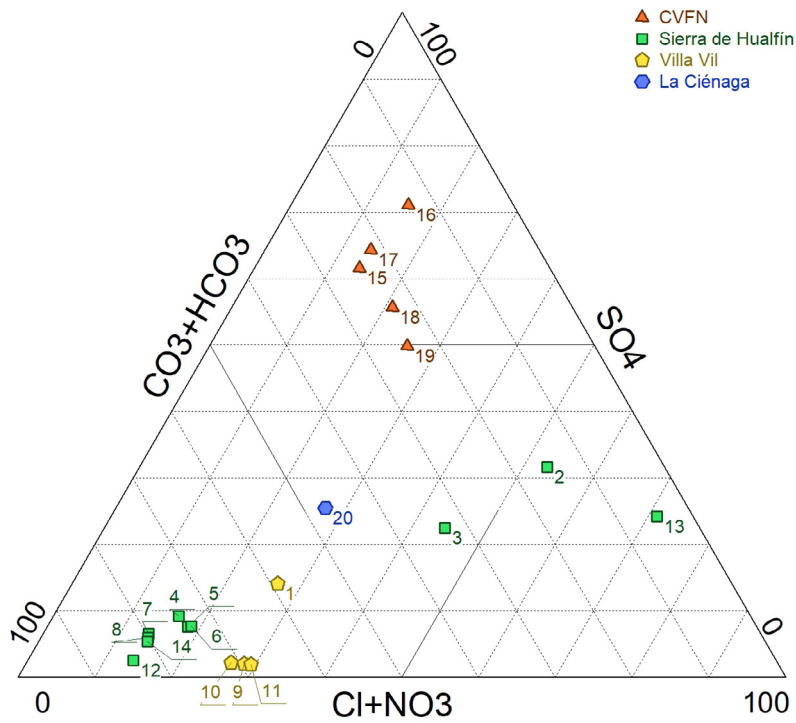


Figura 7. Diagrama ternario para aniones mayoritarios para la zona de estudio. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

Respecto a los resultados isotópicos (Figura 8), los valores de  $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}\text{-H}_2\text{O}$  se encuentran entre -4,21‰ vs. V-SMOW y -21,1 ‰ vs. V-SMOW (ID 2) y entre -6,54‰ vs. V-SMOW y -40,4 ‰ vs. V-SMOW (ID 19) respectivamente.

Excepto las muestras 13 y 20, el resto se encuentran desplazadas de la línea meteórica global (línea negra en la Figura 8), indicando un desplazamiento hacia una posible línea meteórica local (muestras 1, 2, 15, 19).

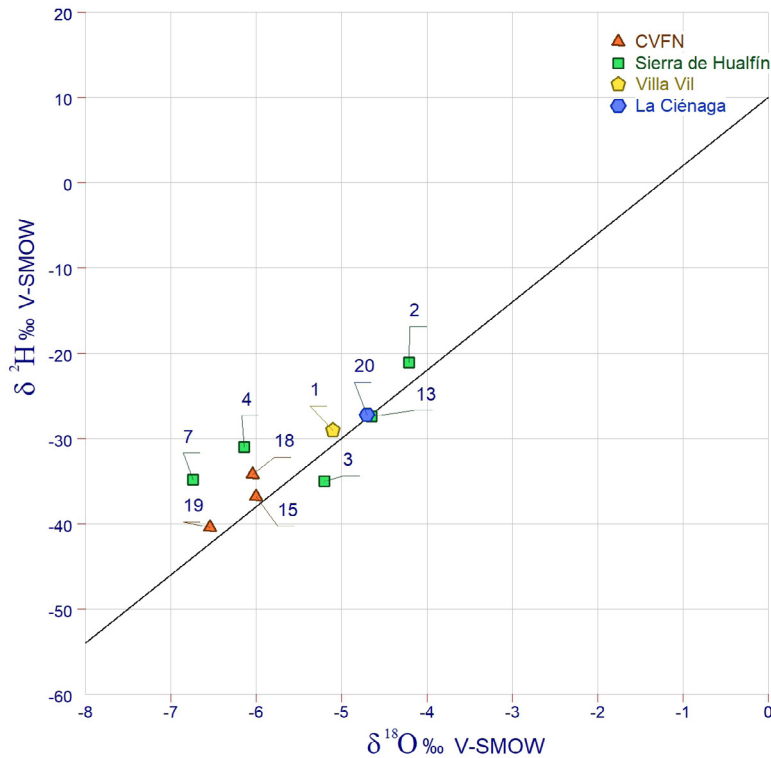


Figura 8. Diagrama binario  $\delta^2\text{H}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$  para las muestras de la Zona A. Se indica la Recta Meteórica Global (RMG) con línea negra:  $\delta^2\text{H}\text{‰} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O}\text{‰} + 10$  (Craig 1961). Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

El diagrama de Giggenbach (Figura 9) indica que las muestras del CVFN (triángulos naranja) y La Ciénaga (círculo azul) presentan una mayor componente de agua meteórica, volviéndolas aguas inmaduras. Las muestras de la Sierra de Hualfín (cuadrados verdes) presentan una mejor evolución hacia el campo de aguas en equilibrio parcial, en contraste con las muestras 9, 10 y 11 de Villa Vil (Círculos amarillos), que se ubican en el mismo campo, pero debido a la

alta concentración iónica más que a una evolución hacia aguas maduras.

Las temperaturas geotermométricas calculadas con este diagrama, establece temperaturas de reservorio menores a 140 °C en contraste con las temperaturas obtenidas mediante geotermometría de sílice (Figura 10) que estima temperaturas entre 53,6 °C y 111,7 °C para la sierra de Hualfín, entre 25,2 °C y 64,5 °C para Villa Vil, entre 64,3 °C y 69,8 °C para el CVFN y 70,9 °C para La Ciénaga.

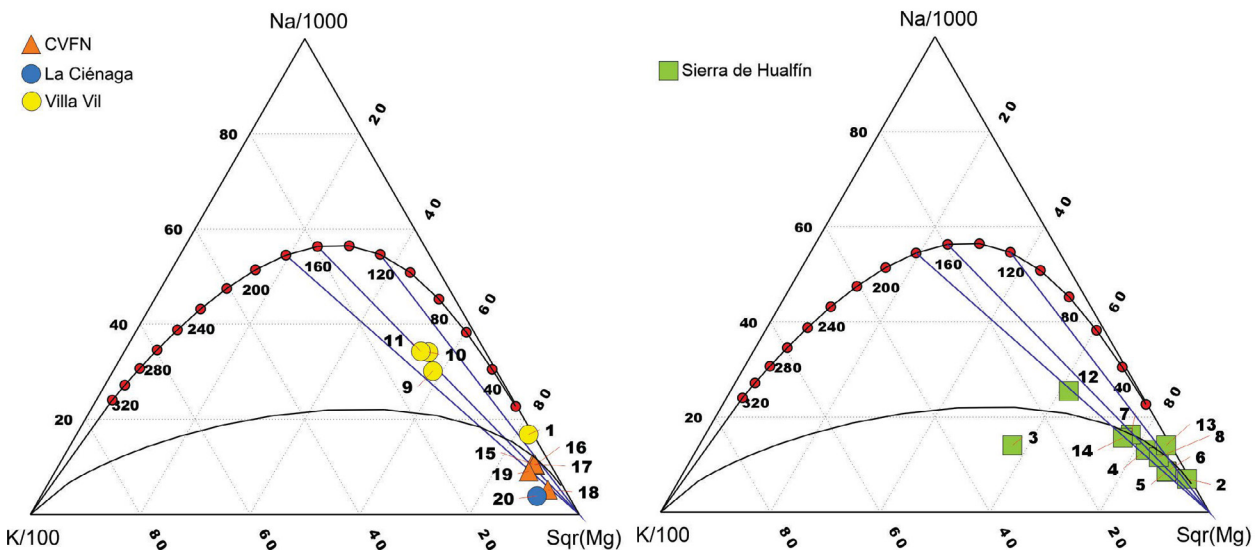


Figura 9. Diagrama de Giggenbach (1988) para los sitios de estudio de la Zona A. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

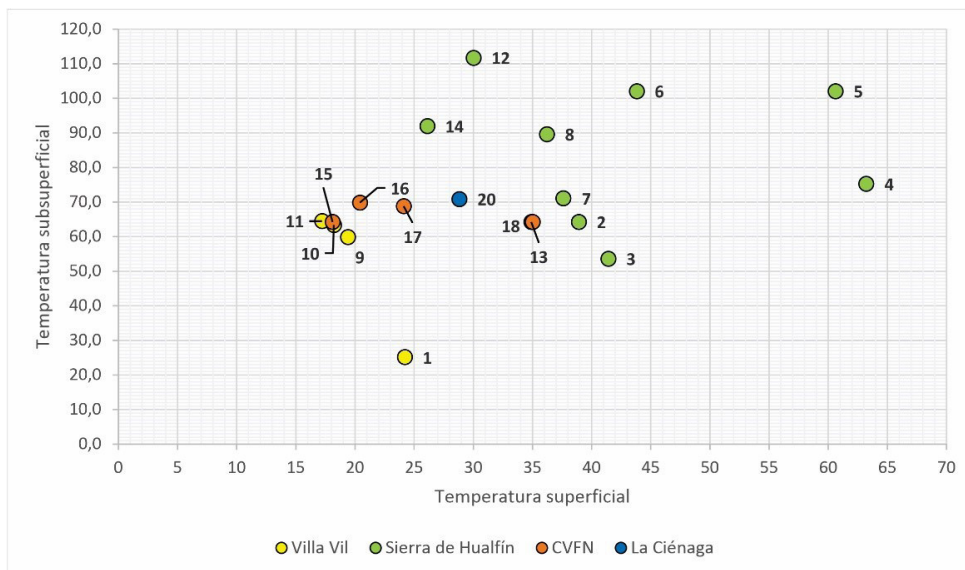


Figura 10. Diagrama binario: temperatura subsuperficial estimada mediante el geotermómetro de calcedonia en función de la temperatura medida en superficie. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

4.2.2. ZONA B

En el sector central, este y sur del bolsón de Fiambalá, son conocidas los manantiales termales en la Sierra de Fiambalá (VS-TF01), en Saujil (VS), La Aguadita (VLA-LA01) y La Higuera (CA-27-2) (Figura 11). Para este trabajo se considerará como Bolsón de Fiambalá Norte (BFN) a los dos primeros manantiales y como Bolsón de Fiambalá Sur (BFS) a los demás.

Las surgencias termales del BFN son bicarbonatadas sódicas (ID 21) y mezcla entre sulfatadas (cloruradas) bicarbonatadas sódicas (ID 22 y 23) (Figura 12); las temperaturas están comprendidas entre 23 °C y 56,7 °C, el pH varía de 7,8 a 8,29 y la CE entre 479 µS/cm y 775 µS/cm. Los manantiales del BFS, relacionados a la sierra de Las Planchadas-Narváez son sulfatados sódicos cálcicos (ID 24, 25 y 26) con temperaturas que oscilan entre 28,5 °C y 31,7 °C, pH levemente alcalino y CE entre 1010 µS/cm y 1311 µS/cm.

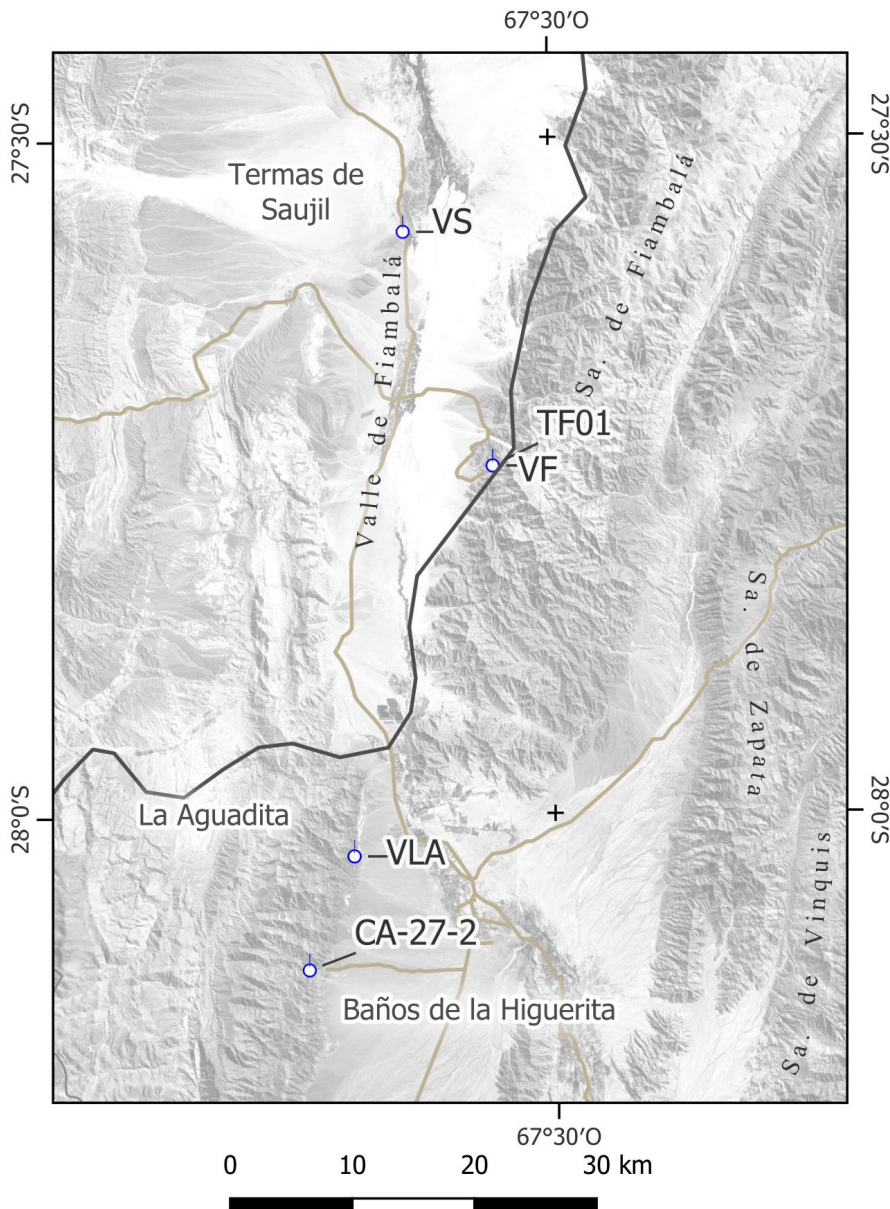


Figura 11. Ubicación de manantiales termales considerados en la zona B. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en el Cuadro 1.

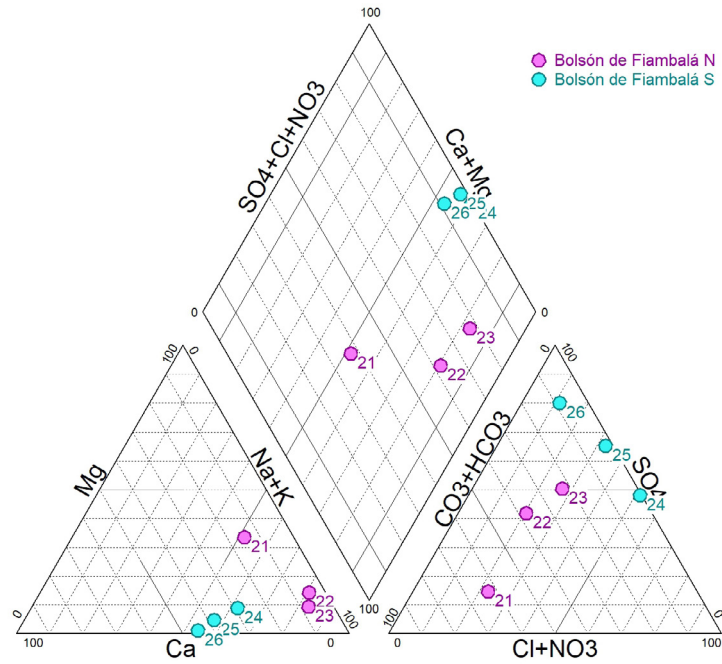


Figura 12. Diagrama de Piper de clasificación de aguas para la zona B. Con concentraciones expresadas en meq/L. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

Los valores isotópicos para la Zona B, más empobrecidos en  $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}\text{-H}_2\text{O}$  corresponden a las Termas de Fiambalá (ID 22) con  $-7,18\%$  vs. V-SMOW y  $-43,9\%$  vs. V-SMOW respectivamente, en contraste con los valores más enriquecidos que corresponden a La Higuera (ID 26) con valores de  $-4,5\%$  vs. V-SMOW y  $-24\%$  vs. V-SMOW.

Al representar la Línea Meteorológica Global (LMG) (línea negra) en el gráfico de la figura 13, los sitios

de estudio muestran una tendencia positiva pero desplazada de esta, constituyendo una posible recta meteórica local, en contraste con los valores isotópicos para algunos ríos de la zona norte del Bolsón reportados por Ostera *et al.* (2005) que se ajustan a la LMG. Probablemente el agua que recarga los acuíferos termales, no sería precisamente el agua que circula superficialmente o la recarga provendría de sectores de mayor altura respecto al nivel del mar.

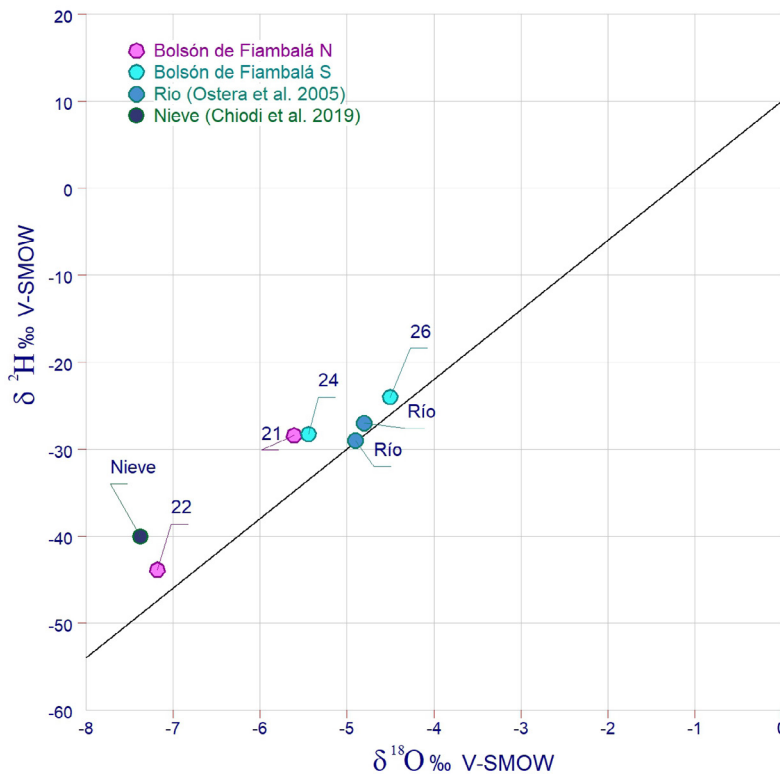


Figura 13. Diagrama binario  $\delta\text{D}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$  para las muestras de la Zona B. Se indica la línea meteórica global en negro:  $\delta^2\text{H}\text{‰} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O}\text{‰} + 10$  (Craig 1961). Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

En el diagrama de Giggenbach (Figura 14) se observa que las muestras están enriquecidas en Mg, sugiriendo que el origen de los manantiales tiene un elevado componente de aguas meteóricas, es decir son aguas inmaduras. Esto condiciona que el cálculo geotermométrico de los reservorios, mediante geoter-

metría catiónica arrojen valores poco confiables, por lo tanto, utilizar la concentración de sílice para los cálculos, sería lo más adecuado. En la figura 15 se observa que las temperaturas de surgencia respecto a las calculadas, están comprendidas entre 79 °C y 99 °C para el BFN y entre 31 °C y 56 °C para el BFS.

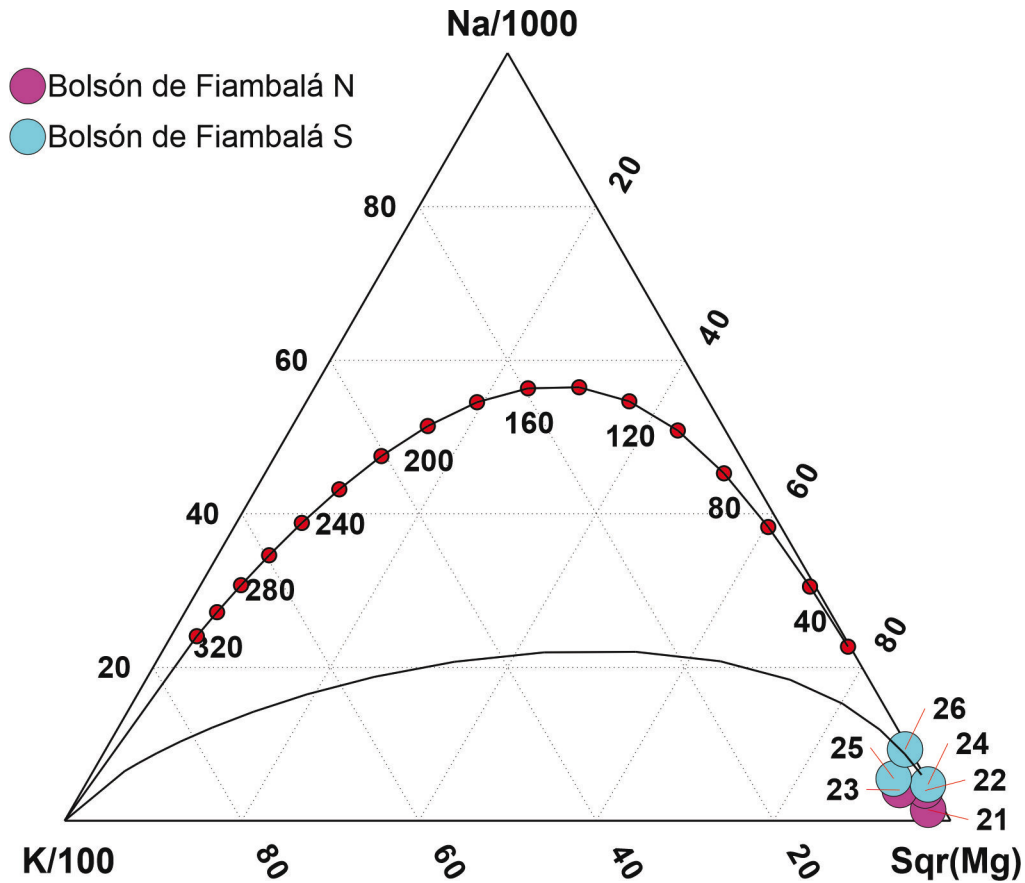


Figura 14. Diagrama de Giggenbach (1988) para los sitios de estudio de la Zona B. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

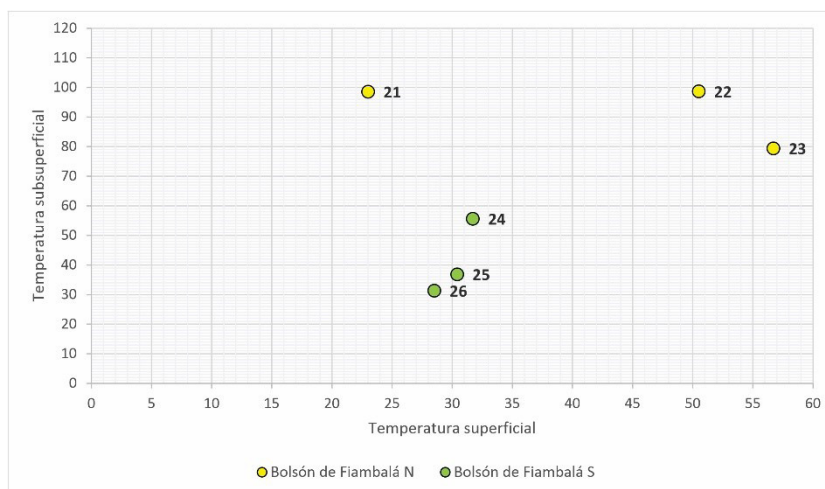


Figura 15 Diagrama binario: temperatura subsuperficial estimada mediante el geotermómetro de calcedonia en función de la temperatura medida en superficie. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

### 4.2.3. ZONA C

Esta zona abarca el sector sur de la depresión de Pípanaco, entre las sierras de Velasco por el oeste y Ambato por el este. A diferencia de las zonas analizadas previamente, en este sector, los registros de perforaciones y pozos respecto a los manantiales son ampliamente superiores. Para una mejor caracterización química del agua termal de la zona, se establecieron 7 grupos: Aimogasta-Bañado del Pantano, Suriyaco, Culanao, La Chilca, Villa Mazan, Santa Teresita y Puesto Burruyaco (Figuras 16 y 17).

El grupo Santa Teresita se caracteriza por una variedad de perforaciones y pozos cavados a profundidades entre 48 y 180 metros que alumbran aguas con temperaturas que oscilan entre 34,8 °C y 46,1 °C, conductividades eléctricas (CE) entre 223  $\mu\text{S/cm}$  y 1380  $\mu\text{S/cm}$  y pH entre 7,97 y 9,63 a diferencia de los manantiales (ID 32, 49, 61-65) cuyas temperaturas son menores (22,5 °C -34,4 °C), las CE mayores (678  $\mu\text{S/cm}$ -1820  $\mu\text{S/cm}$ ) y el pH semejante (8,12-9,82). Las muestras pueden ser caracterizadas

en dos grupos principales: aguas cloruradas sódicas y aguas cloruradas-sulfatadas sódicas (Figura 18).

Para el grupo Culanao el agua de los pozos y perforaciones surge a temperaturas comprendidas entre 36,3 °C y 40 °C, similares a los manantiales (ID 53 y 80) (30,3 °C y 37,5 °C). Las CE también son aproximadamente parecidas, aunque para los manantiales el máximo medido es significativamente superior (404  $\mu\text{S/cm}$ -548  $\mu\text{S/cm}$  y 375  $\mu\text{S/cm}$ -1460  $\mu\text{S/cm}$ , respectivamente); el pH para ambos casos está entre valores de 8,48 y 9,37.

Las muestras se caracterizan por ser principalmente aguas bicarbonatadas sulfatadas sódicas, aunque algunas se clasifican como bicarbonatadas, sulfatadas-cloruradas y cloruradas, todas con sodio dominante (Figura 19).

En el grupo La Chilca solo se reconocieron pozos y perforaciones con aguas a temperaturas que varían entre 32,2 °C y 48,2 °C, pH entre 7,97 y 9,15 y CE entre 460 y 1030  $\mu\text{S/cm}$ . El agua se clasifica como clorurada-sulfatada y sulfatada-clorurada, sódicas para ambos casos (Figura 19).

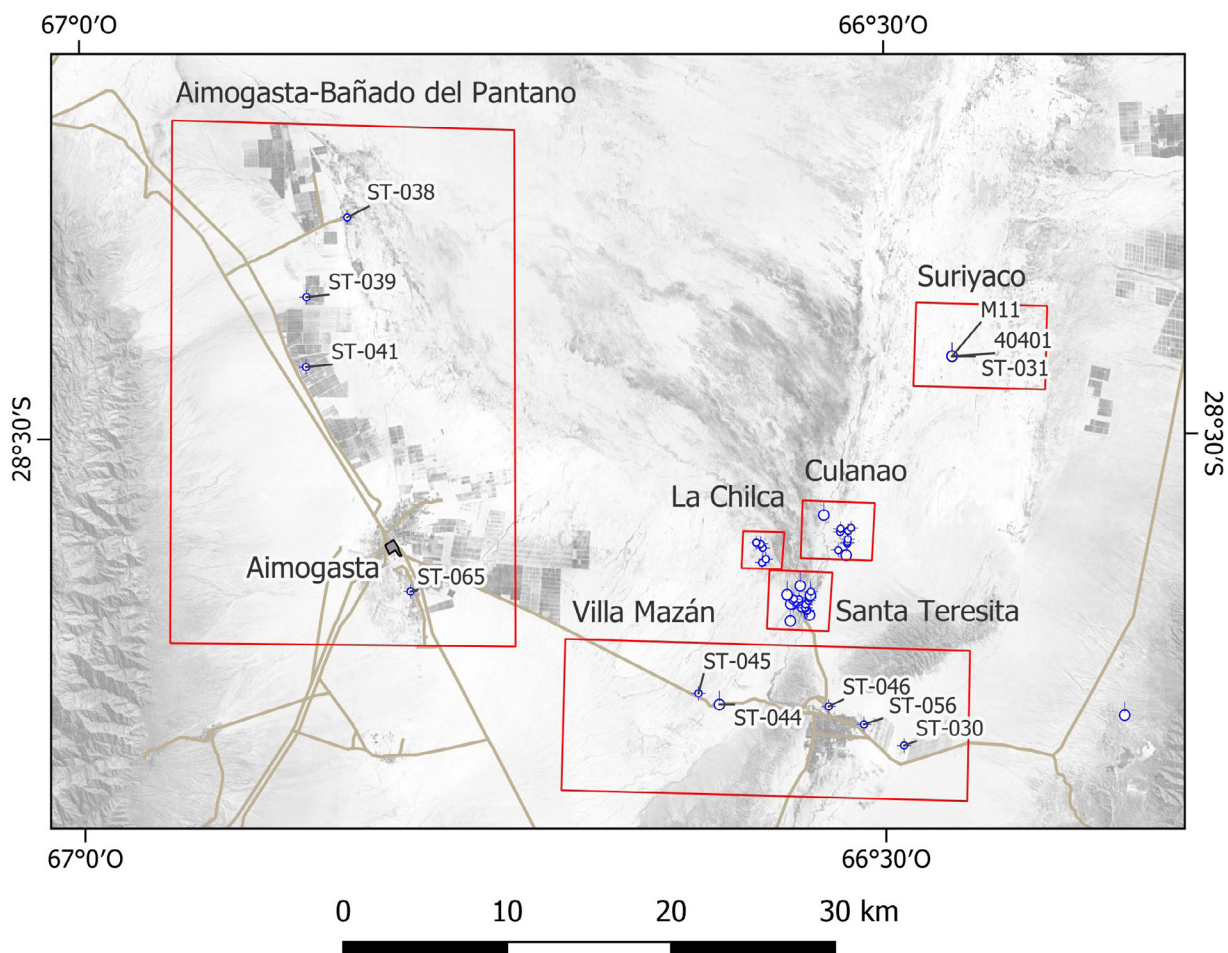


Figura 16. Ubicación de manantiales, perforaciones y pozos termales considerados en la zona C. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

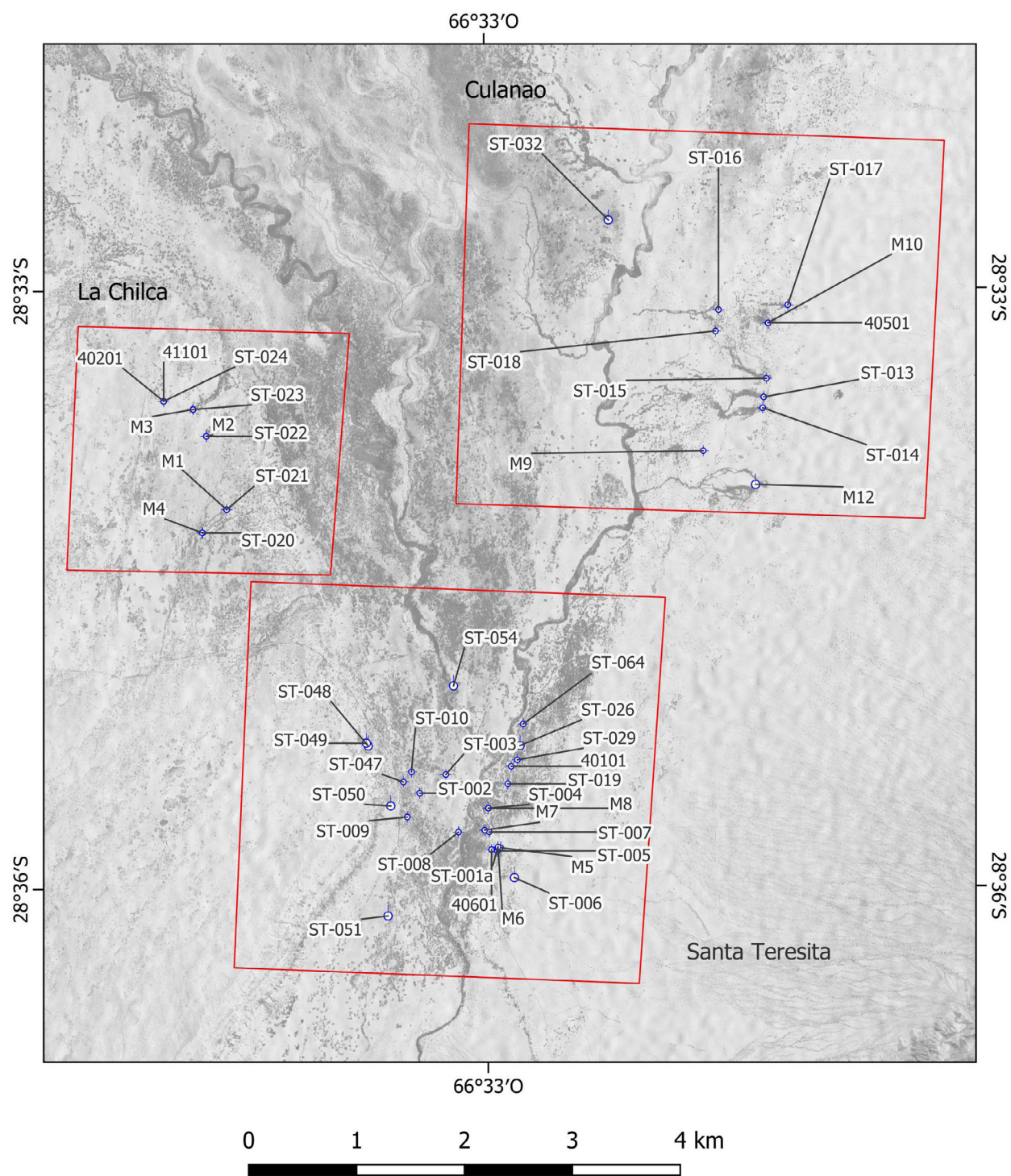


Figura 17. Acercamiento de la figura 16 para los grupos La Chilca, Culanao y Santa Teresita. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

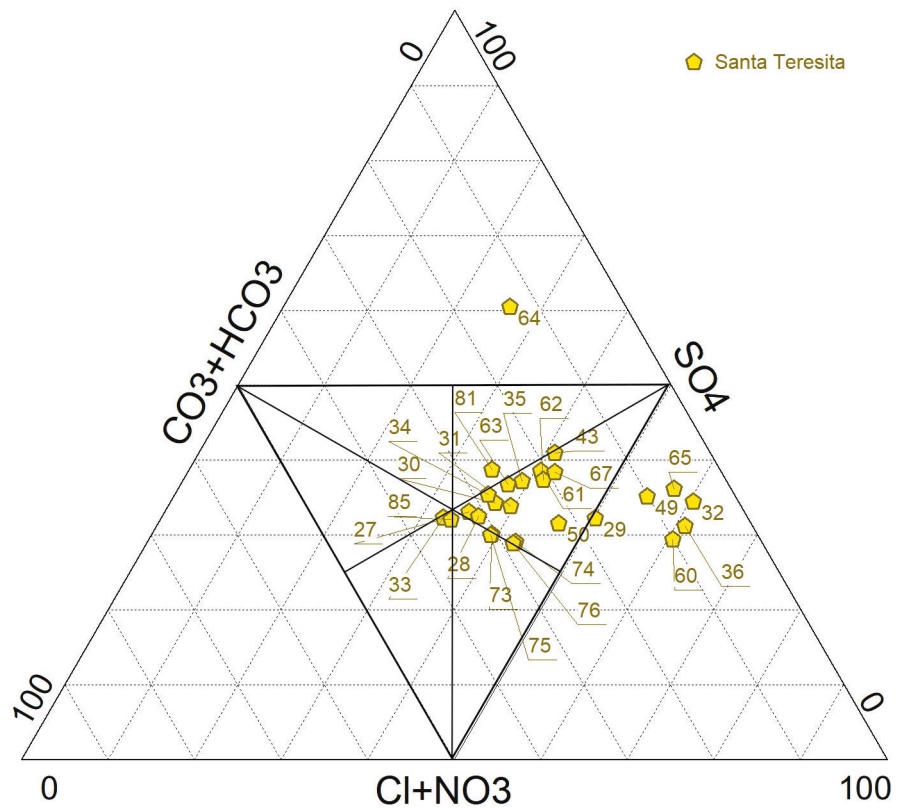


Figura 18. Diagrama ternario de aniones mayoritarios para el grupo Santa Teresita. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

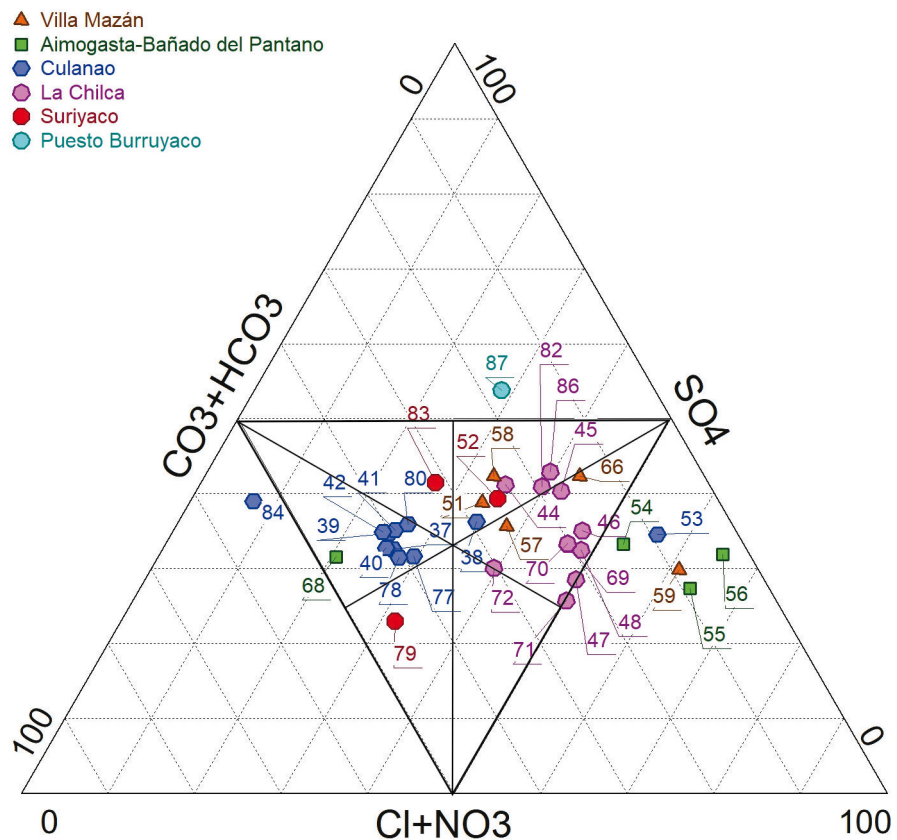


Figura 19. Diagrama ternario de aniones mayoritarios para los grupos Villa Mazan, Aimogasta-Bañado del Pantano, Culanao, La Chilca, Suriyaco y Puesto Burruyaco. Ver referencias de códigos de identificación (ID) en la Cuadro 1.

Los pozos y perforaciones ubicados en el grupo Villa Mazán, con profundidades de hasta 140 m, registran temperaturas que varían entre 24,5 °C y 30,4 °C, pH entre 7,6 y 8,2 y CE entre 806  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1440  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en boca de pozo. El único manantial mencionado en la bibliografía (ID 57) surge en superficie a 32 °C, pH 8,55 y CE 963  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El agua del grupo Villa Mazan, se clasifica como clorurada sódica, clorurada-sulfatada y sulfatada-clorurada con sodio dominante (Figura 19).

En el grupo Aimogasta-Bañado del Pantano, se localizan perforaciones con profundidades entre los 50 y 220 metros cuyas temperaturas medidas en boca de pozo alcanzan rangos entre 22,3 °C y 40 °C, las conductividades eléctricas varían de 574  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y los pH entre 7,87 y 9,18. Los tipos de agua son principalmente cloruradas sódicas y bicarbonatadas-sulfatadas sódicas (Figura 19).

El grupo Suriyaco se destaca por la presencia de un manantial muestreado por diferentes autores, en distintos años, cuyos parámetros medidos en el lugar no varían mucho entre ellos. En promedio la temperatura del agua es de 34,8°C, el pH 9,11 y la CE 673  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Las que si presenta diferencias significativas son las concentraciones de aniones y cationes ocasionando diferencias en la clasificación química del agua entre tipos sulfatados clorurados, sulfatados bicarbonatados y bicarbonatados clorurados, todos con sodio dominante (Figura 19).

El manantial del Puesto Burruyacu emerge con 20 °C, pH 7,26 y CE de 2860  $\mu\text{S}/\text{cm}$  clasificándose como sulfatada sódica (Figura 19).

En el diagrama de Giggenbach (Figura 20), los sitios de la zona C se agruparon en el campo de aguas inmaduras y en el de equilibrio parcial en su gran mayoría. Las muestras del grupo Culanao y Aimogasta-Bañado del Pantano, representan aguas con mayor contenido de Mg siendo las más inmaduras de la zona C. Un poco más evolucionadas, pero dentro del mismo campo, son las muestras del grupo Villa Mazan, Suriyaco y la mayoría de Santa Teresita. Solo algunas muestras (ID 30, 84,

59, 81, 27, 83, 86, 82) se localizan en el campo de equilibrio parcial considerando para este grupo temperaturas de reservorio, inferiores a 150 °C. La muestra ID 85 en Santa Teresita parece ser el agua con mayor evolución (ubicada en el campo de equilibrio total) a la cual le corresponde una temperatura de 135 °C.

Para analizar la temperatura subsuperficial se tuvieron en cuenta las muestras que se encuentran en el campo de equilibrio parcial (Figura 20) y se calculó la geotermometría de sílice y los catiónicos. Los geotermómetros más apropiados para el uso en estos casos son los de Calcedonia y con reservas los de Na-K-Ca.

Para el grupo Villa Mazan (ID 59) el método geotermométrico más confiable fue el basado en la relación Na-K-Ca-Mg, arrojando una temperatura de 61 °C, con valores máximos de hasta 130 °C según el geotermómetro Na-K-Ca. Por otro lado, en el grupo Aimogasta-Bañado del Pantano (ID 56) se estimaron a partir del geotermómetro Na-K-Ca una temperatura de 56 °C en concordancia con Culanao (ID 84) donde con ambos geotermómetros las temperaturas son de aproximadamente 60 °C. En La Chilca (ID 82), la temperatura estimada mediante geotermometría de sílice fue de 87 °C con máximos de 159 °C a partir de Na-K-Ca, disminuyendo en Santa Teresita (ID 81) con 76 °C y máximos de 132 °C con Na-K-Ca, al igual que para Suriyaco (ID 83) donde alcanzaron solamente 54 °C con calcedonia y 123 °C con Na-K-Ca.

El área C presenta escasos antecedentes isotópicos de sus sitios termales, mencionándose solo valores para las perforaciones en Culanao (ID 84)  $-6,6 \text{‰ } \delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$  y  $-37,7 \text{‰ } \delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$  y en La Chilca (ID 86)  $-6,4 \text{‰ } \delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$  y  $-38,5 \text{‰ } \delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ . Del gráfico de isótopos  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\delta^2\text{H}$  (Figura 21) tomado de Bea *et al.* (2016), se puede apreciar que las muestras termales de la zona analizada presentan un enriquecimiento en  $^{18}\text{O}$  que podría corresponder a una interacción entre el agua y la roca desde un agua de origen meteórico.

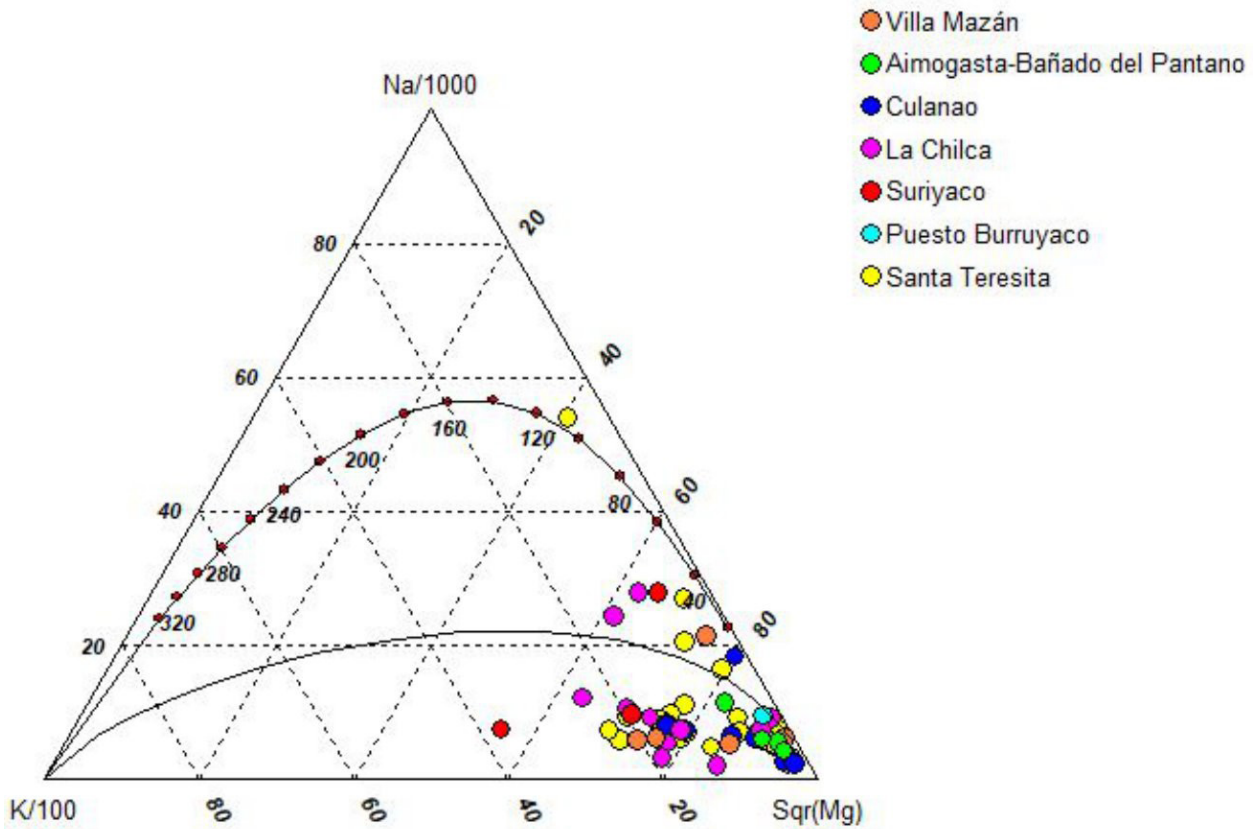


Figura 20. Diagrama de Giggensbach (1988) para los sitios de estudio de la Zona C.

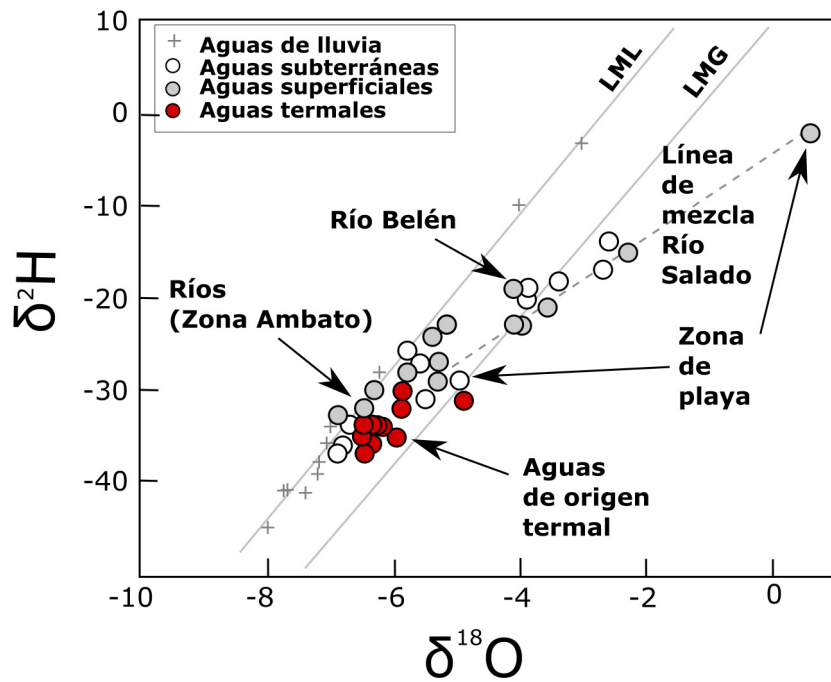


Figura 21. Relaciones de isótopos estables correspondiente a muestras de lluvia, aguas subterráneas, superficiales y termales del salar de Pipanaco. LML = Línea Meteórica Local. LMG = Línea Meteórica Global. Tomado de Bea *et al.* (2016).

#### 4.2.4. ZONA D

En el extremo noroeste del Área 4 se definió la zona D ubicada en el valle de Luracatao del departamento Molinos, en la provincia de Salta. Allí se encuentran dos sitios termales conocidos como La Hoyada o Baños de la Cabrería (ID 88) en el paraje homónimo y las termas de Cuchiyaco (ID 89). Las temperaturas medidas fueron de 47 °C y 52 °C y los parámetros medidos en laboratorio indicaron pH de 7,6 para ambos sitios y CE de 3462  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el primero y 362  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el segundo. En los Baños

de la Cabrería el agua es del tipo clorurada sódica y la de Cuchiyaco clorurada bicarbonatada cálcica-sódica (Figura 22).

El diagrama de Giggenbach para la zona D (Figura 23), indica que el manantial de Cuchiyaco presenta altos contenidos de magnesio pudiendo corresponder a un agua totalmente inmadura y de recarga por lo cual calcular temperaturas geotermométricas no es lo adecuado. La muestra del sector Baños de la Cabrería está en el límite del campo de aguas en equilibrio parcial, con temperaturas subsuperficiales menores a 60 °C.

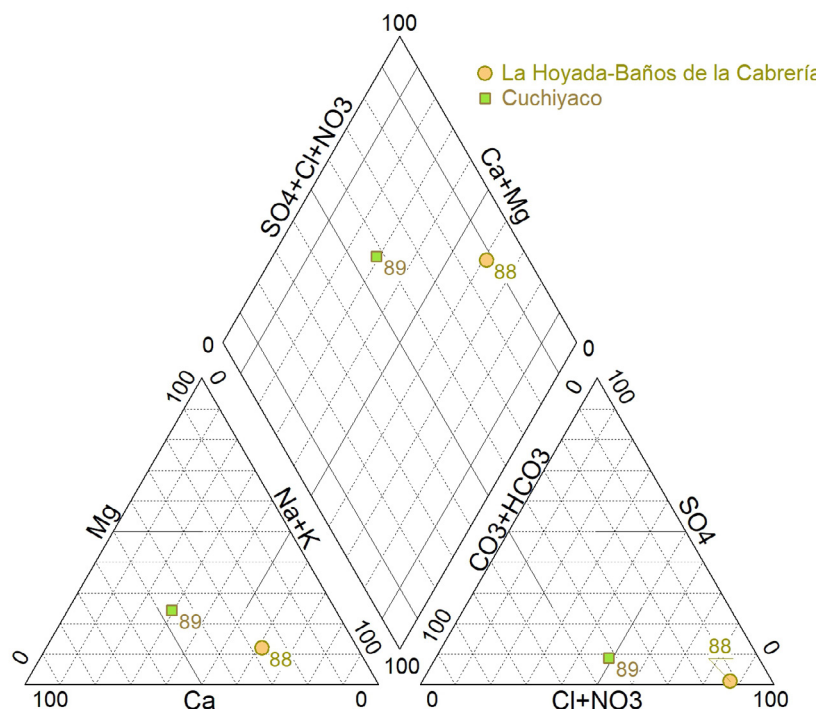


Figura 22. Diagrama Piper para caracterización del agua en la zona D.

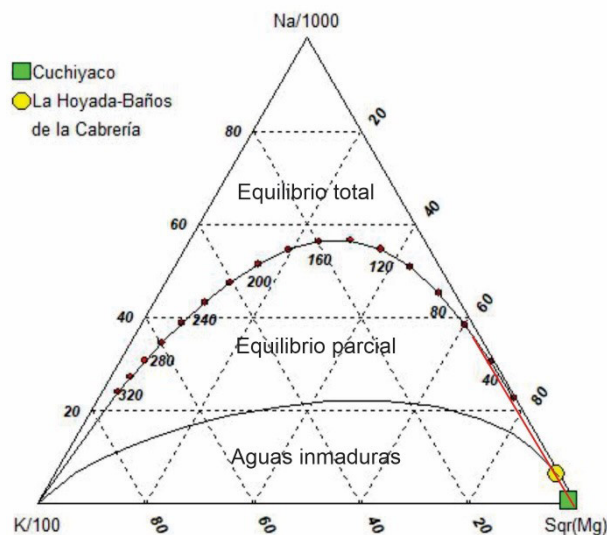


Figura 23. Diagrama de Giggenbach (1988) para los sitios de estudio de la Zona D.

## 5. EVIDENCIAS VÁLIDAS TANTO PARA LOS SUBSISTEMAS DE CALOR COMO DE FLUIDOS

Al comparar la temperatura del agua en una perforación con la temperatura del ambiente medida simultáneamente, se notó que ambas son parecidas. Por lo tanto, se determinó como temperatura media 25 °C y se le otorgó un puntaje 0; este valor de temperatura no sería representativo de un fluido con incidencia termal, pero sí aquellos manantiales y perforaciones cuyas temperaturas *in situ*, superan los 25 °C.

Se otorgó un puntaje 0 a las temperaturas geotermométricas inferiores a 30 °C, dado que se asemejan a la temperatura del entorno. Las temperaturas que superan los 30 °C son algo más relevantes, principalmente debido a la aplicación que pueden tener (principalmente usos directos, balneoterapia). Se definió un nuevo rango para este GPF entre 70 °C - 120 °C con un puntaje de 0,8, dado que hoy en día hay tecnologías capaces de generar electricidad en dichos intervalos (Ahmadi *et al.*, 2020). Si se toman en cuenta las temperaturas geotermométricas

medias para el Área 4, cifras que superen los 120 °C resultarían eficaces para producir energía a través de ciclos binarios.

En los cuadros 1 y 2 se resumen las asignaciones de pesos que valorizan las evidencias para el análisis de los subsistemas fluidos y calor.

Finalmente, como resultante de toda la evaluación y aplicación del análisis GPF se presenta un mapa integral de los subsistemas Fluidos y Calor (Figura 24).

Es importante considerar que en la figura 24 también se ilustra la ubicación de las evidencias y anomalías asociadas a manifestaciones geotermales con valores de geotermómetros que indican una entalpía de interés. Así mismo incluye los sitios con alteraciones hidrotermales identificadas mediante imágenes ASTER vinculables a fluidos. En toda el área considerada se estableció un valor de fondo colorimétrico anómalo, acorde a las hipótesis de ubicuidad de un calor omnipresente regional procedente de niveles astenosféricos. El calor sería transmitido por conducción y convección cuando intervienen fallas profundas como vía de termoalimentación de aguas meteóricas.

Peso subsistema	Subsistema	Evidencias	Peso	Observaciones
1	Fluidos	Alteraciones	0,5	
		Manifestaciones termal (se consideran con más de 4°C con respecto a la temp ambiente)	1	Buffer 2,5 km

Cuadro 2. Evidencias para el subsistema Fluidos.

Peso subsistema	Subsistema	Evidencias	Peso	Observaciones
1	Calor	Anomalía Temp. Absoluta ASTER $\geq 15^{\circ}\text{C}$ con respecto al valor de fondo	0,25	
		Volcanismo cuaternario	0,25	Pequeños afloramientos al oeste. Basaltos
		Alteraciones Aster	0,5	
		Geotermometría	1	buffer 2,5 km
		--Pesos por rango de temperatura	0	<30°C
			0,5	30-70°C
	0,8	70-120°C		
	1	> 120°C		

Cuadro 3. Evidencias para el subsistema Calor.

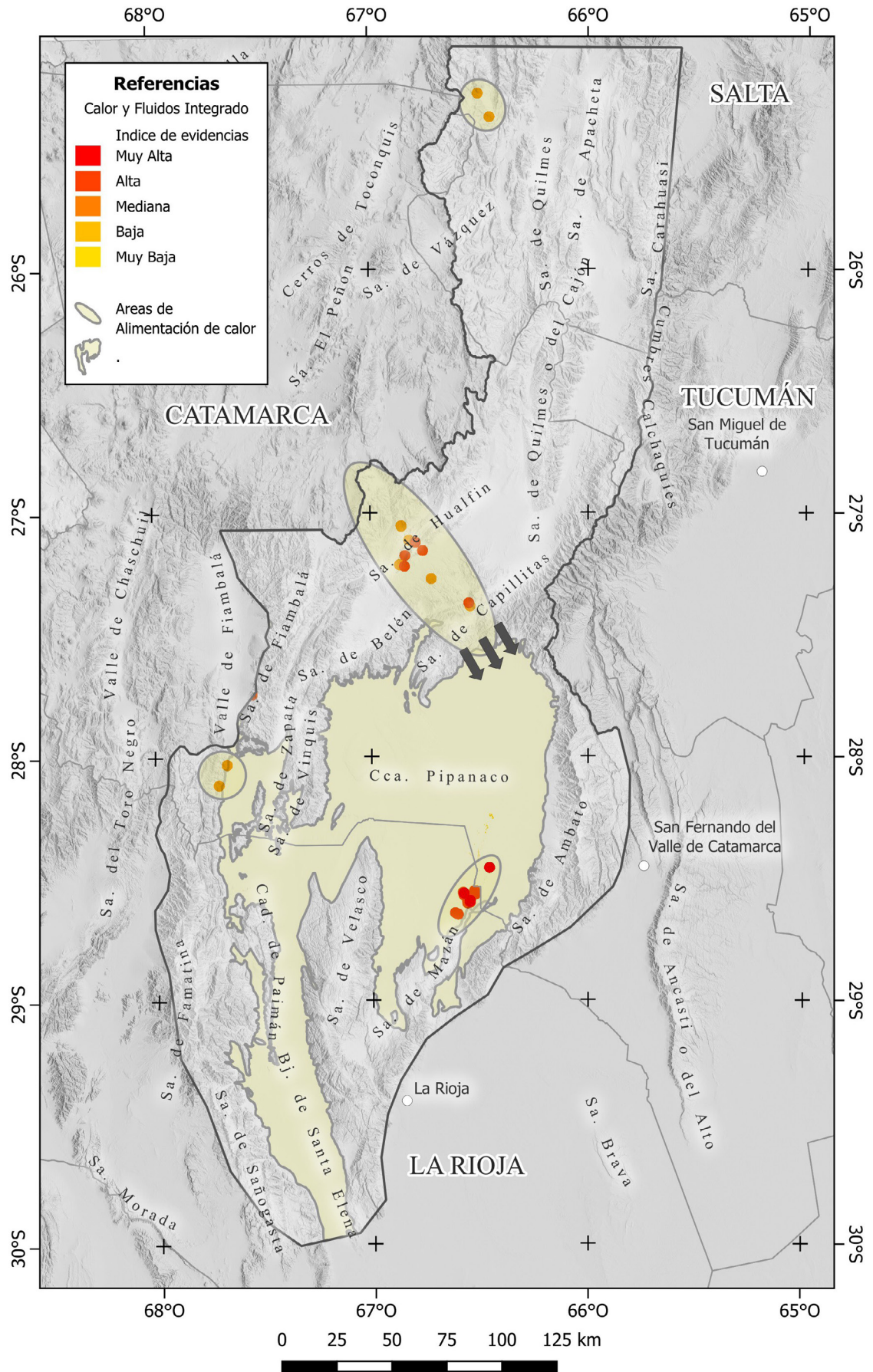


Figura 24. Mapa integral de potencial de los subsistemas Calor y Fluidos. Los vectores indican de manera hipotética los sentidos de escurrimiento subsuperficial.

## 6. MODELO DEL SUBSISTEMA PERMEABILIDAD

La Cuenca de Pipanaco presenta una serie de rasgos estructurales potencialmente favorables para circulación de fluidos y calor geotermal, así como para el entrapamiento de estos en profundidad. A continuación, se hace solo mención a ellos porque su validación en detalle, a través de comprobaciones en terreno o información precisa proveniente de estudios de terceros para su ubicación geográfica (mediante un registro GIS exportable para el GPF del Área 4), solo ha sido parcial para este análisis del subsistema permeabilidad.

Consideraciones en lo referente a fallas como vías abiertas:

- Fallas inversas de alto ángulo: estas fallas predominan en la cuenca y las sierras circundantes, actuando como canales potenciales para la circulación de fluidos y calor hacia niveles más superficiales.
- Fracturas oblicuas y ramificaciones: varias fallas presentan estructuras de acomodación lateral que podrían facilitar la migración de los fluidos.
- Escalones tectónicos: La disposición escalonada del basamento cristalino constituye zonas de fracturación preferencial que permiten la infiltración de aguas meteóricas y su calentamiento en profundidad.
- Fallas con zonas alteradas: Las alteraciones hidrotermales asociadas a fallas, como las fajas de granito alterado en material caolinítico observadas en la sierra de Zapata, indican potenciales

vías en donde han circulado fluidos térmicamente activos.

En cuanto a estructuras favorables al entrapamiento:

- Bloques hundidos por fallas normales locales: aunque estas fallas no son comunes fuera de la Puna, su presencia localizada en áreas como la Sierra de Ambato podría generar condiciones de entrapamiento para acuíferos calientes en profundidad.
- Depósitos sedimentarios cenozoicos: algunos de estos sedimentos, al estar sobre estructuras de basamento fracturado, podrían actuar como cubiertas impermeables que sellan y mantienen el calor atrapado.
- Basamento cristalino fracturado: las fracturas de los esquistos, migmatitas y rocas magmáticas (graníticas y tonalíticas) podrían actuar de reservorios profundos para acuíferos con gradiente termal significativo.
- Fallas inversas principales que limitan la cuenca de Pipanaco no solo permitirían la circulación, sino que también podrían crear ambientes de trampa estructural para el almacenamiento de fluidos geotérmicos.

En el cuadro 4 se detallan los rasgos estructurales que han sido considerados con condiciones de identificación geográfica y evaluación de su impacto para el modelo del subsistema permeabilidad a través de un análisis de sus pesos de influencia.

En la figura 25 se ilustra el mapa resultado del Subsistema Permeabilidad.

Peso subsistema	Subsistema	Evidencias	Peso	Observaciones
1	Permeabilidad	Fallas Profundas (Gravimetría)	0,75	Buffer 5 km
		Falla Profunda por sísmica	0,75	Buffer 5 km
		Fallas	0,5	Buffer 2,5 km
		Densidad de Fallas (intensidad)	0,5	
		Depocentro Morfoestructural Pipanaco (gravimetría)	0,25	

Cuadro 4. Asignación del peso de las evidencias estructurales reunidas en el Área 4 y definición de su área de influencia (*buffer*) en el modelo de permeabilidad.

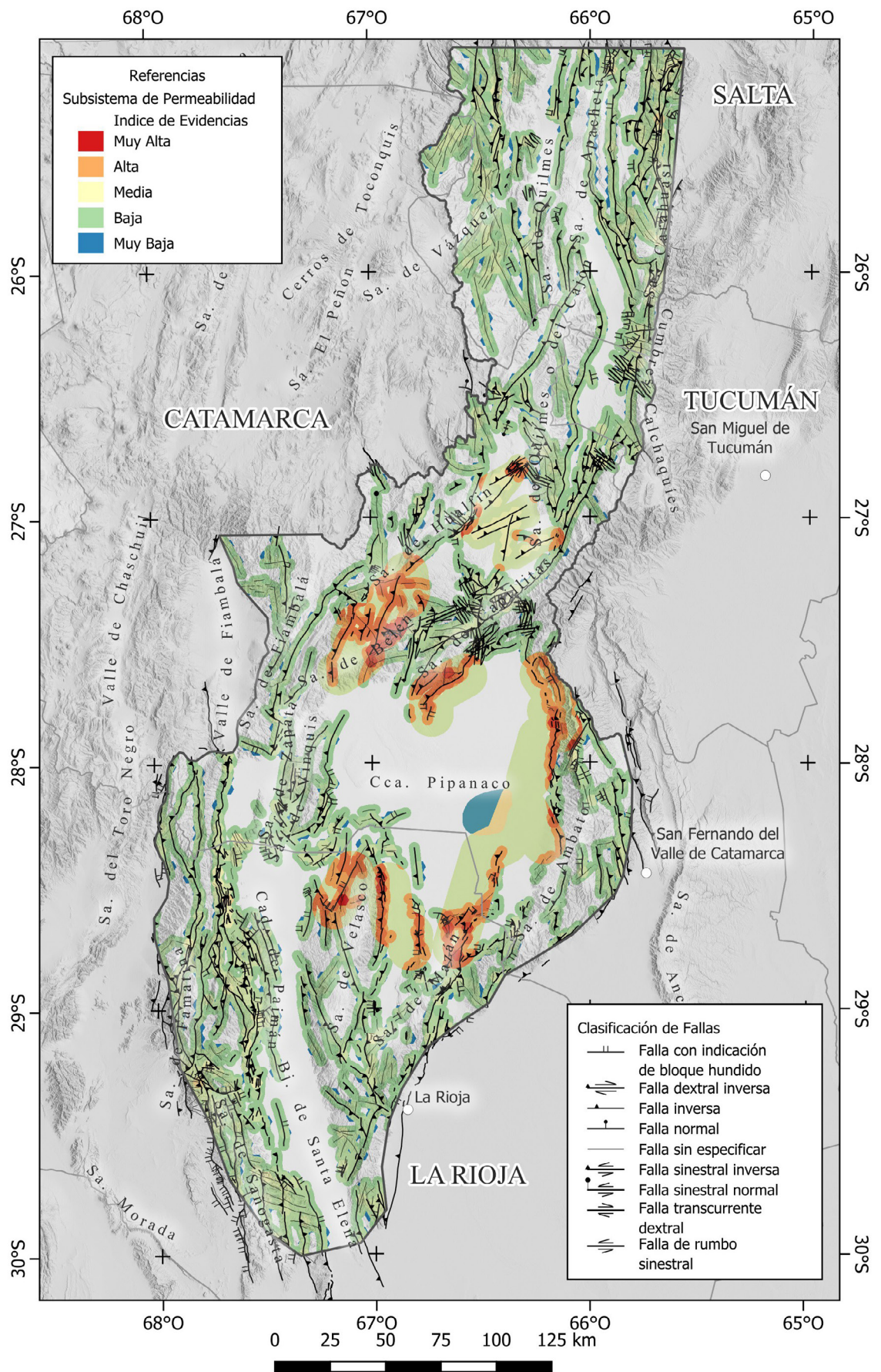


Figura 25. Mapa de Potencial del Subsistema Permeabilidad.

## 7. MAPA DE POTENCIAL GEOTÉRMICO Y MAPA DE FAVORABILIDAD GEOTÉRMICA

Se distinguen las siguientes zonas con significación geotérmica para la Cuenca de Pípanaco:

**Zona Favorable 1, cordón de Ambato:** esta estructura actúa como vía libre a la recarga de agua meteórica a niveles profundos y retorno de aguas calentadas por gradiente geotérmico anómalo (acceso a calor conductivo regional astenosférico). Estas aguas termo alimentadas son pasibles de impactar en acuíferos someros.

Este circuito se aproxima al modelo *Fold and Thrust Belts Foreland Basin* de la clasificación de Moeck (2014).

**Zona Favorable 2, cruce de fallas en la localidad de Termas de Santa Teresita:** la mayor permeabilidad secundaria generada por la tectónica y la reactivación neotectónica, favorece la circulación de fluidos. Los sistemas geotermales profundos, responsables del transporte de calor tantop conductivo a escala regional como convectivo a nivel local mediante la circulación estructural profunda, fugan a través de esta zona, aportando calor y mineralización a los niveles acuíferos someros. Estos acuíferos son explotados en las termas para su uso en bañoterapia.

**Zona Favorable 3, sector cordón de Velasco:** replica, en parte, el escenario de permeabilidad de la zona favorable 2.

**Zona Favorable 4:** está caracterizada por el fallamiento presente en las sierras de Zapata, de la Alumbreira y de Hualfin, constituye un control estructural permeable que favorece el escurrimiento termal en profundidad. Este sistema podría actuar como un vector de calor hasta el basamento de la cuenca. En superficie, se observan evidencias de surgencia de este circuito, manifestadas en aguas termales inmaduras, cuyos geotermómetros de sílice indican temperaturas significativas entre 79 °C y 99 °C.

Se resume que en la evaluación del potencial geotérmico (Figura 26) prevaleció como subsistema de evidencias la permeabilidad, asociada a un esque-

ma estructural reactivado en parte y que controlaría los focos de calor ascendente. En la ecuación de resultados el resto de las evidencias refuerzan la imagen de la zonificación de favorabilidad como se ilustra sus resultados en el mapa de favorabilidad geotérmica de la Figura 27).

Desde el punto de vista de las posibilidades entálpicas de estos probables sistemas geotérmicos como para generar electricidad a una escala de importancia comercial, dentro de los marcos técnicos convencionales para su explotación, se requeriría de una mayor exploración. Por ejemplo, aquella exploración que se enfoque en hallar acuíferos y unidades factibles de constituirse en reservorios, pero a profundidades de base de cuenca. Posiblemente pueda descubrirse una fracturación tectónica significativa suficiente como para que el basamento afectado no se comporte enteramente como un acuífugo, sino que brinde permeabilidad para la circulación de aguas termo alimentadas profundas. Por otra parte, también es necesario evaluar mediante geofísica de detalle a profundidades de varios miles de metros, la presencia de anomalías de resistividad que se asocien a los fluidos calientes que ascienden por las zonas de fallas indicadas dentro de las zonas o fajas de favorabilidad halladas (Figura 27). Para estos modelos de sistemas geotérmicos es común su explotación a través de pozos que intercepten fallas a profundidades donde la captura de los fluidos circulantes presente una entalpía suficiente para generar electricidad. Así se opera en el estado de Nevada y modelos similares en California.

Las posibilidades de generación eléctrica en la Cuenca de Pípanaco superan el esquema de explotación convencional mencionado. Si se atendiese con las recientes tecnologías que aplica la ingeniería de explotación geotérmica no convencional (Figura 28), resultaría más factible. En la figura 28 se ilustran todas las variantes de los nuevos conceptos de captación de calor, que según los saltos entálpicos podrían ser suficientes para generar electricidad (Khodayar *et al.* 2024). Esos casos para la Cuenca de Pípanaco podrían iniciarse a escalas modulares, como experiencia piloto y con vistas a abastecer la infraestructura rural.

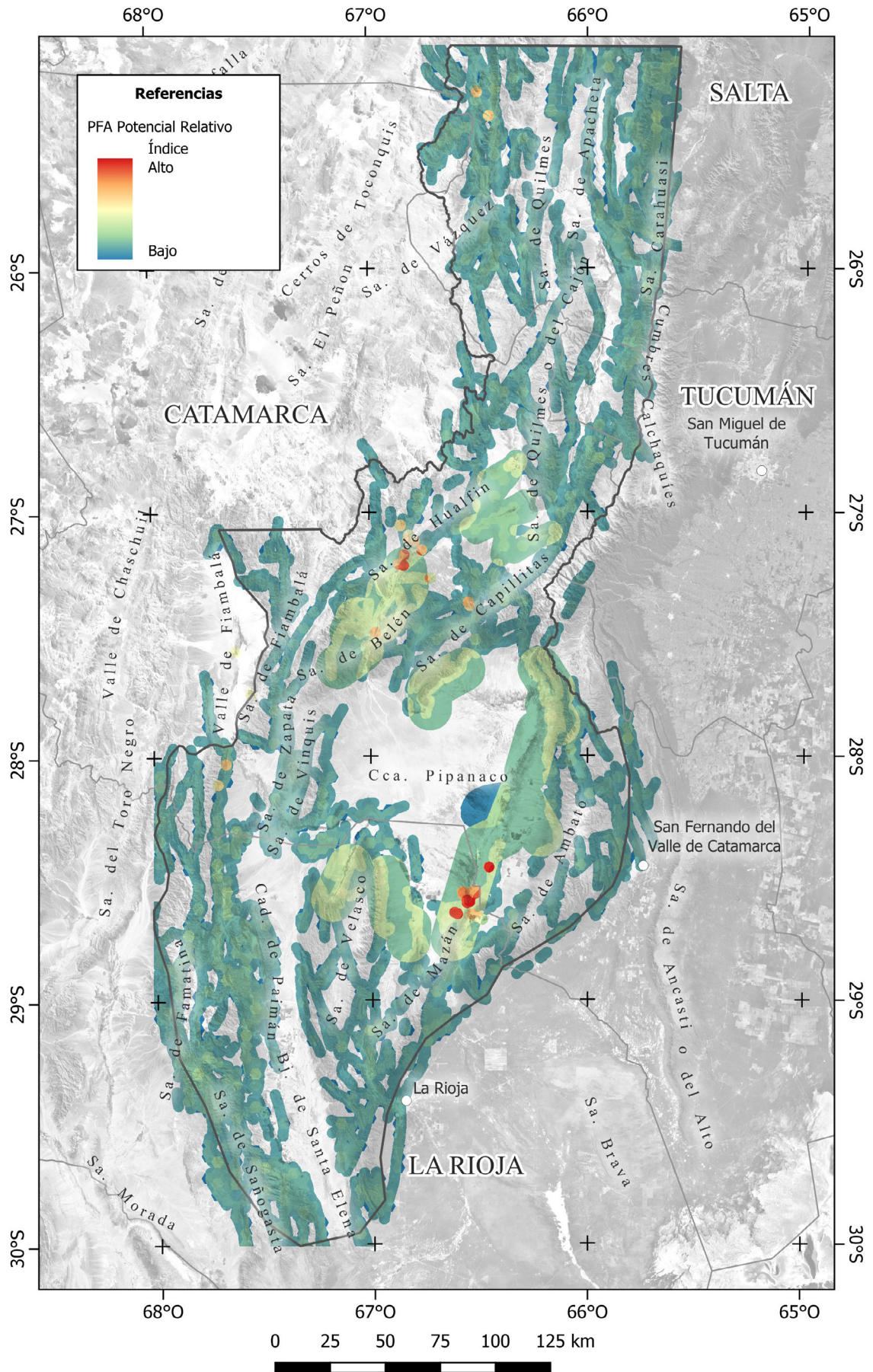


Figura 26. Mapa de Potencial Geotérmico del Área 4.

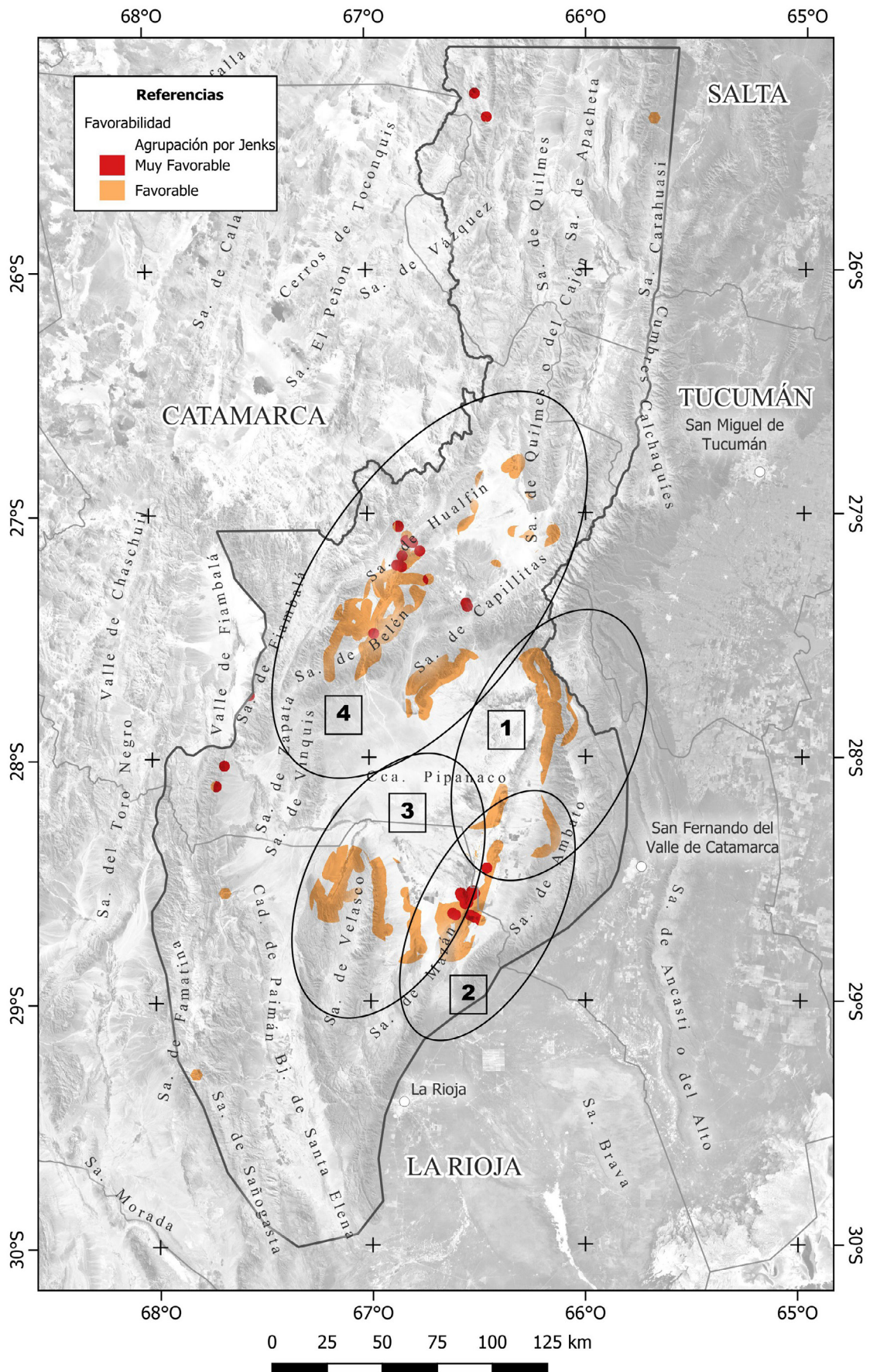


Figura 27. Mapa de Favorabilidad Geotérmica del Área 4.

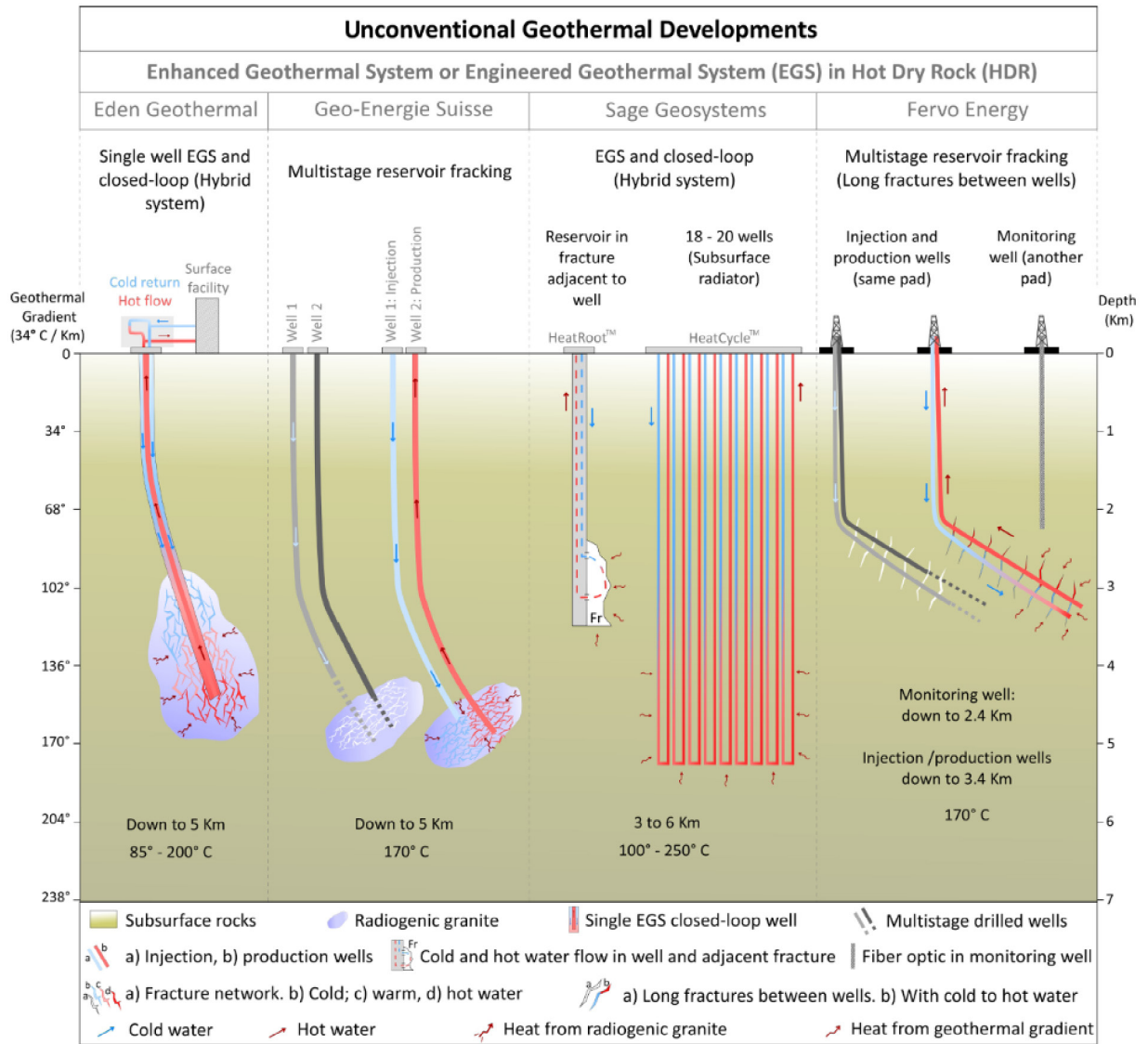


Figura 28. Esquema que ilustra las variadas técnicas de ingeniería de captación de calor aplicadas a la denominada Geotermia No Convencional (Khodayar *et al.* 2024).

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Ahmadi, A., El Haj Assad, M., Jamali, D.H., Kumar, R., Li, Z.X., Salameh, T., Al-Shabi, M., Ehyaci, M.A. 2020. Applications of geothermal organic Rankine Cycle for electricity production. *Journal of Cleaner Production*, 274:1-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122950>
- Bea, S.A., Mira-Carrión, A., Vives, L., Tálamo, E., Rodríguez, M.N. 2016. Identificación de los procesos de mezcla en el sistema hidrogeológico del Salar del Pipanaco, Provincias de Catamarca y La Rioja, Argentina En García, R. y Mariño, E. (Eds): *Calidad del Agua Subterránea: Actas IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*, Setiembre 20-23, S. F. del V. de Catamarca, Argentina. Editorial Científica Universitaria UNCA. ISBN 978-987-661-222-7 (61-68).
- Blasco, G., Caminos, R.L., Lapido, O., Lizuaín, A., Martínez, H., Nullo, F., Panza, J.L., Sacomani, L., Barber, E.L., Chipulina, M.Á., Martínez, L. 1994. Hoja Geológica 2966-II San Fernando del Valle de Catamarca, provincias de Catamarca, Santiago del Estero y Tucumán. Escala 1:250.000. Secretaría de Minería de la Nación, Dirección Nacional del Servicio Geológico. Boletín N° 212, 50 pp. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/1535>
- Candiani, J.C., Cravero, O. 2017. Hoja Geológica 2966-III, La Rioja, provincias de La Rioja y Catamarca. Escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín N° 424, 59 pp. Buenos Aires. <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2781>
- Candiani, J.C., Miró, R. 2018. Región II. En Lizuaín, A., Panza, J.L.A. (Coords.) *Mapa Geológico del Sector Continental e Insular Americano de la República Argentina - Mapa Geológico del Sector Antártico Argentino*. Escala 1:2.500.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/3184>
- Casa, A., Yamin, M., Wright, E., Costa, C., Coppolecchia, M., Cegarra, M. (Eds.) 2011. *Deformaciones Cuaternarias de la República Argentina, Sistema de Información Geográfica*. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Publicación N° 171, v1.0, en formato DVD.
- Carrizo, N., Lencina, A.I., Cañas, M.S., Peralta Arnold Y.J. 2025. Resultados preliminares del estudio y caracterización de aguas termales, depósitos carbonáticos y matas microbianas de algunos sistemas geotermiales de la provincia de Catamarca, Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas Geotermia N° 9. Buenos Aires. En Prensa
- Casa, A., Yamin, M., Wright, E., Costa, C., Coppolecchia, M., Cegarra, M., Hongn, F. (Eds.). 2014. *Deformaciones Cuaternarias de la República Argentina, Sistema de Información Geográfica*. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, DVD-ROM, v2.0 (ISSN 2362-3519).
- Craig, H. 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133: 1702-1703.
- Dávila, F.M., Giménez, M.E., Nóbile, J.C., Martínez, M.P. 2012. The evolution of the high-elevated depocenters of the northern Sierras Pampeanas (ca. 28° SL), Argentine broken foreland, South-Central Andes: the Pipanaco Basin. *Basin Research* 24: 615-636. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.201100539.x>
- ESIN Consultora S.A. 1983. Estudio de reconocimiento de recursos geotérmicos de baja entalpía de la zona Belén. Gobierno de la provincia de Catamarca. Secretaría de Energía de La Nación. Subsecretaría de Desarrollo Económico. Provincia de Catamarca. Informe inédito.
- Falcón, C.M., Moreno, G.G., Combina, A.M. 2015 Evaluación de la Aguas Termales en el área de Santa Teresita, provincia de La Rioja, Argentina. Serie Correlación Geológica 31(1): 21-40. Tucumán. <https://www.scielo.org.ar/pdf/scg/v31n1/v31n1a02.pdf>
- Fauqué, L., Caminos, R. 2006. Hoja Geológica 2969-II Tinogasta, provincias de La Rioja, Catamarca y San Juan. Escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N° 276, 140 pp. Buenos Aires. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/187>
- Fauqué, L., Limarino, C., Vujovich, G., Cegarra, M., Yamin, M., Tedesco, A., Escosteguy, L. 2020. Hoja Geológica 2969-IV, Villa Unión, provincias de La Rioja y San Juan. Escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N° 345, 189 pp. Buenos Aires. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/4107>
- García, V., Casa, A., Hongn, F., Figueroa, S., Aranda, G., Escalante, L., Montero López, C., Yamin, M., Amengual, R., Aramayo, A. 2017. Deformación cuaternaria. En Muruaga, C.M., Grosse, P. (Eds.). *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. XX Congreso Geológico Argentino (San Miguel de Tucumán)*, Relatorio: 624-645.

- Garg, S.K., Pritchett, J.W., Combs, J. 2010. Exploring for hidden geothermal systems. Proceedings World Geothermal Congress. Bali, Indonesia, 25-29. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/1132.pdf>
- Giggenbach, W. 1988. Geothermal solute equilibria, derivation of Na-KMg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52: 2749-2765. doi: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
- González Bonorino, F. 1950. Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 5(3): 81-110. <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/666>
- González, O.E., Viruel, M.E., Mon, R., Tchilinguirian, P., Barber, E. 2000. Hoja Geológica 2766-II, San Miguel de Tucumán, provincias de Tucumán, Catamarca, Salta y Santiago del Estero. Escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N° 245, 124 pp. Buenos Aires. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/1806>
- Hacker, B.R., Peacock, S.M., Abers, G.A., Holloway, S.D. 2003. Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions?. *Journal of Geophysical Research* 108(B1). doi: <https://doi.org/10.1029/2001JB001129>
- Hongn, D., Seggiaro, R.E., Monaldi, C.R., Alonso, R.N., González, R.E., Igarzábal, A.P., Ramallo, E., Godeas, M., Fuertes, A., García, R., Moya, F., González, O. 2001. Hoja Geológica 2566-III, Cachi, provincias de Salta y Catamarca. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N° 248, 94 pp. Buenos Aires. <http://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/99>
- Hongn, D., Seggiaro, R.E., Monaldi, C.R., Alonso, R.N., González, R.E., Igarzábal, A.P., Ramallo, E., Godeas, M., Fuertes, A., García, R., Moya, F., González, O. 2001. Hoja Geológica 2566-III, Cachi, provincias de Salta y Catamarca. Escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín N° 248, 94 pp. Buenos Aires. <http://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/99>
- Jordan, T.E., Isacks, B.L., Ramos, V., Allmendinger, R.W. 1983. Mountain building in the Central Andes. Episodes 1983(3): 20-26. doi: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1983/v6i3/005>
- Kay, S.M., Coira, B.L. 2009. Shallowing and steepening subduction zones, continental lithospheric loss, magmatism, and crustal flow under the Central Andean Altiplano-Puna Plateau. En Kay, S.M., Ramos, V.A., Dickinson, W.R. (Eds.) *Shallow Subduction, Plateau Uplift and Ridge and Terrane Collision*. Geological Society of America 204: 228-259. doi: [https://doi.org/10.1130/20091204\(11\)](https://doi.org/10.1130/20091204(11))
- Kay, S.M., Coira, B.L., Viramonte, J. 1994. Young mafic back-arc volcanic rocks as indicators of continental lithospheric delamination beneath the Argentine Puna Plateau, Central Andes. *Journal of Geophysical Research* 99: 24323-24339. doi: <https://doi.org/10.1029/94JB00896>
- Khodayar, M., Bjornsson, S. 2024. Conventional Geothermal Systems and Unconventional Geothermal Developments: An Overview. *Open Journal of Geology* 14: 196-246. doi: <https://doi.org/10.4236/ojg.2024.142012>
- Liang, X., Sandvol, E.A., Kay, S.M., Heit, B., Yuan, X., Mulcahy, P., Chen, C., Brown, L.D., Comte, D., Alvarado, P. 2014. Delamination of Southern Puna lithosphere from body wave attenuation tomographic images. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 119: 549-566. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/2013JB010309>
- Löbens, S., Sobel, E.R., Bense, F.A., Wemmer, K., Dunkl, I., Siegesmund, S. 2013. Refined exhumation history of the northern Sierras Pampeanas, Argentina. *Tectonics* 32: 1-20. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/tect.20038>
- Marret, R.A., Allmendinger, R.W., Alonso, R.N., Drake, R.E. 1994. Late Cenozoic tectonic evolution of the Puna Plateau and adjacent foreland, northwestern Argentine Andes. *Journal of South American Earth Science* 7(2): 179-207. doi: [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0895-9811(94)90007-8)
- Moeck, I.S. 2014. Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37: 867-882. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032>
- Mon, R. 1976. La tectónica del borde oriental de los Andes en las provincias de Salta, Tucumán y Catamarca, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 31(2): 65-72.
- Mulcahy, P., Chen, C., Kay, M.S., Brown, L.D., Isacks, B.L., Sandvol, E., Heit, B., Yuan, X., Coira, B.L. 2014. Central Andean mantle and crustal seismicity beneath the Southern Puna plateau and the northern margin of the Chilean-Pampean flat slab. *Tectonics* 33: 1636-1658. doi: <https://doi.org/10.1002/2013TC003393>
- Nóbile, J.C., Dávila, F.M. 2012. Uplift history of the northern Sierras Pampeanas broken foreland using river profile modelling. XIII Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 265-267. Antofagasta, Chile.

- Ostera, H., Laprida, C., Dapeña, C., & Ratto, N. (2005). Caracterización hidroquímica e isotópica preliminar de aguas superficiales, Departamento Tinogasta, Catamarca, Argentina. Proxy paleoclimático. In Actas del XV Congreso Geológico Argentino (Vol. 3, pp. 711-716).
- Pesce, A.H., Miranda, F. 1997. Utilización de los recursos geotérmicos de baja entalpía de la zona de Santa Teresita-Suriyaco para el desarrollo de lechos refrigerados para conservación de frutas y hortalizas, provincias de La Rioja y Catamarca. Informe de avance, estudio geoquímico de las aguas. (informe orientado al uso de las aguas de la hostería Santa Teresita en balneoterapia). Instituto de Geología y Recursos Minerales Servicio Geológico Minero Argentino, 39 pp., 2 mapas. Inédito.
- Reinoso Carbonell, V.V. 2023. Origen y Evolución del Sistema Geotermal del Bolsón de Fiambalá, Provincia de Catamarca. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Catamarca. Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Departamento de Geología. <https://riaa-tecnio.unca.edu.ar/handle/123456789/905>
- Salfty, J.A., Monaldi, C.R., González, O.E. 2006. Hoja Geológica 2566-IV, Metán, provincia de Salta. Escala 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín N° 352, 80 pp. Buenos Aires. <http://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/161>
- Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) 1997. Utilización de los recursos geotérmicos de baja entalpía de la zona de Santa Teresita - Suriyaco (Catamarca y La Rioja). Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales. Serie Contribuciones Técnicas Geotermia N° 19, 39 pp. Buenos Aires. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2808>
- Siler, D.L., Faulds, J.E. 2013. Play-Fairway analysis for geothermal exploration: Examples from the Great Basin, western USA. Geological Society of America Abstracts with Programs 45(7): 653. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1110514>
- Toselli, A., Bossi, G., Ávila, J.C., Miró, R., Sesma, P., Durand, F., Rossi de Toselli, J., Cisterna, C., López, J.P., Sardi, F., Saavedra, J., Córdoba, G., Guido, E., Puchulu, M.E. 2018. Hoja Geológica 2966-I, Aimogasta, provincias de La Rioja y Catamarca, 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín N° 433, 75 pp. Buenos Aires. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2827>
- Urreiztieta, M., Gapais, D., Le Corre, C., Cobbold, P.R., Rossello, E.A. 1996. Cenozoic dextral transpression and basin development at the southern edge of the Puna Plateau, northwestern Argentina. Tectonophysics 254(1-2): 17-39. doi: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00071-2)
- Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) Deformaciones Cuaternarias 250K (Visor de mapas). Escala 1:250.000. Sistema de Información Geológica Ambiental Minera (SIGAM). Fecha de consulta: 27 de diciembre de 2024. <https://sigam.segemar.gov.ar/visor/index.html?mapa=27>