

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE POSGRADOS

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA - EDICIÓN 2019



**RE-EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO EN EL
"PROYECTO GEOTÉRMICO CHALPATÁN", PROVINCIA DEL
CARCHI-ECUADOR Y PROPUESTA DE USOS DIRECTOS PARA
EL SECTOR RURAL.**

AUTORES:

**Lissette Mariana Betancourt Noroña
Isabel del Rosario Guardado de Morán**

ASESORES:

**Ing. Noel López
Ing. Jaime Chavarría**

Ciudad Universitaria, noviembre de 2019

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	4
I. RESUMEN	5
II. INTRODUCCIÓN	5
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
IV. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	6
V. OBJETIVOS.....	7
Objetivo general	7
Objetivos específicos	7
VI. MARCO TEÓRICO	7
a. MARCO GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL	7
Volcano-estratigrafía	8
Unidades sedimentarias	10
Geología estructural	10
b. MARCO HIDROGEOLÓGICO	13
Materiales asociados al edificio de Chalpatán	13
Edificios volcánicos Morro y Horqueta	13
Edificio volcánico Potrerillos.....	14
Otras unidades sedimentarias	14
c. MARCO GEOQUÍMICO	14
Clasificación de fluidos termales	14
Geotermometría	16
d. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO	24
Actividad Agrícola	25
Actividad Ganadera	26
Actividad Avícola.....	27
e. USOS DIRECTOS	28
Generalidades	28
Los usos directos de la geotérmica en el ámbito mundial.....	29
Implementación de usos directos y los beneficios hacia el entorno medio ambiental y social.	29
VII. METODOLOGÍA	30
VIII. ANÁLISIS DE DATOS.....	31
IX. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	33
Caracterización geoquímica de aguas	33
Geotermometría	41
Geotermómetros de fase líquida	41
Geotermómetros de fase gaseosa.....	45
Propuestas de aplicación en usos directos	48
<i>Pasteurización de leche</i>	50
<i>Biodigestores</i>	51
<i>Invernaderos</i>	52
<i>Climatización geotérmica de edificaciones y viviendas</i>	53
X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
XI. AGRADECIMIENTOS	56
XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
XIII. ANEXOS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa geológico y de Muestreo de Aguas en la zona de estudio. Modificado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).....	12
Figura 2: Diagrama ternario para clasificación de fluidos termales. Tomado de Nicholson (1993).	15
Figura 3: Diagrama sílice-entalpía; Curva de solubilidad del cuarzo en función de Entalpía (Fournier, 1981) y líneas de mezcla a diferentes temperaturas. Tomado de Matus (2019)	17
Figura 4: Diagrama ternario Na-K-Mg para determinar la temperatura del reservorio, propuesto por Giggenbach (1988). Tomado de Nicholson (1993).	19
Figura 5: Geotermómetro de grid FT-HSH2. Modificado de Barragán y otros (2003).....	21
Figura 6: Grid de la relación H ₂ /Ar - CO ₂ /Ar. Tomado de Powell (2000).	22
Figura 7: Mapa de ubicación de la Provincia de Carchi. Se señala la ubicación de la zona de estudio.	24
Figura 8: Esquema de los componentes de un sistema geotérmico. Tomado de Dickson y Fanell (2004).	28
Figura 9: Aplicación y clasificación de los recursos geotérmicos en base a su temperatura (°C). Tomado de Castillo (2019).	29
Figura 10: Países líderes en capacidad de aplicaciones de usos directos en el ámbito global. Tomado de Lund, Bertani, & Boyd (2015).	29
Figura 11: En escala logarítmica la producción de energía térmica anual para usos directos de Latinoamérica. Tomado de Lund, Bertani, & Boyd (2015).	29
Figura 12: Posibles aplicaciones en usos directos de la energía geotérmica.	30
Figura 13: Diagrama de Piper (a) y Diagrama Ternario (b) de las muestras de aguas del área de estudio.	34
Figura 14: Diagrama de Ludwig-Langellier de cloruro más sulfato y sodio más potasio.	35
Figura 15: Diagrama de Ludwig-Langellier de cloruro más sulfato y bicarbonato.	35
Figura 16: Diagramas de Stiff de las muestras más representativas de los distintos grupos.	36
Figura 17: Diagrama de correlación entre Cl y B.	37
Figura 18: Diagrama de correlación entre Na y K.	38
Figura 19: Diagrama de correlación entre Cl y As.	38
Figura 20: Diagrama de correlación entre Oxígeno-18 y Deuterio.	39
Figura 21: Mapa de ubicación de las muestras de agua recolectadas en la zona de estudio sobre la base estructural de la misma. Se presentan las muestras como diagramas circulares de distribución de componentes.	40
Figura 22: Geotermómetro catiónico de Giggenbach, para las muestras del área de estudio.	41
Figura 23: Geotermómetro gráfico de sílice.	43
Figura 24: Distribución de los IS de diversos minerales, simulados con la composición original de la muestra CH-4.	44
Figura 25: Distribución de los IS de diversos minerales, simulados con la composición de la muestra CH-4 equilibrada con moscovita.	45
Figura 26: Distribución de los IS de diversos minerales, simulados con la composición de la muestra CH-4 equilibrada con moscovita y concentrada en un 10%.	45
Figura 27: Diagrama ternario He-N-Ar para la caracterización del gas libre del sitio CH-4.	46
Figura 28: Geotermómetro CO ₂ /Ar (L _{CA}) e H ₂ /Ar (L _{HA}).....	47
Figura 29: Geotermómetro gráfico de D'amore (1998).....	48
Figura 30: Categorización de tratamientos térmicos de la industria láctea	50
Figura 31: Prototipo de pasteurizador de leche y proceso de pasteurización en un campo geotérmico de El Salvador. Modificado de (Chavarría, 2019).....	51
Figura 32: Esquema básico de los componentes que integran un biodigestor y su operación. Tomado de (Chavarría, 2019).	52
Figura 33: Sistemas de calefacción en invernaderos geotermales. Tomado de (Dickson & Fanelli, 2004).....	53

Figura 34: Diagrama de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con sondeos de captación de agua (sistema abierto). Tomado de (Díaz, 2017).	54
Figura 35: Esquema de funcionamiento de un sistema de climatización cerrado. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ocupación en la Provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013)	25
Tabla 2: Cultivos permanentes en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).	26
Tabla 3: Cultivos transitorios en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013)...26	26
Tabla 4: Floricultura en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).	26
Tabla 5: Ganado vacuno en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).	27
Tabla 6: Ganado porcino en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).	27
Tabla 7: Ganado ovino en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).	27
Tabla 8: Crianza de aves en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).	27
Tabla 9: Producción de huevos en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).	27
Tabla 10: Composición y características químicas de las 14 muestras de aguas recolectadas en el área de estudio. Modificado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).	32
Tabla 11: Composición química de la muestra de gas libre recolectada en el sitio CH-4. Modificado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).	32
Tabla 12: Resumen del análisis y procesamiento de datos realizados.	32
Tabla 13: Cálculo de los geotermómetros catiónicos a partir de la relación Na/K (rosa) y Na-K-Ca (celeste).	42
Tabla 14: Cálculo de los geotermómetros de sílice.	43
Tabla 15: Resumen de las temperaturas obtenidas mediante las técnicas aplicadas.	48
Tabla 16: Parámetros termodinámicos y temperatura en superficie, definidos para una temperatura de reservorio de 150°C y 200°C.	49
Tabla 17: Relación entre temperatura y tiempo de retención recomendado para lograr producciones de biogás aceptables. Tomado de (Martí, 2019)	51

I. RESUMEN

El proyecto objeto de la presente investigación ha sido catalogado previamente como un recurso de media a baja entalpía, como resultado del Estudio de Prefactibilidad del Modelo Geotérmico Integral de la Caldera de Chalpatán, en el que se planteó una temperatura probable de entre 74° y 137°C. En el presente estudio se propone la re-evaluación de la información disponible y aplicación de técnicas adicionales para la estimación de las características del recurso y la definición de la temperatura del reservorio con mayor precisión. La caldera de Chalpatán es una estructura semicircular de aproximadamente 8 km de diámetro, constituida principalmente por los depósitos volcánicos pre-caldera del edificio de Chalpatán y los depósitos volcánicos post-caldera de los edificios del Morro, Horqueta y Potrerillos, que consisten mayormente en flujos de lava, depósitos piroclásticos y depósitos epiclásticos, definidos hidrogeológicamente como materiales de permeabilidad media a baja; además de depósitos sedimentarios de removilización glaciar como tillitas y depósitos de cangahua, ambos prácticamente impermeables.

Durante el Estudio de Prefactibilidad del Modelo Geotérmico Integral de la Caldera de Chalpatán fueron recolectadas 14 muestras en manantiales fríos y calientes y una muestra de gas libre en uno de esos manantiales; estas muestras y sus análisis químicos han sido el material del trabajo de esta investigación. A partir de ellas se ha realizado la reevaluación del potencial geotérmico del recurso que contiene la Caldera de Chalpatán, por medio de su caracterización geoquímica y del uso de varias técnicas geotermométricas de tipo gráfico y de tipo numérico, dentro de las que se debe recalcar la aplicación de la geotermometría de equilibrio mineral que fue el medio de validación de las temperaturas obtenidas a través de los geotermómetros de sílice, ya que los geotermómetros catiónicos de Na/K y los geotermómetros de gases produjeron resultados poco consistentes. Es así que se logró establecer un rango de temperatura más probable de entre 150° y 200°C para el reservorio de la caldera de Chalpatán.

El rango de temperatura determinado fue analizado definiendo que podría sufrir pérdidas durante su ascenso, que en el caso menos favorable harían que la temperatura en superficie sea de aproximadamente 88°C; sin embargo, esta temperatura es suficiente para desarrollar las aplicaciones en usos directos que se han propuesto para aprovechar el recurso térmico. Dichas aplicaciones están enfocadas principalmente en los sectores agrícola y ganadero de la Provincia de Carchi, ya que constituyen el principal medio de vida de la población, mas, de ser considerados, deberán ser evaluados económica y técnicamente, así como también deberán ser puestos a consideración de la población involucrada.

II. INTRODUCCIÓN

La presente investigación aborda el área de la geoquímica aplicada a la exploración de los sistemas geotérmicos, principalmente enfocada en la geotermometría ejecutable en aguas y gases emergentes en la superficie para la estimación de la existencia y temperatura de recurso geotérmico profundo. Este trabajo surge de la necesidad de reevaluar la temperatura más probable para el recurso existente al interior de la estructura caldérica de Chalpatán, ubicada en la provincia de Carchi-Ecuador; y a partir de ello, realizar una propuesta adecuada de usos directos para el recurso, enfocada en las necesidades y condiciones socioeconómicas de la población aledaña al área del proyecto.

El desarrollo del trabajo se fundamentó en la aplicación de diversas técnicas geotermométricas a 14 muestras de manantiales fríos y calientes y una muestra de gas libre asociada a uno de los manantiales. Las técnicas fueron ejecutadas de manera progresiva, buscando cotejar los resultados obtenidos e interpretarlos de acuerdo a las bases teóricas en las que se encuentran fundamentadas. La investigación presentó limitantes como la cantidad y calidad reducida de las muestras de gases disponibles para el análisis, lo cual constituyó un aspecto a superar para el desarrollo del trabajo, pues los resultados obtenidos para las técnicas aplicadas poseen variaciones que hacen menos fiable la predicción de temperatura bajo dichas técnicas. Sin embargo, la temperatura más probable para el recurso definida con base en la caracterización hidrogeoquímica y la aplicación de geotermómetros de fase líquida, presentaron mayores consistencias y muy buenos resultados.

Posteriormente, con los resultados obtenidos, se desarrollaron algunas propuestas de aplicación en usos directos que podrían beneficiar a la población de la zona de influencia del proyecto, siempre en base a las necesidades que presentan.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La exploración geotérmica en el territorio ecuatoriano se ha venido desarrollando desde la segunda mitad de la década de los 70's; específicamente desde 1978 en algunas zonas de interés de la Provincia de Carchi, entre las que se encuentra la Caldera de Chalpatán. La última investigación realizada en esta zona en el año 2012, constituye el Estudio de Prefactibilidad del Modelo Geotérmico Integral de la Caldera de Chalpatán, en el que se presenta la información levantada dentro de todas las ramas de las geociencias, incluyendo la evaluación geoquímica del recurso. Sin embargo, la determinación de la temperatura del reservorio no ha sido claramente establecida; por lo que en el presente estudio se propone la re-evaluación del recurso existente por medio de la aplicación de distintas técnicas geotermométricas, que incluyen el uso del geotermómetro de equilibrio mineral *SOLVEQ-XPT*, que no fue considerado durante el desarrollo del último proyecto. Todo esto se realizará con un enfoque de análisis de las características químicas de los fluidos muestreados y su correlación con la geología existente; con el fin de establecer la temperatura más probable para el reservorio, y en base a ella proponer posibles aplicaciones en usos directos para el recurso, que favorezcan a la población de la zona de estudio.

IV. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El Ecuador es un país que debido a su privilegiada ubicación geográfica sobre un límite de placa convergente conocido como Cinturón de Fuego del Pacífico, presenta un gran potencial para la existencia de recursos geotérmicos asociados a sistemas volcánicos. Según el Balance Nacional de Energía Eléctrica, actualizado hasta el mes de agosto del presente año, la participación de las energías renovables en la generación de energía eléctrica (potencia efectiva) del país es del 64.95%, teniendo al 35.05% restante en dependencia de la producción de combustibles fósiles (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2019). Sin embargo, dentro de ese casi 65% de energías renovables, no figura la energía geotérmica; lo que invita a promover la investigación asociada a la exploración de recursos de este tipo, que coadyuven a disminuir el uso de combustibles fósiles y por lo tanto la generación de gases y productos contaminantes para el medio ambiente.

En Ecuador la exploración geotérmica tiene ya una historia de cuatro décadas en las que se ha recabado gran cantidad de información en distintos sectores del país; sin embargo, se ha llegado

apenas a concretar la viabilidad de un proyecto para la futura instalación de una planta que aportará con 50 MW a la matriz energética del país. El proyecto objeto de la presente investigación ha sido catalogado como un recurso de media a baja entalpía, como resultado del Estudio de Prefactibilidad del Modelo Geotérmico Integral de la Caldera de Chalpatán, en el que se propone una temperatura probable comprendida entre 74° y 137°C. Debido a que el rango de temperatura definido, el enfoque del estudio mencionado y las técnicas aplicadas no son del todo contundentes, se propone la re-evaluación de la información disponible y aplicación de técnicas adicionales para la estimación de las características del recurso; lo cual permitirá definir con mayor precisión la temperatura del reservorio.

Las características del recurso geotérmico que se definan en esta investigación, serán de gran utilidad para la propuesta de posibles aplicaciones que permitan a las comunidades cercanas al área del proyecto aprovechar la temperatura natural proveniente del interior de la Tierra, utilizándola como potencia térmica en diversas actividades que coadyuven al crecimiento de su economía, al desarrollo social y a la mejora de la calidad de vida teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona. Además los productos y métodos de esta investigación podrían replicarse en otras áreas con recursos geotérmicos de media o baja entalpía, e incluso como propuesta de inclusión social en el proyecto que instalará la primera planta geotérmica del país.

V. OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar la re-evaluación del potencial geotérmico del "Proyecto Geotérmico Chalpatán", ubicado en la provincia de Carchi - Ecuador, por medio del análisis geoquímico de geotermómetros para proponer posibles aplicaciones en usos directos a partir de los resultados obtenidos.

Objetivos específicos

- Realizar el análisis de geotermómetros de fase líquida y fase gaseosa, a partir de la información existente en el área de estudio.
- Correlacionar la información geológica y vulcanológica del área de estudio, con la información geoquímica y las geotemperaturas obtenidas.
- Realizar el análisis socio-económico de la zona de estudio, definiendo las características poblacionales y medios de vida dominantes.
- Proponer posibles aplicaciones en usos directos afines a la geotemperatura más probable determinada para el recurso geotérmico y a las características y necesidades de la población.

VI. MARCO TEÓRICO

a. MARCO GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL

El marco geológico y estructural de la Caldera de Chalpatán que se presenta a continuación, estará centrado en la litoestratigrafía y condiciones morfo-estructurales determinadas en el área de estudio mediante diversas campañas de campo desarrolladas a inicios de la presente década (CGS, INP, CELEC-EP, 2013). El mapa geológico generado durante el Estudio de Prefactibilidad de la Caldera de Chalpatán se presenta en la Figura 1; este mapa incluye los sitios de muestreo de aguas, cuyos datos se emplearán durante el procesamiento geoquímico. Cabe recalcar que el estudio mencionado posee gran aporte de la información levantada en los trabajos realizados durante las décadas de los 70's y 80's como parte de distintos proyectos.

Volcano-estratigrafía

La estratigrafía volcánica del área de estudio se encuentra dominada por productos de edad cuaternaria de los edificios identificados en la zona; sin embargo, en la sección noroccidental afloran depósitos volcánicos más antiguos de posible edad Plioceno, que debido a su elevado grado de erosión complicaron la reconstrucción de la estructura y estratigrafía de los centros eruptivos. Cabe recalcar que los productos volcánicos mencionados se encuentran cubiertos en su totalidad mediante una discordancia erosiva por una capa de depósitos piroclásticos de caída, de color claro y edad muy probablemente holocena. Sobre estos depósitos de caída distales se desarrolla una cobertura edáfica de color oscuro rica en materia orgánica, cuya proveniencia no se ha determinado, pero estaría fuera del área de estudio. Debido a que constituye una capa continua y superficial que recubre toda la topografía de manera uniforme, con un espesor constante de entre 0.5 y 1 m, este depósito piroclástico no se ha representado en la cartografía realizada.

Dos unidades pre-Cuaternarias fueron identificadas en el área de estudio, la primera y más antigua está formada por coladas de lava y aglomerados; la segunda está constituida por depósitos litificados de coladas piroclásticas (tobas ignimbríticas) y de lahares, que parecen proceder de centros de emisión localizados en la zona de la Enillada del Arpezón. Los materiales de esta segunda unidad se disponen al norte de los anteriores subhorizontalmente o con ligeros buzamientos al este, en capas superpuestas de varias decenas de metros de potencia individual.

A continuación se describen los edificios volcánicos cuaternarios y formaciones sedimentarias asociadas.

Edificio Chalpatán

El Chalpatán corresponde al edificio pre-caldera del área de estudio. Es un edificio volcánico poligenético de composición andesítica-dacítica. El buzamiento de los materiales volcánicos que lo componen es periclinal desde la zona central del edificio, hoy ocupada por una depresión calderiforme de unos 8-9 km de diámetro, cuya pared, de unos 100-120 m de desnivel máximo en la actualidad, solo es visible en su mitad oriental. Al oeste, el edificio se apoya sobre los aparatos volcánicos de posible edad pliocénica antes mencionados, a cuyos relieves parece adosarse.

Al N, E y S su zócalo debe estar constituido por los materiales de relleno de la Depresión Interandina, una compleja secuencia formada por materiales volcánicos provenientes de los edificios pliocenos y cuaternarios, y materiales detríticos y volcano-sedimentarios producto de su erosión y removilización.

Los materiales más antiguos reconocibles dentro del sector de estudio en el edificio Chalpatán son coladas de lava de morfología “aa” y composición andesítica. Estos materiales afloran en el escarpe que forma la pared de la caldera, en donde forman apilamientos cuyo máximo espesor visible es de unos 70 m. Las capas de lava muestran potencias individuales visibles de unos 10-15 m máximo. Las brechas autoclásticas de techo de estas lavas aparecen muy alteradas y erosionadas; en las coladas que forman el techo del apilamiento, han sido eliminadas por completo por la erosión. Las zonas centrales masivas muestran una disyunción vertical irregular y poco desarrollada, aunque en ocasiones se observan fracturas subparalelas a la base de las coladas, con escasa separación entre las juntas. En las coladas que forman el techo de la secuencia, las zonas masivas aparecen intensamente oxidadas y afectadas por una alteración concéntrica.

En los flancos del edificio volcánico, las lavas andesíticas están cubiertas por una secuencia de depósitos piroclásticos bastante alterados, pero cuya textura original puede reconocerse aún (flujos

piroclásticos de pómez y cenizas y lluvias de pómez) y depósitos epiclásticos (volcano-sedimentarios).

La secuencia piroclástica descrita no aparece, sin embargo, sobre la cresta de la pared oriental de la caldera o en sus proximidades; en esa zona afloran directamente sobre las lavas andesíticas antes descritas, brechas polimícticas formadas por grandes bloques subredondeados a subangulosos de dimensiones métricas (1-2 m de diámetro), de lavas andesíticas, y pequeños clastos milimétricos de pómez englobados en una matriz terrígena arenosa-limosa, que se interpretan como depósitos de lahares o de morrenas glaciares.

En algunos puntos de la cresta, donde las brechas autoclásticas de techo de las coladas han sido removidas completamente por la erosión, se observan superficies planas estriadas de posible origen glaciar en el techo de las coladas andesíticas; estrías similares se observan en algunos de los bloques de los depósitos laháricos o morrénicos. La potencia máxima visible de estos depósitos del borde de caldera es de 2.5-3 m. Pueden haberse originado en episodios de flujos de escombros generados por la fusión de glaciares en erupciones centrales del edificio, antes de que su parte apical colapsara para dar lugar a la depresión caldérica. Estos depósitos están también cubiertos por los depósitos de caída de pómez edafizados de edad reciente que recubren toda el área de estudio.

La datación por el método K-Ar de una lava andesítica del edificio, situada bajo la secuencia piroclástica descrita, dio una edad de 2.0 ± 0.05 Ma (OLADE-Aquater, 1987 en: CGS, INP, CELEC-EP, 2013). Además debe indicarse que en el flanco oriental del edificio Chalpatán, fuera de la zona de estudio, se hallan varios altos topográficos formados por lavas masivas de gran espesor que son objeto de actividades extractivas; que en trabajos previos se interpretaron como domos extrusivos de composición andesítica-dacítica.

Edificios post-caldera

Se han reconocido tres edificios volcánicos: El Morro, La Horqueta y Potrerillos, que crecieron sobre o cerca del borde septentrional, meridional y occidental respectivamente, de la caldera apical del Edificio Chalpatán, recubriéndolo en esos sectores. No ha sido posible encontrar criterios estratigráficos que indiquen con claridad la cronología relativa de estos aparatos. Sin embargo, los criterios geomorfológicos apuntan a que las últimas fases de actividad del edificio Potrerillos constituyen los episodios volcánicos más modernos de la zona objeto de estudio. Los productos volcánicos de estos edificios, así como los depósitos epiclásticos (volcano-sedimentarios) originados por la removilización de sus depósitos piroclásticos, rellenan en parte la depresión, con espesores que se describirán a continuación.

Edificio El Morro: Se sitúa sobre el borde norte de la caldera y alcanza una altura máxima de 3585 m en el vértice de su mismo nombre. Los escasos afloramientos muestran que lo forma un apilamiento de coladas “aa” con potencias individuales de 5 a 15 m, de composición andesítica, cuya petrografía es muy similar a las andesitas piroxénicas del edificio volcánico Chalpatán. Las brechas autoclásticas de las coladas que forman el techo de la secuencia han sido removidas completamente por la erosión en muchas ocasiones, y las zonas masivas están afectadas por alteración concéntrica. No se han identificado unidades piroclásticas que procedan de este edificio.

Edificio La Horqueta: Se localiza sobre el sector sur del borde de caldera de Chalpatán y alcanza su altura máxima en el vértice homónimo (3700 m). Los afloramientos existentes en la zona de estudio se concentran en las vertientes norte y oeste del edificio; las secuencias visibles están conformadas

de base a tope por un vitrófido dacítico masivo, que por sus características podría corresponder a un depósito de colada piroclástica (ignimbrita soldada); por depósitos de arenas limosas formados por fragmentos de pómez y cristales submilimétricos en una matriz de posible origen cinerítico alterada; y por fragmentos de pómez subangulosos (diámetro máximo 1.5 cm) y cristales minerales (feldespatos, piroxenos) con suelo edáfico oscuro al tope.

Edificio Potrerillos: Este complejo volcánico poligenético creció en el flanco occidental del Edificio Chalpatán, sobre el borde oeste de la caldera, y alcanza una altura máxima de 3940 m en la Loma Pan de Azúcar. El edificio parece estar constituido por un potente apilamiento de lavas andesíticas, de morfología “aa” y potencias individuales superiores a 2 m, visibles en las paredes de la caldera de colapso que ocupa la zona central de edificio. Las del techo de la secuencia han perdido las brechas autoclásticas superiores por erosión y muestran alteración concéntrica en las partes centrales masivas. La datación absoluta por K-Ar de una muestra de una de colada lávica aflorante en el borde de la caldera de colapso somital indicó una edad de 1.19 ± 0.4 Ma (OLADE-Aquater, 1987 en: CGS, INP, CELEC-EP, 2013). Sobre las lavas del flanco oriental del edificio se disponen depósitos de lahares, que afloran en varios puntos; además en estudios precedentes se ha indicado la existencia de un aparato volcánico, asimilado a un domo-colada de composición andesítica, en el interior de la caldera de Potrerillos; es posible que existan también uno o más pequeños estratovolcanes de forma cónica en su interior, con cráteres todavía reconocibles parcialmente.

Unidades sedimentarias

Se han reconocido en la zona de estudio varias unidades sedimentarias de edad reciente: incluyen los depósitos palustres-lacustres de relleno de la caldera del Edificio Poterillos (Lagunas del Voladero y otras), las morrenas glaciares del Edificio El Morro y los depósitos de ladera (coluviones, piedemontes y deslizamientos gravitacionales) producto de la erosión de la pared de la caldera de Chalpatán.

Sin embargo, la mayor de las unidades sedimentarias presentes en la zona de estudio, en extensión y potencia, es la que rellena la caldera de Chalpatán. Estos depósitos proceden básicamente de la erosión y removilización de los materiales de todos los edificios cuaternarios descritos. En los muy escasos afloramientos existentes, solo es visible la parte más somera de la secuencia, formada por una alternancia de arenas limosas y limos y arcillas de color claro, provenientes de la removilización de materiales pumíticos y cineríticos. Estos materiales forman capas de potencia centimétrica, y en el caso de los limos-arcillas, presentan laminación fina. En las arenas son visibles estratificaciones cruzadas de bajo ángulo y contactos erosivos que definen pequeños paleocauces.

Pueden interpretarse como materiales depositados en un ambiente fluvial o palustre/lacustre, sujeto a episodios sedimentarios de baja energía con sedimentación de limos y arcillas, y otros más energéticos en los que se depositaron las capas arenosas. La alternancia de materiales sugiere una cierta ciclicidad en los procesos, debida quizá a la variación estacional de la precipitación. Debieron depositarse sobre una superficie prácticamente horizontal, y sin embargo aparecen en algunos puntos basculados por fallas, con buzamientos cercanos a los 40° . En lo que se refiere a la potencia total de la unidad sedimentaria de relleno, esta tiene un máximo de 100 m.

Geología estructural

El trabajo de fotointerpretación, sumado a la fase de campo desarrollada en el Estudio de Prefactibilidad de la Caldera de Chalpatán (CGS, INP, CELEC-EP, 2013), permitió obtener medidas estructurales principalmente sobre planos de anisotropía como diaclasas, microfallas y estratificación

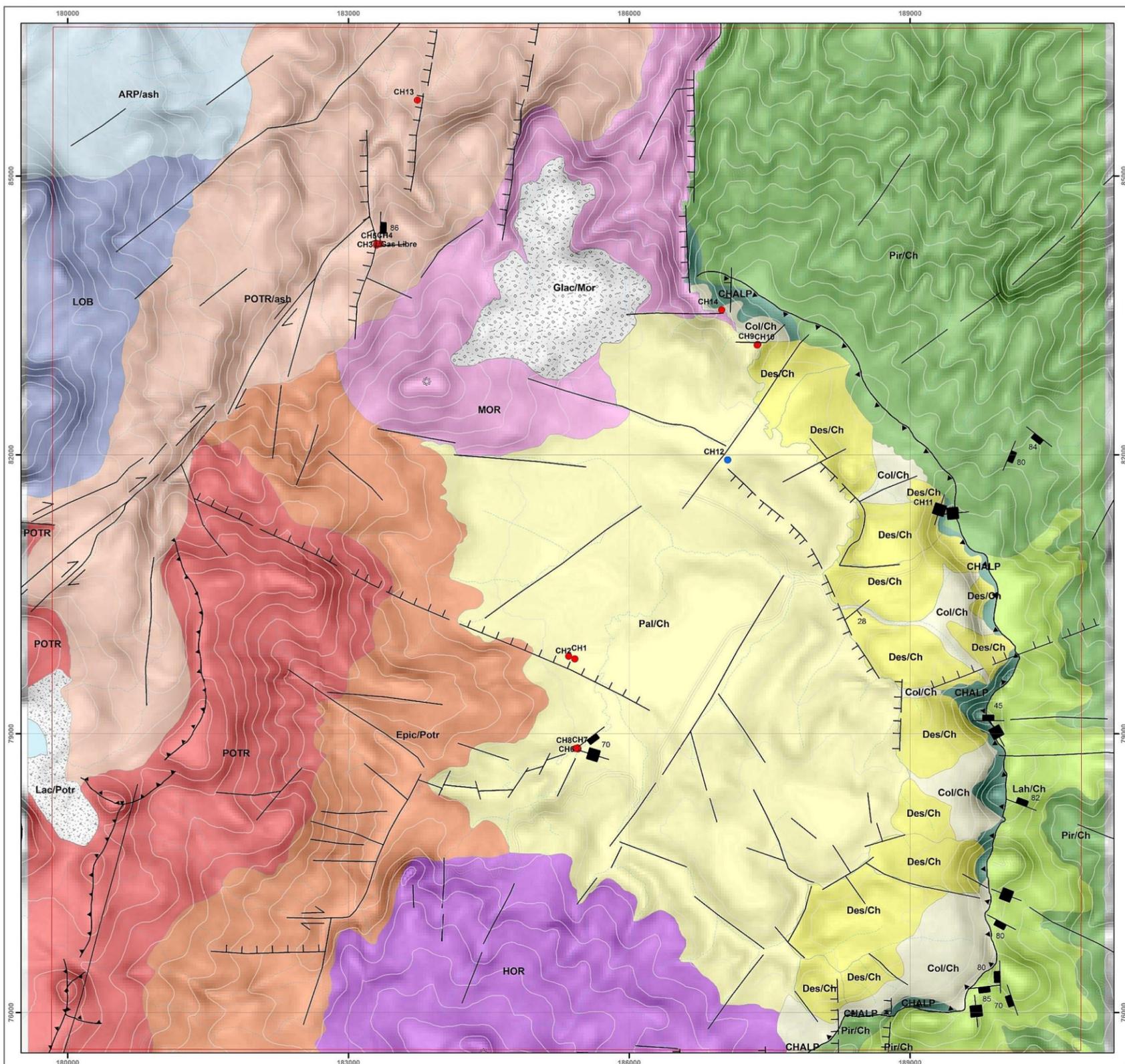
en series piroclásticas, permitieron distinguir tres familias de fallas con familias de diaclasas asociadas de similares direcciones. Estas familias se describen a continuación:

Familia N-S: Comprende una serie de fallas con rumbos comprendidos entre NNO y NNE que se extienden por toda la zona estudiada, pero que adquieren especial desarrollo en los sectores donde desaparece la morfología de la caldera. Se trata de fallas normales que hundan el bloque occidental y, por tanto, parecen controlar la desaparición del edificio caldérico hacia el Oeste.

Destacan las fallas del sector norte de la caldera, en la zona de Santa Bárbara de Car, donde adquieren una longitud kilométrica; se sumergen al norte bajo depósitos de cangahua y fluviales recientes. Posiblemente constituyen un sistema de splay extensional en cola de caballo en el extremo de la falla de Guachucal de rumbo NE-SO, que penetra en Ecuador desde la fronteriza región colombiana de Nariño. Esta falla debe tener una importante componente vertical a juzgar por el marcado relieve del sector SE. En la zona de La Esperanza, al igual que en la parte colombiana, se observa cómo las fallas norteadas cortan a las fallas NE-SO creando una morfología escalonada. Se supone que el salto es importante, hasta por lo menos un centenar de metros.

Familia NE-SO: A esta familia pertenece el principal accidente que atraviesa la zona de estudio: la falla de Aguas Calientes, que discurre por el ángulo NO del área cartografiada y posiblemente se prolonga hacia el NE en dirección a Tulcán. En realidad no se trata de una falla continua sino que constituye un sistema de fallas con una importante componente normal, que se extiende desde la zona de Potrerillos hasta la frontera colombiana. El río Chiquito, al sur de Tufiño, parece también seguir lineamientos estructurales N50°E que pertenecen a esta familia. Al oeste del paraje de El Morro se observan pequeños escalones extensionales y también zonas con restraining bends que denotan algunos puntos de transpresión a lo largo de estas fallas. Al SE de La Buitrera se observan fallas N54°E que cortan al sistema EO y se sitúan junto a los puntos termales CH-9 y 10, ambos alineados según dirección N40°E. Hay que recalcar que la medición de la orientación de los puntos de burbujeo de CO₂ en los puntos CH4, CH9 y CH10, se encuentra alineada con el rumbo de este sistema de fallas.

Familia E-O a ONO-ESE: Esta familia es frecuente en torno al volcán de El Morro, aunque también aparece en el sector de Las Tres Quebradas y al ESE del volcán Horqueta. En este último punto y, en general, en el borde Sur de la caldera, suelen ir asociadas a fallas N-S. Dentro de esta familia destaca la falla que, con rumbo N115°E y unos 3 km de longitud, discurre en la vertiente Norte de los relieves que definen la caldera de Potrerillos, unos 3-4 km al OSO de la hacienda de Chalpatán. Debe de tratarse de una estructura reciente pues parece afectar a un sistema de glaciares.



Símbolos Topográficos	Símbolos Geológicos	
Ámbito de Trabajo	Borde de cráter y paleocalderas	Falla
Lago	Borde de Caldera de Chalpatán	Falla deducida
Cursos de Agua	Centros de Emisión sin morfología definible	Falla normal
Curvas de Nivel (cada 30 m.)		Falla normal deducida
Viarío		Desgarre dextral
		Estratificación
		Diaclasi
		Diaclasi subvertical

Estudio de Prefactibilidad:
MODELO GEOTÉRMICO INTEGRAL de la CALDERA DE CHALPATÁN
Mapa Geológico y de Muestreo de Aguas

Elaborado: Gladys Melián	Supervisado: Nemesio Pérez	Autores: Gladys Melián, Gequímica Enigo Hernández, Geólogo Cayetano Guillén, Geógrafo
Geographic Coordinate System: GCS_WGS_1984 WGS_1984_UTM_Zone_18N		Versión 3.0 Formato de Impresión DIN A 2 Enero de 2013

Localización de Muestras

- Aguas Termales
- Aguas Frías

0 250 500 1.000 1.500 Metros

Figura:

UNIDADES SEDIMENTARIAS RECIENTES	
Relleno de Caldera	Sedimentos Palustres Lacustres (Pal/Ch) Deslizamientos Gravitacionales (Des/Ch) Coluviones y Piedemontes Inactivos (Col/Ch)
Edificio Potrerillos	Coladas Piroclásticas (POTR/ash) Depósitos Epiclásticos (Epic/Potr)
Edificio Chalpatán	Lahares (Lah/Ch) Piroclastos y Epiclastos (Pir/Ch) Lavas Andesíticas (CHALP)
VOLCANISMO CUATERNARIO Edif. Horqueta (HOR) Vitrófidos Andesíticos Edif. El Morro (MOR) Lavas Andesíticas	
VOLCANISMO PRE-CUATERNARIO ARP/ash Coladas Piroclásticas Ensilada del Arpezón LOB Materiales Volcánicos Edificio Cueva del Lobo	

Figura 1: Mapa geológico y de Muestreo de Aguas en la zona de estudio. Modificado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

b. MARCO HIDROGEOLÓGICO

La hidrogeología del área de estudio fue caracterizada durante en el Estudio de Prefactibilidad de la Caldera de Chalpatán (CGS, INP, CELEC-EP, 2013), de donde se ha tomado la información presentada en este apartado.

Desde el punto de vista geológico, se han descrito cuatro edificios volcánicos cuyas litologías asociadas han sufrido un activo proceso de meteorización favorecido por el régimen de precipitaciones abundantes, tectónica activa y glaciaciones. Todos estos procesos generan alteraciones tanto de la matriz de la roca como de los minerales que la conforman, produciendo en general una disminución de la porosidad a lo largo del tiempo, siendo ya en su estado original bastante baja. Solo la tectónica activa y los fenómenos de disolución tienen capacidad para incrementar la permeabilidad de las zonas fracturadas.

En general, la zona de estudio se encuentra recubierta por una capa de cangahua y depósitos glaciares muy desarrollada, con alto contenido en arcilla y por lo tanto de naturaleza prácticamente impermeable. Sin embargo se detalla a continuación la caracterización hidrogeológica de los distintos depósitos descritos en el apartado anterior.

Materiales asociados al edificio de Chalpatán

Las coladas de lava andesítica suelen caracterizarse por una porosidad de origen secundario por fracturación muy poco desarrollada. Donde afloran, presentan una acusada alteración, por lo que las discontinuidades suelen estar selladas, dificultando el almacenamiento y movimiento del agua en su interior. Desde el punto de vista hidrogeológico, se consideran como acuícludo – acuífugo, con valores de permeabilidad baja. Englobadas en las coladas andesíticas, pueden aparecer brechas autoclásticas, que presentan una mayor permeabilidad, pero de escasa continuidad lateral y por lo tanto sin interés hidrogeológico.

Los depósitos piroclásticos y epiclásticos tienen una porosidad primaria de tipo intergranular. La permeabilidad es muy heterogénea y depende de su composición litológica, granulometría y grado de compactación. Tienen una permeabilidad de tipo medio – baja y se consideran como un acuícludo – acuífugo multicapa, debido a la heterogeneidad litológica.

Los depósitos de lahares, están clasificados como materiales de permeabilidad media - baja, debido a que están formados por grandes bloques con matriz limo-arcillosa. La porosidad es de tipo primario intergranular. Se pueden considerar desde el punto de vista hidrogeológico como acuícludos libres.

Edificios volcánicos Morro y Horqueta

Ambos edificios están representados por lavas andesíticas, de potencias variables aunque con valores máximos de 10 – 15 metros. No presentan porosidad primaria y la secundaria es por fracturación con escaso desarrollo. Por su baja permeabilidad se consideran como acuícludo – acuífugo de escaso interés hidrogeológico. Englobadas en las coladas andesíticas de ambos edificios volcánicos, aparecen localmente brechas autoclásticas de diferente grado de conservación, que presentan una mayor permeabilidad que la roca encajante, pero de escasa continuidad lateral y por lo tanto ningún interés hidrogeológico.

En el caso del edificio Horqueta, aparecen algunos depósitos piroclásticos – epiclásticos de escaso espesor (2 – 3 m), constituidos por fragmentos centimétricos de pómez muy alterados a material arcilloso, por lo que se consideran también acuícludos de escaso interés hidrogeológico de permeabilidad baja.

Edificio volcánico Potrerillos

Las coladas de lava andesítica asociada a este edificio volcánico presentan una mayor potencia, respecto al resto de lavas de los edificios volcánicos de la zona de estudio. La porosidad es de tipo secundario por fracturación muy poco desarrollada, Se interpreta esta litología como acuicludo – acuifugo, con una permeabilidad baja. Al igual que otras lavas, intercalan brechas autoclásticas, muy erosionadas en la parte superior de las coladas y mejor conservadas en la parte inferior. Presentan una mayor permeabilidad, pero como el resto de estas estructuras de los otros edificios volcánicos, tienen escasa continuidad lateral y por lo tanto, ningún interés hidrogeológico.

Otras unidades sedimentarias

En la zona de estudio aparecen también una serie de litologías asociadas a ambientes lacustres, procesos gravitacionales y glaciales. Estas dos últimas son las de mayor permeabilidad. Los sedimentos palustres y lacustres afloran en la zona central de la caldera de Chalpatán y en los alrededores de la Laguna de Potrerillos. Son materiales afines a la cangahua, aunque de génesis diferente, con alto contenido en arcillas que los convierte en un acuifugo de muy baja permeabilidad.

Los materiales asociados a los deslizamientos gravitacionales, los coluviones y piedemontes inactivos, situados en el borde interior oriental de la caldera de Chalpatán, son los que presentan mayor interés hidrogeológico. Se caracterizan por tener una porosidad intergranular, cuya permeabilidad varía en función del contenido en limos y arcilla. Generalmente las facies proximales son más groseras, con menos contenido en finos y una mayor permeabilidad que las facies más distales. En general tienen una permeabilidad de tipo medio, considerándolos como acuitardos. Los depósitos glaciares presentan también porosidad intergranular y tienen el mismo interés hidrogeológico que los deslizamientos gravitacionales, coluviones y piedemonte. Se les asocia una permeabilidad media y se consideran acuitardos.

c. MARCO GEOQUÍMICO

La geoquímica tiene como labor principal determinar la abundancia absoluta y relativa y la distribución y migración de los elementos químicos en los diferentes ambientes que conforma la Tierra. Durante la exploración geotérmica ayuda a entender y determinar la relación entre el fluido emergente en la superficie con el fluido de origen en profundidad. A través de ella se puede realizar una estimación de la temperatura sub-superficial usando geotermómetros químicos e isotópicos y modelos de mezcla; además de identificar los tipos de fluidos y su huella geotérmica (si es que existiera).

Clasificación de fluidos termales

El tipo más común de fluidos que se pueden encontrar a profundidad en sistemas geotérmicos de altas temperaturas son de pH cercano al neutro, con el cloruro como anión dominante; sin embargo, otros tipos de aguas pueden estar presentes en un campo geotérmico, comúnmente derivadas de procesos químicos o físicos que han afectado a los fluidos profundos (Nicholson, 1993). De forma esquemática, las aguas subterráneas se pueden agrupar en tres tipos fundamentales, en base al contenido total de sales y el tipo de aniones dominantes que les acompañan:

- Bicarbonatadas: responden a tipos de aguas frías o hipotermales, con salinidades generalmente inferiores a 1 g/l, que caracterizan circuitos hídricos poco profundos

constituidos por depósitos aluviales, materiales volcánicos y/o formaciones carbonáticas aflorantes o subaflorantes.

- Sulfatadas: pertenecen a manifestaciones termales con características de salinidad comprendida entre 0.5 y 3 g/l y con valores medios de temperatura, y que pueden responder a circulaciones de profundidad media en rocas carbonatadas y formaciones de evaporitas; o bien, a la interacción de gases volcánicos con fluidos superficiales o a la condensación de vapor magmático en profundidad.
- Cloruradas: aún cuando no pueda afirmarse de forma definitiva, estas aguas suelen estar relacionadas con procesos de circulación más profunda que las de los otros tipos y podrían considerarse como típicas de fluidos geotérmicos profundos en sistemas de alta temperatura, donde podrían alcanzar concentraciones de 1 000 hasta 10 000 ppm.

Sin embargo, las tipologías de aguas cloruradas sódicas, deben tratarse con suma precaución para discriminar aquellas que han adquirido sus componentes químicos mediante procesos de intercambio iónico en condiciones específicas de presión y temperatura y sean, por consiguiente, representativas del sistema hidrotermal, de otras aguas contaminantes cuyos contenidos en cloro y sodio estén relacionados con procesos de disolución de depósitos salinos y/o intrusiones marinas. Generalmente al afrontar un estudio de carácter regional, se encuentran tipologías con características intermedias a las definidas anteriormente, en cuyo caso el estudio de detalle de las variaciones de relaciones iónicas de los principales constituyentes químicos, permite suponer la existencia de fenómenos de mezclas entre acuíferos de diferente procedencia, y de esta forma valorar su entidad (Instituto Geológico y Minero de España, 1985).

Existen muchas herramientas que permiten la clasificación de fluidos termales, uno de ellos es el diagrama ternario basado en las proporciones relativas de los iones de cloruro, sulfato y bicarbonato. En él se pueden distinguir varias zonas relacionadas con el origen de los fluidos o sus posibles interacciones (Figura 2).

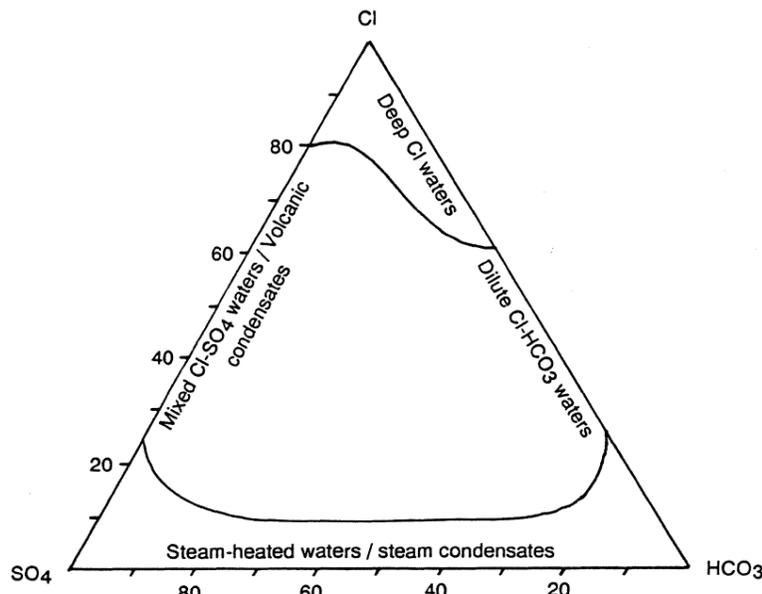


Figura 2: Diagrama ternario para clasificación de fluidos termales. Tomado de Nicholson (1993).

De acuerdo al periodo de interacción entre los fluidos y las rocas circundantes, se puede clasificar como aguas bien equilibradas/maduras y aguas no equilibradas/inmaduras; las primeras se

entienden como aguas que han interactuado con las rocas por un tiempo muy largo, al punto de haber llegado al equilibrio con respecto a las reacciones que convierten feldespato de Na a feldespato de K y feldespatos a silicatos laminares, dependiendo de la composición inicial de la roca; además estas aguas tienen pH casi neutro. Por otra parte las aguas inmaduras o no equilibradas son aguas que no han interactuado con las rocas un período de tiempo lo suficientemente grande para llegar al equilibrio con respecto a estas reacciones, y que pueden tener pH bajo (Magaña, 2019).

Geotermometría

La explotación y desarrollo de un recurso geotérmico requiere de manera imprescindible del entendimiento y conocimiento de las temperaturas existentes en el reservorio a profundidad. Dichas temperaturas pueden determinarse de manera directa a través de medidas en sondeos, o de manera indirecta por medio del análisis del quimismo de los fluidos, del contenido de isótopos estables, entre otros; pudiendo muchas veces obtener resultados muy divergentes por medio de ambos métodos. De manera particular, la aplicación de métodos indirectos, juega un papel muy importante durante la exploración de un área geotérmica. Los métodos indirectos basados en la geoquímica de los fluidos termales, pueden proporcionar información sobre los regímenes termales profundos dentro de las zonas de alta temperatura de un yacimiento, las cuales son inaccesibles a los pozos poco o moderadamente profundos perforados para determinar el gradiente térmico.

La finalidad de la termometría química es aplicar una serie de metodologías, que mediante el tratamiento de datos de composición química convencional, las composiciones isotópicas del agua y de la fase gaseosa incluida en el fluido, permiten establecer la temperatura de base de los fluidos en su circulación profunda, siempre en relación con el contexto geológico presente en el sistema. Su primer objetivo es establecer si las manifestaciones que observamos en superficie responden a una circulación profunda en áreas con gradientes geotérmicos próximos a los normales o están relacionados con yacimientos geotérmicos que se caracterizan por temperaturas más elevadas y cuyos fluidos sufren procesos de enfriamiento durante su ascenso hacia la superficie.

La aplicación de geotermometría química requiere de un conjunto mínimo de datos, obtenidos a partir de análisis químicos e isotópicos de los fluidos termales. Además, es fundamental que las reacciones dependientes de la temperatura, existentes entre las rocas del yacimiento y el fluido, o los gases y el fluido, tiendan al equilibrio. Así también es necesario que no haya un reequilibrio después de que los fluidos abandonan el yacimiento (Fournier et al., 1974; Truesdell, 1976; Fournier, 1977; Ellis, 1979, en: Instituto Geológico y Minero de España, 1985).

Las técnicas geotermométricas disponibles para aplicación se pueden clasificar en: geotermómetros de solutos (catiónicos y de sílice), geotermómetros de gases, geotermómetros de equilibrio mineral y geotermómetros isotópicos. Mediante su aplicación y verificación se ha podido definir que a temperaturas relativamente altas, la mayoría del quimismo de los fluidos viene controlado por reacciones que dependen de la presión y temperatura; y puede verse afectado por los procesos de ebullición, mezcla, precipitación, disolución, entre otros que pueden producirse en profundidad. A continuación se detallan algunos principios y características de los distintos tipos de geotermómetros:

Geotermómetros de solutos (catiónicos y de sílice)

Están basados en equilibrios de fluido mineral dependientes de la temperatura. Son probablemente, las técnicas que se utilizan más ampliamente; sin embargo, a pesar de su amplia aplicabilidad, este tipo de geotermómetros presenta condicionantes para su utilización, algunas de ellas son:

- Las reacciones químicas que controlan las proporciones de los constituyentes químicos disueltos en el agua, deben tener una dependencia directa con la temperatura, y no estar relacionados con otros procesos.
- Todos los constituyentes que intervienen en una reacción que depende de la temperatura, deben estar representados en proporciones abundantes.
- Las reacciones entre el agua y las rocas del yacimiento y los componentes gaseosos, deben haber alcanzado el equilibrio, y son las que condicionan la cantidad y características de los constituyentes disueltos en el agua.
- El equilibrio debe alcanzarse a la temperatura del yacimiento, lo que supone una permanencia en contacto, suficientemente larga para alcanzar el equilibrio de reacción roca-agua.
- Un proceso de reequilibrio de las condiciones geoquímicas, o una variación de la composición en relación con temperaturas más bajas de la del yacimiento, debe excluirse en el planteamiento de modelos de circulación del agua en su trayecto desde el yacimiento hasta la superficie; solamente son admisibles pequeños procesos de reequilibrio.
- El fluido que procede del yacimiento no debe estar sometido a mezclas con otros fluidos más superficiales y con temperaturas de base más bajas; en caso contrario los resultados de dicha mezcla deben ser evaluados. (Instituto Geológico y Minero de España, 1985)

Geotermómetro de Sílice

Esta técnica está basada en la solubilidad mineral; los datos experimentales han proporcionado valores de solubilidad de la sílice en el agua en función de la temperatura, y a partir de ello es posible establecer gráficos y ecuaciones matemáticas que permiten determinar la temperatura de base en función del contenido en sílice de la muestra. Algunas de las ecuaciones más extendidas fueron propuestas por Fournier (1977), Fournier y Potter (1982), Arnorsson (1985), Arnorsson (1983), entre otros. Por otra parte el geotermómetro gráfico de sílice más usado está basado en la relación entre el contenido de sílice (mg/kg o ppm) y la temperatura (°C) o la entalpía (J/g), por medio de la cual se describe la curva de solubilidad del cuarzo en la que es posible estimar la temperatura del reservorio conociendo la composición de los fluidos termales (Figura 3).

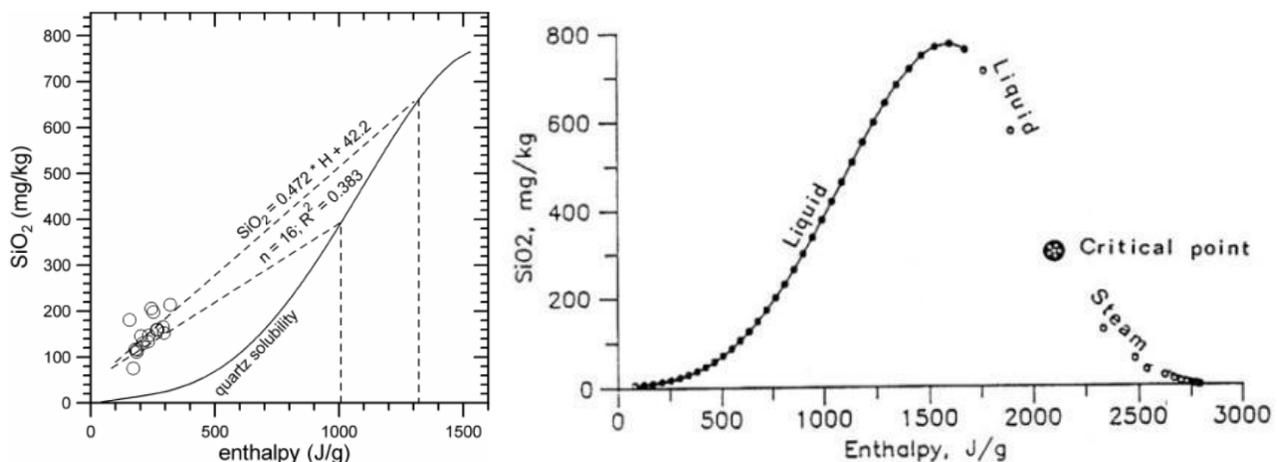


Figura 3: Diagrama sílice-entalpía; Curva de solubilidad del cuarzo en función de Entalpía (Fournier, 1981) y líneas de mezcla a diferentes temperaturas. Tomado de Matus (2019)

La concentración en sílice de las aguas geotermales puede estar controlada por uno de los diferentes polimorfos de la sílice (cuarzo, calcedonia, o sílice amorfa); de manera general el cuarzo es el menos soluble, seguido de la calcedonia, cristobalita y el ópalo que es la fase más soluble. A temperaturas comprendidas entre los 150 y los 250°C aproximadamente, el contenido en sílice de las aguas geotermales está controlado por el cuarzo. A temperaturas superiores pueden producirse rápidamente procesos de reequilibrio, dando probablemente lugar a la deposición del cuarzo cuando las soluciones se enfrían. Además, la solubilidad de la sílice amorfa puede verse superada a medida que el fluido se enfría, y dado que la sílice amorfa precipita más rápidamente que el cuarzo, se pueden producir depósitos de ópalo en las zonas próximas a la superficie del yacimiento. Como resultado de dicha precipitación de la sílice, el geotermómetro de la sílice no indica generalmente temperaturas superiores a los 250°C.

Además el geotermómetro de cuarzo puede verse afectado por factores como: los efectos de separación del vapor, la polimerización de la sílice después de la toma de muestras como resultado de una mala conservación de las mismas, el control de la sílice por otros polimorfos de la sílice, el efecto del pH y la dilución de las aguas termales.

A temperaturas por debajo de los 150-180°C, otros polimorfos de la sílice podrían controlar el contenido en sílice del fluido. Según White (1970) (en Instituto Geológico y Minero de España, 1985), cuando el agua se enfría por debajo de los 180°C se pueden originar precipitaciones de sílice, cuya velocidad disminuye muy rápidamente a temperaturas más bajas. Asimismo este autor sugiere que este geotermómetro no debe utilizarse en el caso de aguas con pH ácido, o bajas concentraciones de ion cloruro, porque las aguas a temperaturas próximas a los 100°C atacan a las rocas silicatadas, alcanzando valores elevados de concentración de SiO₂ amorfa, que es muy soluble.

El efecto de dilución originado por la mezcla entre las aguas termales y las no termales origina errores en la estimación de la temperatura, que muchas veces invalidan el geotermómetro. El resultado es que las aguas frías tienen concentraciones más bajas de sílice que la aportada por el agua termal, por tanto la concentración de la mezcla daría valores de temperatura inferiores a los reales.

Geotermómetros catiónicos

Los geotermómetros catiónicos fueron propuestos y modificados durante los años 70's y 80's. Incluyen los geotermómetros Na/K de Fournier (1976), de Truesdell (1976), de Arnorsson et al. (1983), de Giggenbach (1988), entre otros; el Na-K-Ca de Fournier y Truesdell (1973); el Na/Li de Fouillac y Michard (1981); el Na-K-Ca-Mg de Fournier y Potter (1979); y el geotermómetro K-Mg propuesto por Giggenbach et al. (1983); algunos de ellos se describirán brevemente a continuación. Además es común la aplicación del método gráfico que incluye las concentraciones relativas de Na, K y Mg en la determinación de la temperatura de los reservorios geotérmicos, propuesto por Giggenbach (1988) (Figura 4).

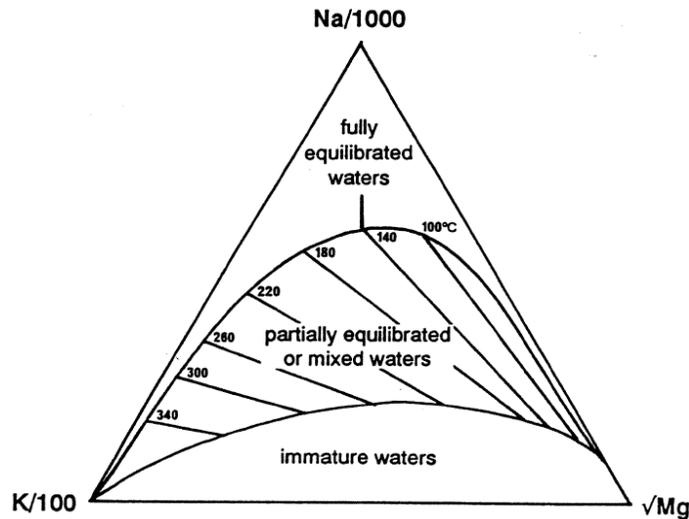


Figura 4: Diagrama ternario Na-K-Mg para determinar la temperatura del reservorio, propuesto por Giggenbach (1988). Tomado de Nicholson (1993).

Geotermómetro Na/K: El geotermómetro Na/K es particularmente de utilidad en ambientes de alta temperatura por encima de los 150-180°C, aunque en ocasiones se puede también conseguir datos fiables sobre la temperatura para yacimientos con temperaturas de hasta 100°C. Algunos autores argumentan que a temperaturas por debajo de aproximadamente 200°C, tienen lugar reacciones de intercambio iónico entre los fluidos geotermales y los minerales arcillosos, dando lugar a estimaciones demasiado altas de la temperatura. A pesar de las dificultades potenciales, el geotermómetro Na/K a menudo proporciona buenos resultados, dado que está menos afectado por los procesos de dilución o separación de vapor que muchos de los otros geotermómetros en uso (Instituto Geológico y Minero de España, 1985).

En el caso de manifestaciones de agua profunda que sufre procesos de enfriamiento durante su ascenso hacia la superficie, y en particular en aquellos casos donde se origina la ebullición, las reacciones de intercambio que regulan las relaciones molares de Na/K son más lentas que las que regulan la solubilidad de la sílice, por lo que en estos casos de posibles enfriamientos del agua termal en su ascenso, el geotermómetro del Na/K es más fiable en cuanto a valorar la temperatura profunda, reportando valores superiores a los del geotermómetro de la sílice.

Geotermómetro de Na-K-Ca: este geotermómetro proporciona estimaciones fiables de temperatura sobre un rango mucho más amplio que el geotermómetro de Na/K; su confiabilidad se encuentra en el rango de 100 a 300°C. Las temperaturas geotermométricas pueden verse afectadas por procesos de ebullición, procesos de mezcla con agua fría, presión parcial de CO₂ en solución, reacciones de intercambio con otros iones y contenidos elevados de CO₂ y Mg (es necesaria la corrección por Mg) (Nicholson, 1993). El efecto de los procesos de ebullición es fundamentalmente reducir el contenido de Ca en los fluidos mediante la precipitación de calcita. En este caso las temperaturas calculadas serán demasiado elevadas. El efecto de dilución será pequeño si la salinidad del agua a temperatura elevada es mucho mayor que la del agua fría con la que se mezcla. Los efectos de la dilución aumentan a medida que aumenta la cantidad de agua fría. Dado que es muy difícil evaluar la extensión de los procesos de mezcla, las temperaturas geotermométricas deben ser utilizadas con extrema precaución.

En general el método Na-K-Ca proporciona mejores resultados que el método Na/K, sobre todo cuando se aplica a medios de circulación en ambientes muy ricos en calcio que no han sufrido procesos de precipitación de carbonato cálcico. En los casos que hayan sufrido precipitaciones de carbonatos, el geotermómetro proporcionará temperaturas anómalas del acuífero, con valores más elevados que los reales. En general las aguas con presión parcial de CO₂ superiores a 5 x 10⁻³ atm proporcionan valores de temperatura erróneos por exceso. Estas desviaciones están relacionadas con el proceso de desequilibrio relacionado con la solución de CO₂ y disociación de ácido carbónico. (Instituto Geológico y Minero de España, 1985)

Geotermómetros de gases

Los geotermómetros gaseosos han sido utilizados para predecir las temperaturas del subsuelo en base a la concentración química de los mismos en la superficie, como producto de las reacciones fluido-gas-mineral, y su equilibrio. La abundancia de los gases nobles ha sido utilizada para estudiar la dinámica del fluido en los sistemas geotérmicos. Las proporciones de gases con diferentes afinidades hacia el agua, se han utilizado para definir los procesos de ebullición en el subsuelo. Generalmente los geotermómetros de gases se utilizan cuando los geotermómetros de solutos no pueden ser aplicados debido a la inexistencia de agua en la superficie, con la presencia únicamente de manifestaciones de gases en fumarolas y suelos con emanaciones gaseosas (Magaña, 2019).

Teniendo en cuenta la composición de los gases mayoritarios, se suelen aplicar diferentes geotermómetros teóricos en base a sus ecuaciones de equilibrio, como: Hidrógeno (H₂), Amoníaco (NH₃), Sulfuro de Hidrógeno (H₂S), Fisher-Tropsch (FT), Dióxido de Carbono (CO₂), Hidrógeno/Argón - Dióxido de Carbono/Argón (H₂/Ar - CO₂/Ar), D' Amore y Panichi, entre otros. La mayoría de geotermómetros de gases requieren que la relación gas/vapor y vapor/agua (para un reservorio de agua caliente) sean conocidos. Ya que el vapor y su fase de agua correspondiente, rara vez descargan a la superficie juntos, esas relaciones no pueden ser determinadas para manantiales calientes o fumarolas. Por lo tanto, esto ha limitado la aplicación de la mayoría de los geotermómetros de gas a las descargas de pozos. Las excepciones a esto son el geotermómetro empírico de D'Amore y Panichi (1980), basado en el sistema CO₂-H₂S-H₂-CH₄, y los geotermómetros de CO, CO₂ y H-Ar; Estos pueden aplicarse tanto a descargas de vapor naturales como de pozos. (Nicholson, 1993).

Geotermómetro de D'Amore y Panichi: CO₂-H₂S-H₂-CH₄

Constituye un geotermómetro empírico propuesto en 1980; está basado en las reacciones del carbono elemental (grafito), el dióxido de carbono y el hidrógeno para formar metano; y la anhidrita y la pirita para formar sulfuro de hidrógeno. No es aplicable para todos los campos, sin embargo funciona en muchos de ellos, principalmente en ambientes sedimentarios (carbón) y fuertemente oxidados (Matus, 2019). La ecuación de aplicación de este geotermómetro se presenta a continuación:

$$T = \frac{24775}{(2\log(CH_4/CO_2) - 6\log(H_2/CO_2) - 3\log(H_2S/CO_2) - 7\log P_{CO_2} + 36.05)} - 273.15$$

CO₂>75% de los gases totales, P_{CO₂}=1bar;

CO₂<75% de los gases totales, P_{CO₂}= 0.1 bar

En gases con CO₂>75%, H₂S>2H₂ y CH₄>2H₂, P_{CO₂}=10 ba

Geotermómetro de Cuadrícula FT-HSH2

El geotermómetro de cuadrícula o grid FT-HSH2 (Figura 5) es un método basado en el equilibrio para la reacción de Fischer-Tropsch y en las expresiones combinadas para pirita-magnetita y pirita-hematita (FT-HSH2), que fue desarrollado por D'Amore (1998). Considera condiciones oxidantes más locales en el reservorio que implican la ocurrencia de una alta concentración de H_2S y una concentración relativamente baja de H_2 y NH_3 en el fluido (Barragán, Arellano, Portugal, & Sandoval, 2003).

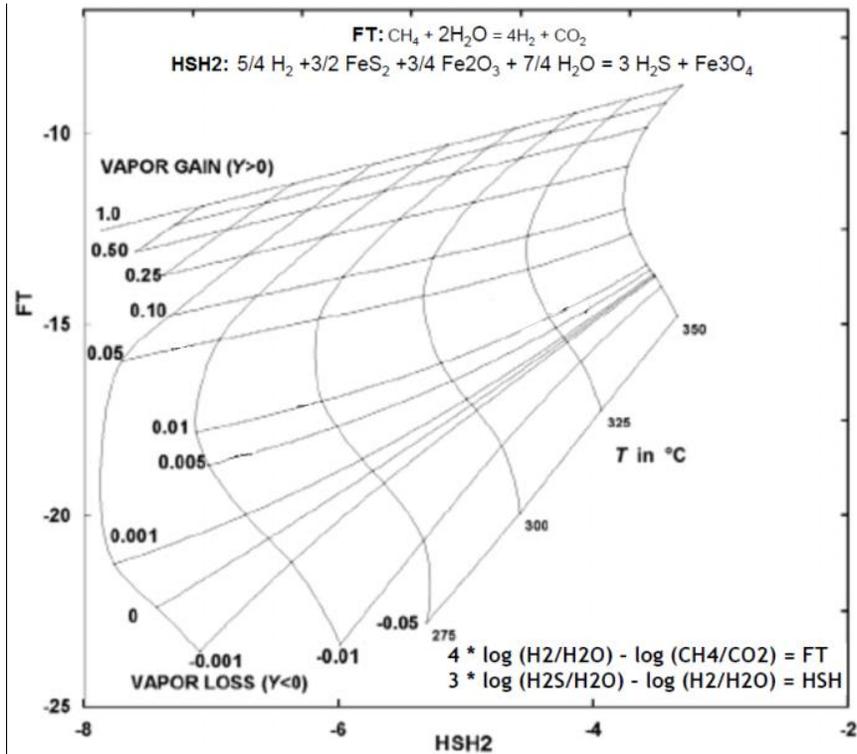


Figura 5: Geotermómetro de grid FT-HSH2. Modificado de Barragán y otros (2003).

Geotermómetro Hidrógeno/Argón - Dióxido de Carbono/Argón ($H_2/Ar-CO_2/Ar$)

La suposición de un único estado redox fijo (o R_H) para todos los sistemas hidrotermales permite que la reacción de disociación del agua dependiente de la temperatura se use como geotermómetro de hidrógeno. Combinado con argón como una medida de la P_{H_2O} , los geotermómetros de hidrógeno y dióxido de carbono fueron combinados por Giggenbach y Goguel (1989) para producir la cuadrícula de relación de gases ilustrada en la Figura 6. La grid supone la presencia de carbonato para el geotermómetro de dióxido de carbono y R_H de -2.8 para el geotermómetro de hidrógeno. La línea de equilibrio líquido representa el equilibrio del gas en un entorno completamente acuoso, mientras que la línea de equilibrio del vapor representa el equilibrio del gas en una fase de vapor a la misma concentración de gas argón. Las muestras que se grafican por encima de la línea de equilibrio del líquido indican alternativamente el equilibrio en condiciones de vapor, como en una capa de vapor, o una posible pérdida de argón, o una R_H mayor que -2.8. Las muestras que se representan debajo de esta línea indican alternativamente reequilibrio de hidrógeno a temperaturas más bajas, ganancia de argón o R_H menor que -2.8 (Powell, 2000).

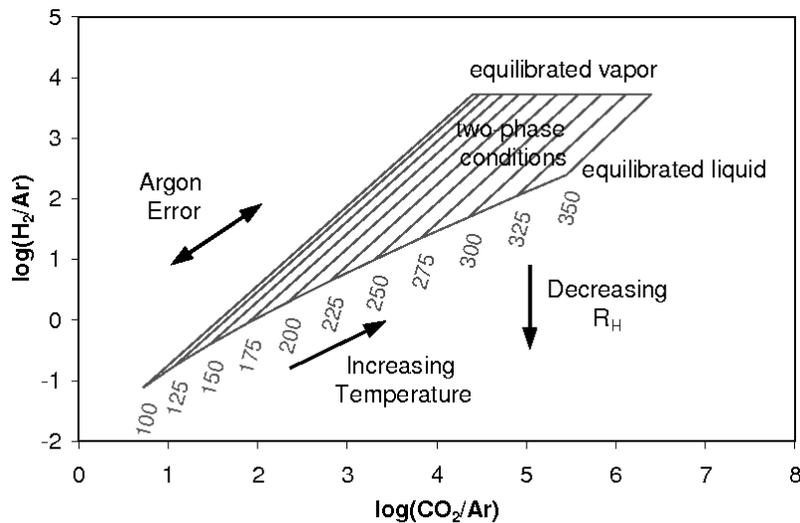


Figura 6: Grid de la relación $H_2/Ar - CO_2/Ar$. Tomado de Powell (2000).

Este método podría sufrir problemas y ambigüedades exclusivos del argón, por ejemplo que las concentraciones de argón se ven fuertemente afectadas por la contaminación del aire en las muestras de gas; o que la presencia común de agua magmática primaria significativa en los sistemas geotérmicos de cómo resultado una concentración de argón mucho más baja.

Geotermómetros de equilibrio mineral

Los geotermómetros de equilibrio mineral se han desarrollado en respuesta a las diferencias que pudieran existir entre las temperaturas de reservorio obtenidas mediante distintos métodos convencionales; estas diferencias son el producto de distintas velocidades de reacción para los componentes de un fluido termal; en base a esto se logró determinar que la mejor estimación de la temperatura estará en función del equilibrio de los componentes del fluido, es decir, que el sistema se encuentre en su estado de energía más bajo.

El estado de equilibrio de los minerales puede ser estimado por la relación de la actividad (Q) entre la constante de equilibrio (K) en un rango de temperaturas; al mismo tiempo este equilibrio se relaciona con el índice de saturación (IS) particular para cada mineral, que es el grado de solubilidad de los minerales a diferentes condiciones de temperatura y presión; si el $IS=0$ se considera un estado de equilibrio, un $IS<0$ es la evidencia de una solución insaturada y un $IS>0$ se presentará en soluciones sobresaturadas. El IS se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$IS = \log Q - \log K = \log \frac{Q}{K}$$

De esta manera, las relaciones entre el quimismo del fluido y la mineralogía de las rocas del yacimiento pueden utilizarse para establecer las temperaturas posibles del subsuelo mediante la aplicación de varios modelos de equilibrio. Cada modelo requiere de análisis químicos completos y muy precisos de los fluidos, estimaciones o cálculos de los parámetros fluidos para las temperaturas de interés, tales como pH, y la presión parcial de los gases en la solución, datos sobre la termodinámica y la temperatura de la fase de interés, y conocimiento sobre las fases presentes en el yacimiento incluyendo sus composiciones y estados estructurales (generalmente desconocidos).

En la práctica se debe suponer que se ha alcanzado el equilibrio entre los fluidos y las rocas (lo cual es un hecho que se ha probado prácticamente imposible de demostrar) y que se han considerado los efectos de dilución o ebullición. Indudablemente a temperaturas por debajo de aproximadamente 200°C, hay suficiente evidencia que indica que no se ha alcanzado generalmente el equilibrio entre los fluidos y las rocas (Instituto Geológico y Minero de España, 1985).

Se debe considerar que debido a que este método geotermométrico estima las temperaturas a través del equilibrio entre el fluido hidrotermal y minerales de alteración como función de la temperatura, los minerales que se encuentran en equilibrio deben ser consistentes con los minerales de alteración encontrados en campos geotermales, de acuerdo a la interacción fluido/roca y con la geología encontrada (Tole, Ármannsson, Zhong-He, & Arnórsson, 1993).

Algunas limitaciones que podría presentar el uso de los modelos de equilibrio son: que la asunción de equilibrios químicos para ciertos compuestos y minerales podrían no ser validas en nuestro sistema; que las condiciones Redox asumidas en el modelo generalmente son difíciles de determinarse cuantitativamente; y que las bases de datos termodinámicas podrían no representar adecuadamente los equilibrios químicos que se establecen en nuestro sistema (Hernández, 2019). Según Tole, Ármannsson, Zhong-He & Arnórsson (1993), cuando se usan bases de datos termodinámicos con datos analíticos antiguos, se debe prestar atención a los métodos analíticos, especialmente en el caso de componentes importantes presentes en bajas concentraciones en el fluido, como el aluminio, para el que se pueden obtener temperaturas de equilibrio muy diferentes.

Geotermómetros de isótopos

Se ha comprobado por métodos experimentales que el fraccionamiento isotópico entre las moléculas que intervienen en una reacción es dependiente de la temperatura y que, en términos generales, el fraccionamiento disminuye con el aumento de la temperatura.

El conocimiento en detalle de los diferentes componentes químicos medidos mediante espectrometría y las relaciones de fraccionamiento de pares de componentes y sus relaciones isotópicas, ha permitido la utilización de estos parámetros para valorar la temperatura del yacimiento de donde proceden los fluidos. Como caso particular destaca por su eficacia el fraccionamiento isotópico y temperatura de los gases en la valoración de campos geotérmicos productores de vapor. La limitación en cuanto a la utilización de estos geotermómetros, radica en el caso de tratarse de elementos químicos de bajo grado de volatilidad, por lo que en muchos casos su participación en la fase volátil no es de forma primaria, y se han incorporado en zonas de condensación superiores, reflejando características diferentes al yacimiento principal.

La cantidad de gas contenido en los fluidos geotérmicos y las relaciones relativas es variable, pero por lo general el anhídrido carbónico es el componente mayoritario y puede llegar a constituir hasta el 90% del gas total contenido, estando el resto constituido por sulfhídrico, metano, hidrógeno y nitrógeno, los cuales se encuentran en proporciones similares. La coexistencia de diferentes componentes en los fluidos geotérmicos: vapor de agua, hidrógeno, anhídrido carbónico y metano, ha hecho establecer la interacción de los componentes en función de una reacción de equilibrio ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) que determina simultáneamente el fraccionamiento isotópico de los isótopos estables del carbono, hidrógeno y oxígeno (D'Amore y Panichi, 1980; Nuti et al., 1.980, en: Instituto Geológico y Minero de España, 1985).

d. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

La provincia de Carchi se encuentra ubicada en el extremo norte del valle interandino y de las Cordilleras Occidental y Real, entre los paralelos $1^{\circ} 12' 43''$ y $0^{\circ} 21' 50''$ de latitud norte y entre los meridianos $77^{\circ} 31' 36''$ y $78^{\circ} 33' 12''$ de longitud oeste; tiene una extensión de 3749.6 km^2 . Carchi, es la provincia más septentrional del Ecuador; está limitada al norte con Colombia; al este con la provincia de Sucumbios; al sur con la provincia de Imbabura y al oeste con la provincia de Esmeraldas. Está compuesta por seis cantones: Tulcán, Bolívar, Espejo, Mira, Montúfar y San Pedro de la Huaca; las cabeceras cantonales son: Tulcán, Bolívar, El Ángel, Mira, San Gabriel y Huaca, respectivamente. La capital provincial es la ciudad de Tulcán, al oeste de la cual está ubicada el área de estudio (Figura 7) con una superficie de aproximadamente 120 km^2 y una elevación promedio de 3500 msnm .

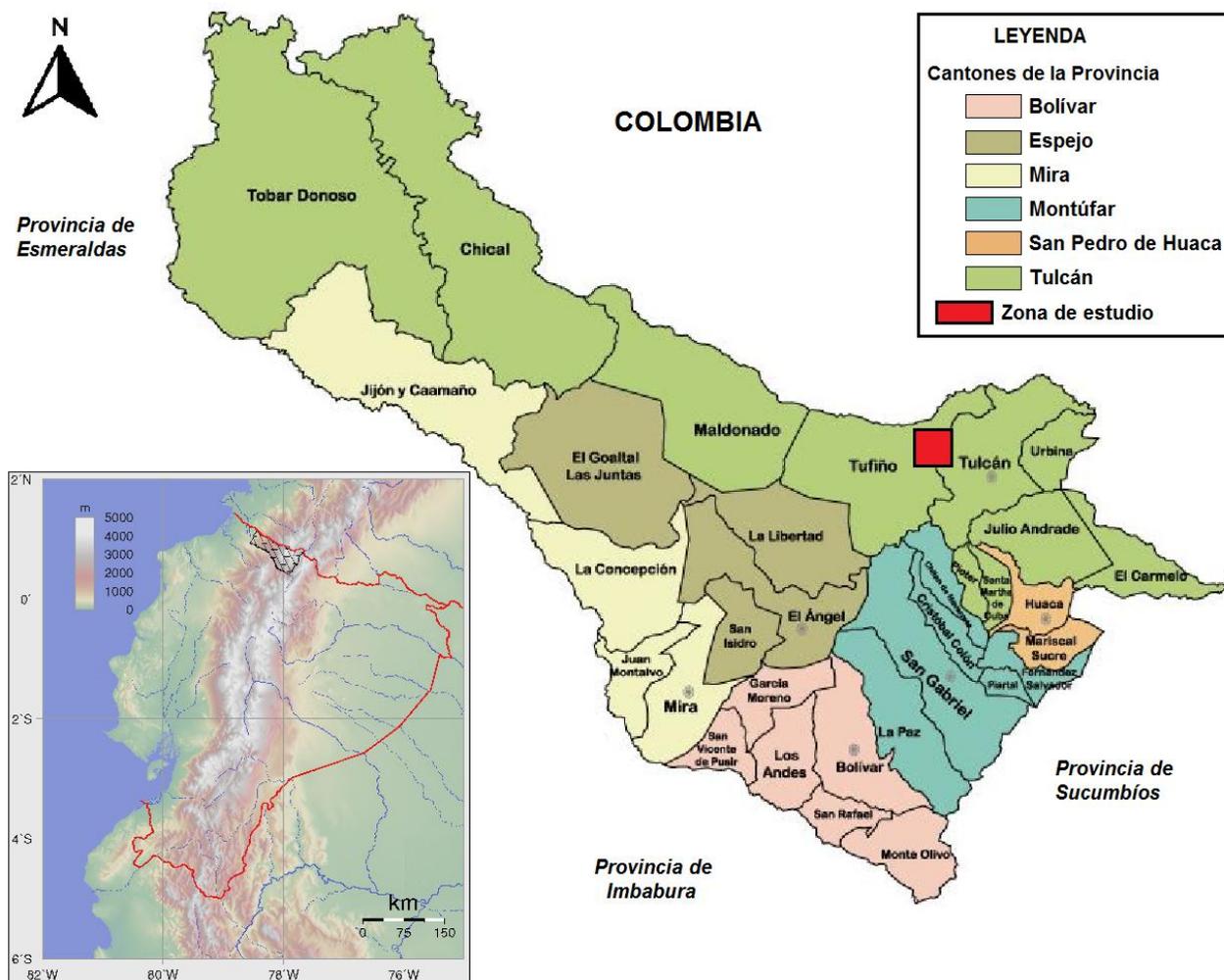


Figura 7: Mapa de ubicación de la Provincia de Carchi. Se señala la ubicación de la zona de estudio.

Según los resultados del último Censo de Población y Vivienda (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010) realizado en la Provincia de Carchi, su población alcanza los 164 524 habitantes lo que se traduce en una densidad poblacional de $43.87 \text{ habitantes/ km}^2$. Su población es multicultural y se autodenominan como mestizos (86.9%), afro-ecuatorianos (6.4%), indígenas (3.4%), blancos (2.9%) y montubios (0.3%). Aproximadamente el 60% de la población carchense no cuenta con una afiliación ni realiza aportes al sistema de seguridad social del país, esto se debe a que tanto hombres como mujeres subsisten mayoritariamente por medio de la ejecución de ocupaciones elementales

como limpieza, asistencia doméstica, ventas ambulantes, trabajo como peones agropecuarios, pesqueros o de minería, entre otros.

La naturaleza montañosa, con suaves valles de suelos fértiles de origen volcánico y glaciario, otorgan a la provincia buena capacidad agrícola; es así que la economía de la provincia se desarrolla en torno a actividades agrícolas, textiles, ganaderas, elaboración de productos lácteos, mercaderías varias, entre otros. En la Tabla 1, se muestra la categorización de las diferentes actividades económicas en las cuales se desempeñan los lugareños según el último censo de población y vivienda (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010).

Tabla 1: Ocupación en la Provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013)

Categoría de Ocupación	Población	%
Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca	24.811	36,14
Comercio	9.853	14,35
Transporte y almacenamiento	4.514	6,57
Administración pública y defensa	3.751	5,46
Industrias manufactureras	3.593	5,23
Enseñanza	3.375	4,92
Construcción	2.811	4,09
Actividades de de hogares como empleadores	2.066	3,01
Actividades de alojamiento y restauración	1.465	2,13
Atención Salud humana	991	1,44
Actividades de servicios administrativos	780	1,14
Información y comunicación	643	0,94
Actividades profesionales científicas y técnicas	641	0,93
Actividades financiera y de seguros	482	0,70
Artes, entretenimiento y recreación	183	0,27
Suministros de electricidad y gas	133	0,19
Distribución de agua y alcantarillado	128	0,19
Explotación minas y canteras	119	0,17
Actividades inmobiliarias	31	0,05
Actividades de organizaciones extraterritoriales	12	0,02
Otras actividades de servicios	1.074	1,56
No declarado	5.464	7,97
Trabajador nuevo	1.738	2,53
TOTAL	68.658	100

Actividad Agrícola

Como se muestra en la tabla anterior dentro de la provincia, las actividades económicas más desarrolladas son la agricultura y ganadería, principalmente en la zona alta andina. En la zona cálida y seca existen cultivos de fréjol y de algunas frutas propias de esta zona subtropical del noroccidente. En la zona suroccidental de la provincia los sectores agropecuario, comercial y de transporte constituyen los rubros más productivos (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010). Los cultivos de la actividad agrícola, según los resultados obtenidos en la Estadística Agropecuaria del Ecuador (ESPA) para el año 2010, se dividen en cultivos permanentes, transitorios y floricultura; representan un total de 4 810 hectáreas de cultivos permanentes (Tabla 2), 18 902 hectáreas de cultivos transitorios (Tabla 3) y 355 hectáreas de floricultura (Tabla 4).

Tabla 2: Cultivos permanentes en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

Cultivos permanentes Provincia Carchi 2010	Hectáreas	%
Caña de azúcar para azúcar	842	17,51
Café	107	2,22
Tomate de árbol	102	2,12
Plátano	28	0,58
Naranja	22	0,46
Caña de azúcar para otros usos	3	0,06
Cacao	2	0,04
Otros cultivos permanentes	3.149	65,47
Árboles o plantas permanente dispersos (Aguacate, Claudia, Chirimoya, Guaba, Lima, Limón, mandarina, manzana, naranja, tomate de árbol y otros)	555	11,54
TOTAL	4.810	100

Tabla 3: Cultivos transitorios en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

Cultivos transitorios Provincia Carchi 2010	Hectáreas	%
Papa	6.330	33,49
Fréjol seco	2.391	12,65
Cebada	1.654	8,75
Arveja tierna	1.505	7,96
Tomate riñón	631	3,34
Maíz duro seco	423	2,24
Haba tierna	420	2,22
Arveja seca	253	1,34
Maíz suave choclo	186	0,98
Maíz suave seco	173	0,92
Yuca	170	0,90
Fréjol tierno	143	0,76
Haba seca	31	0,16
Maíz duro choclo	13	0,07
Otros cultivos transitorios	4.579	24,22
TOTAL	18.902	100

Tabla 4: Floricultura en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

Floricultura Provincia Carchi 2010	Hectáreas	%
Rosas en campo abierto	287	80,85
Rosas bajo invernadero	68	19,15
TOTAL	355	100

Actividad Ganadera

La actividad ganadera es una de las actividades económicas principales en la provincia; un buen porcentaje de la superficie de la provincia está dedicada a la crianza de ganado vacuno, que para el 2010 alcanzaba 111 764 ejemplares (Tabla 5); esta actividad genera ingresos económicos a través de la producción de carne y leche; esta última alcanza un total de 316 955 litros en el año, según resultados obtenidos en la Estadística Agropecuaria del Ecuador (ESPAC) para el año 2010. En menor porcentaje, se encuentra también la crianza de ganado porcino (Tabla 6) y ovino (Tabla 7) que al 2010 sumaban 11 929 y 996 ejemplares respectivamente.

Tabla 5: Ganado vacuno en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

Ganado Vacuno (Bovino) en la Provincia de Carchi año 2010		
Características	Sexo	Cabezas de ganado
De menos de 1 año de edad (Terberos)	Machos	10.767
De menos de 1 año de edad (Terberas)	Hembras	18.597
De 1 año a menos de 2 años de edad (Toretas)	Machos	7.990
De 1 año a menos de 2 años de edad (Vaconas)	Hembras	21.762
De 2 o más años de edad (Toros)	Machos	3.796
De 2 o más años de edad (Vacas)	Hembras	48.852
TOTAL		111.764

Tabla 6: Ganado porcino en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

Ganado Porcino en la Provincia de Carchi año 2010	
Características	Cabezas de ganado
Menores de 2 meses de edad	4.093
Mayores de 2 meses de edad	7.836
TOTAL	11.929

Tabla 7: Ganado ovino en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

Ganado Ovino en la Provincia de Carchi año 2010	
Características	Cabezas de ganado
Menores de 6 meses de edad	332
Mayores de 6 meses de edad	664
TOTAL	996

Actividad Avícola

En las siguientes tablas podemos observar la cantidad de aves (Tabla 8) y la producción de huevos (Tabla 9) en la provincia de Carchi según las Estadísticas Agropecuarias del Ecuador ESPAC para el año 2010.

Tabla 8: Crianza de aves en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

Número de Aves en la Provincia de Carchi año 2010	
Características	Número de aves
Pollos	22.563
Gallos y gallinas	34.386
Patos	971
Pavos	584
TOTAL	58.504

Tabla 9: Producción de huevos en la provincia de Carchi. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

Producción de huevos en la Provincia de Carchi año 2010			
Producción	Autoconsumo	Ventas	Otros destinos
62.505	52.396	8.406	1.703

e. USOS DIRECTOS

Generalidades

Geotermia en pocas palabras significa: “energía, en forma de calor, que contiene la Tierra (roca)”, la cual puede ser aprovechada mediante tecnología apropiada para usos directos como la calefacción, o indirectos como la producción de electricidad en plantas geotérmicas o uso industrial. El uso industrial requiere la perforación de pozos geotérmicos de entre 1-3 km, a través de los cuales se extrae el fluido geotérmico (pozos productores) y se lo devuelve al subsuelo a través de los pozos inyectoros, haciendo sostenible el recurso geotérmico. (Castillo, 2019).

Un sistema geotérmico está comprendido por un área de recarga de agua lluvia que desciende en el subsuelo incrementando su energía interna (entalpía) mediante la transferencia de calor desde la energía térmica del interior de la tierra. El agua una vez alcanza una alta temperatura en la profundidad en inmediaciones o zonas cercanas al magma, puede ascender mediante pozos geotérmicos abiertos con esta finalidad (Figura 8), de esta manera el agua transporta la energía del interior de la tierra a la superficie, para transformarla a partir del vapor de agua altamente energético (Zapata Lesmes, 2015).

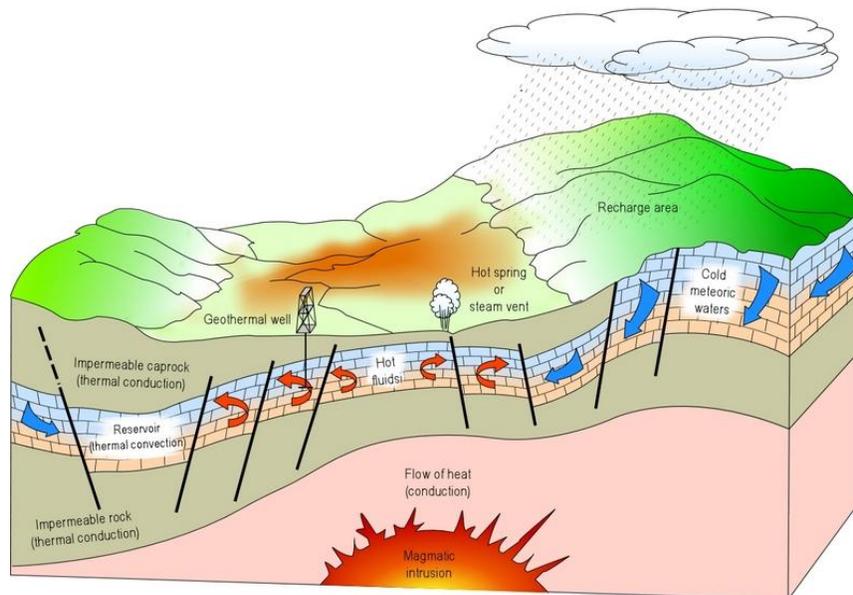


Figura 8: Esquema de los componentes de un sistema geotérmico. Tomado de Dickson y Fanell (2004).

La energía geotérmica también posee usos directos como la balneología, calentamiento de espacios, agricultura, acuicultura, secado de frutas entre otras actividades que requieren calor de media o baja temperatura (Figura 9). En etapas muy tempranas del desarrollo geotérmico, a nivel regional, estas técnicas pueden ser útiles considerando variables como la estimación de la temperatura del fluido a profundidad, a partir de datos de los fluidos superficiales disponibles en los estudios preliminares de las anomalías hidrotermales, así como la geología básica de la zona, y un modelo conceptual mínimo. Posteriormente se generan estudios de pre factibilidad, factibilidad y desarrollo, las cuales consisten en brindar mayor detalle del potencial geotérmico con estudios de geología, geofísica y geoquímica, así como su integración, entre otros.



Figura 9: Aplicación y clasificación de los recursos geotérmicos en base a su temperatura (°C). Tomado de Castillo (2019).

Los usos directos de la geotérmica en el ámbito mundial

La Figura 10 muestra la categorización según Lund, Bertani, & Boyd (2015) de los 10 países líderes en la aplicación de usos directos de la geotermia, organizados de acuerdo a energía térmica anual producida.

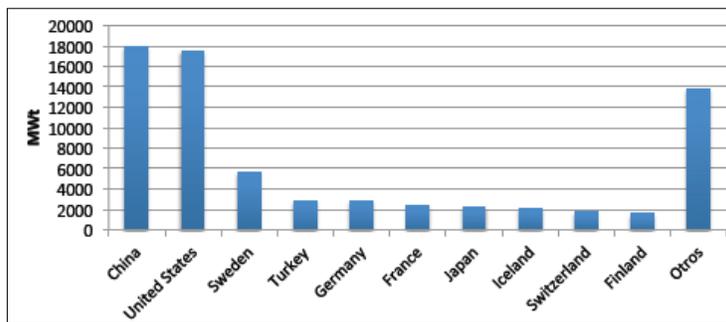


Figura 10: Países líderes en capacidad de aplicaciones de usos directos en el ámbito global. Tomado de Lund, Bertani, & Boyd (2015).

En la Figura 11 se presenta en escala logarítmica, los países líderes en el uso de aplicaciones de usos directos de la geotermia en Latinoamérica, ubicados de acuerdo a la generación de energía térmica, se destacan Brasil y México con una utilización mayor a los 1000 GWh térmicos por año; los demás países tienen capacidades menores a 90 GWh/año.

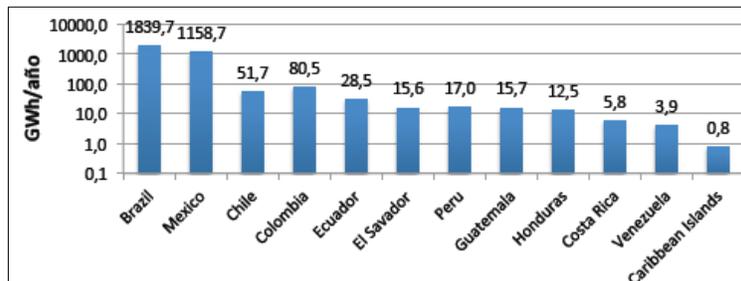


Figura 11: En escala logarítmica la producción de energía térmica anual para usos directos de Latinoamérica. Tomado de Lund, Bertani, & Boyd (2015).

Implementación de usos directos y los beneficios hacia el entorno medio ambiental y social.

Oduor (2010), plantea que si desde la concepción de los proyectos, las partes interesadas aportan y se integran al proyecto, se reducen riesgos futuros de pérdidas de tiempo e inversiones por

aspectos de mayor relevancia para el mismo. Además, a partir de la información recopilada, se elaboraron las bases de datos a emplear durante la etapa de análisis y procesamiento, como análisis de aguas, análisis de gases, entre otros.

A partir de las bases de datos elaboradas se desarrolló la re-evaluación de la información geoquímica del proyecto por medio del uso de técnicas geotermométricas y correlación con la información geológica. Las 14 muestras de agua existentes fueron sometidas a una evaluación geoquímica, mediante la que fueron clasificadas y caracterizadas para luego determinar su origen; durante esta fase las principales técnicas empleadas fueron la elaboración e interpretación de diagramas de Piper, diagramas ternarios, diagramas de Ludwig-Langelier, diagramas de Stiff y diagramas Scatter. Con base en el discernimiento del origen y posible evolución de las muestras de agua en contexto con el marco geológico del área de estudio, se logró definir aquellas muestras que habrían conservado sus características geotérmicas de origen.

Posteriormente se desarrolló la aplicación de diversas técnicas geotermométricas de fase líquida a las 14 muestras de agua, entre ellas se encuentran los métodos de estimación gráficos como el Triángulo de Giggenbach de Na – K – Mg y el diagrama Sílice – Temperatura; y los métodos netamente cuantitativos de cálculo de temperatura, que hacen uso de diversas ecuaciones basadas en el contenido de sílice, en la relación Na/K y en la relación Na-K-Ca de las muestras. Además se aplicó la técnica de determinación de geotemperaturas basada en el equilibrio mineral, por medio del uso de las herramientas GEOCAL y SOLVEQ, a través de las que se realizaron tres simulaciones siguiendo la metodología descrita por Linares (2014), la primera de ellas a partir de la composición original del sistema, la segunda con la fijación de aluminio por medio de la moscovita, y la tercera con la fijación de aluminio y la reducción del 10% de agua.

De manera similar, se procedió con la muestra de gas existente, caracterizándola y determinando su origen mediante el diagrama He – N – Ar; y posteriormente aplicando geotermómetros gráficos de fase gaseosa como el diagrama $L_{CA} - L_{HA}$ y el diagrama FT – HSH2 y el geotermómetro numérico de D'Amore y Panichi. De esta manera se logró establecer la geotemperatura más probable para el recurso geotérmico.

Con el conocimiento de las características socioeconómicas de la población en la zona de influencia del proyecto y del rango de temperatura más probable para el recurso, se plantearon algunas propuestas de aplicación en usos directos que podrían favorecer al desarrollo económico de las comunidades.

VIII. ANÁLISIS DE DATOS

Para el desarrollo del estudio, se cuenta con 14 muestras de manantiales dentro de la zona del proyecto, 12 de ellas son calientes con temperaturas de entre 26.8°C y 36.2°C, y las 2 restantes son frías, con temperaturas de 9 y 11.4°C; cada una de las muestras cuenta con análisis químicos que exhiben las concentraciones de los diferentes aniones, cationes e isótopos estables de interés (Tabla 10).

Tabla 10: Composición y características químicas de las 14 muestras de aguas recolectadas en el área de estudio. Modificado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

Sitio	pH	Eh	Conductividad	Temperatura	Na	K	Ca	Mg	F	Cl	B	As	HCO ₃	NO ₃	SO ₄	Br	SiO ₂	Fe	18O	2H
		(meV)	(uS/cm)	(°C)	(ppm)															
CH-1	6.78	121	414	27.4	49.66	12.51	29.46	17.26	0.34	19.11	3.48	0.46	277.63	0.16	17.04	0.06	103.95	1.45	-12.25	-81.00
CH-2	6.63	145	423	28.0	50.81	12.90	30.06	17.62	0.28	44.17	3.98	0.75	226.98	0.23	41.71	0.17	120.79	2.74	-12.01	-79.00
CH-3	7.03	125	430	29.1	58.39	13.68	31.86	11.54	0.28	44.21	5.02	0.68	222.10	0.23	41.81	0.18	121.66	0.58	-12.24	-83.00
CH-4	6.69	133	460	36.2	62.30	14.86	33.87	12.03	0.30	46.09	5.42	0.86	237.97	0.16	45.26	0.22	125.60	1.28	-12.12	-86.00
CH-5	6.60	146	443	35.5	60.00	14.08	33.67	11.91	0.27	46.51	5.23	0.73	231.26	0.31	44.02	0.22	122.91	1.52	-12.22	-80.00
CH-6	6.54	157	492	35.3	62.07	16.03	36.07	21.39	0.42	27.65	5.23	0.62	356.95	0.31	26.06	0.10	135.01	1.86	-12.06	-84.00
CH-7	8.09	164	486	27.1	65.52	17.20	35.87	20.90	0.46	28.40	5.90	0.65	366.10	0.16	24.91	0.10	133.87	0.11	-11.48	-79.00
CH-8	6.62	157	488	35.0	63.91	16.03	35.47	20.54	0.44	27.79	5.68	0.47	361.22	0.08	25.58	0.11	127.05	0.32	-11.83	-80.00
CH-9	6.26	179	500	31.1	44.60	12.90	47.29	31.47	0.27	25.74	2.94	0.03	417.97	1.56	17.95	0.10	122.07	2.78	-12.13	-84.00
CH-10	6.31	181	498	30.8	43.45	12.90	46.89	31.35	0.27	22.90	2.69	0.04	419.19	0.70	14.50	0.10	121.16	2.54	-12.11	-83.00
CH-11	6.15	256	36	9.0	2.53	1.56	2.40	1.09	0.06	1.28	0.07	0.00	25.02	1.17	0.86	0.00	25.36	0.14	-13.20	-87.00
CH-12	6.65	273	21	11.4	3.22	1.17	2.20	0.97	0.04	1.60	0.03	0.00	23.19	0.23	1.15	0.00	32.11	0.24	-12.41	-77.00
CH-13	6.73	148	285	26.8	34.48	8.99	22.64	9.48	0.21	22.30	2.56	0.53	170.24	0.16	21.60	0.10	93.15	0.02	-12.33	-86.00
CH-14	6.32	137	398	28.7	39.54	12.12	36.67	22.97	0.25	21.41	2.74	0.07	333.76	0.55	16.27	0.08	113.12	1.65	-11.90	-82.00

Además uno de los manantiales calientes presentó burbujeo durante el muestreo, por lo que se cuenta con análisis del gas recolectado en este único punto (Tabla 11). Esta muestra fue recolectada a una temperatura de 15.6 °C, en el manantial CH-4.

Tabla 11: Composición química de la muestra de gas libre recolectada en el sitio CH-4. Modificado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

SITIO CH-4	T	H ₂ O	CO ₂	H ₂ S	NH ₃	He	H ₂	Ar	O ₂	N ₂	CH ₄
	(°C)	(%Vol)									
Composic. Base húmeda	15.6	95.93000	0.83201	0.01437	0.00075	0.00035	0.00006	0.05166	0.00674	3.13000	0.01719
Composic. Base seca	15.6		20.42	0.3526	0.0183	0.0086	0.0014	1.2679	0.1654	76.86	0.4219

Estas muestras fueron sometidas a análisis mediante la aplicación de varias técnicas en diversos software, por medio de los que se obtuvieron los resultados que se presentarán en el siguiente apartado (Tabla 12).

Tabla 12: Resumen del análisis y procesamiento de datos realizados.

Software / Herramienta	Uso	Resultados
Aquachem 4.0	-Caracterización geoquímica de aguas termales y frías. -Determinación del origen de las aguas.	-Diagrama de Piper -Diagrama ternario -Diagramas de Ludwig-Langelier -Diagramas de Stiff -Diagramas Scatter
Grapher 4	-Determinación del origen de los gases. -Métodos gráficos de estimación de temperatura de fase líquida y fase gaseosa.	-Diagrama He – N – Ar -Triángulo de Giggenbach (Na–K–Mg) -Diagrama Sílice – Temperatura -Diagrama L _{CA} - L _{HA} - Diagrama FT – HSH2
GEOCAL – SOLVEQ	-Determinación del equilibrio mineral del sistema mediante la convergencia de los IS de diversos minerales.	-Índices de saturación de diversos minerales calculados a varias temperaturas.
	-Cálculo de geotermómetros	-Geotemperaturas en base al

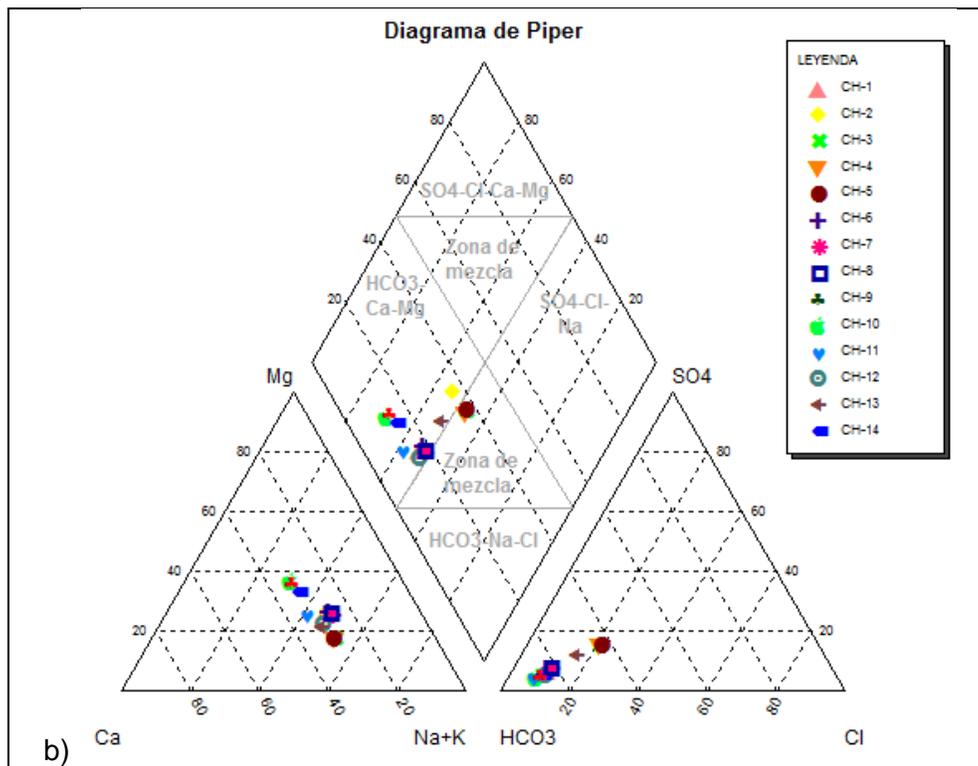
Hoja de cálculo Excel	de fase líquida y fase gaseosa. -Generación de gráficas	contenido de Sílice, de la relación Na/K y Na-K-Ca. -Geotemperatura con el método de D'Amore y Panichi. -Diagramas de equilibrio mineral.
-----------------------	--	---

Además, la información bibliográfica recopilada, referente a las diversas aplicaciones en uso directos que se han desarrollado para la geotermia alrededor del mundo, fue analizada con el fin de encontrar la opción idónea para el área de estudio, con base a las características socioeconómicas existentes.

IX. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Caracterización geoquímica de aguas

Los 14 manantiales existentes han sido clasificados y caracterizados de acuerdo a su composición química, específicamente, a su contenido de aniones y cationes. El análisis realizado pone en evidencia la naturaleza de los manantiales, que esencialmente, y a pesar de que 12 de ellas presentan temperaturas considerables, constituyen aguas bicarbonatadas con componente cálcico-magnésica (Figura 13, a). Sin embargo el diagrama de aniones muestra una ligera desviación de algunas muestras como la CH-2, CH-3, CH-4, CH-5 y CH-13, hacia los campos del sulfato y cloruro en proporciones similares; lo que podría ser el indicador de que las muestras presentan cierta huella geotérmica, aunque se encuentren bastante diluidas por la mezcla con aguas superficiales (Figura 13, b). Por otra parte, el diagrama de cationes muestra que los manantiales mayoritariamente presentan una tendencia de mezcla de magnesio, calcio, sodio y potasio; aunque se observa cierta aproximación hacia el campo del sodio y potasio, en el que las muestras CH-3, CH-4 y CH-5 presentan las mayores concentraciones de estos cationes.



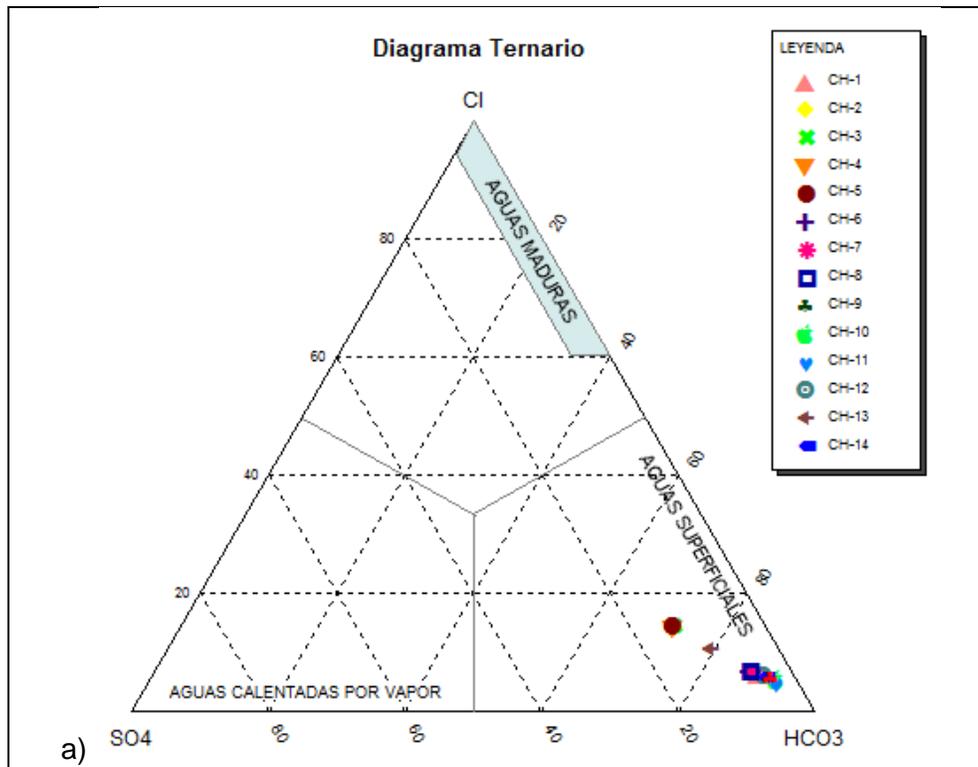


Figura 13: Diagrama de Piper (a) y Diagrama Ternario (b) de las muestras de aguas del área de estudio.

Los diagramas de Ludwig-Langelier realizados muestran algunas particularidades del conjunto de manantiales. La relación del cloruro y sulfato con el sodio y potasio exhibe que la mayoría de manantiales posee bajos contenidos de dichos iones, en especial se observa una pobre concentración de los aniones mencionados; sin embargo, los cationes presentan mayor dispersión de sus concentraciones. Se puede observar cierta tendencia (posible línea de mezcla) entre los manantiales fríos (CH-11, CH-12) que tienen características de aguas superficiales, y algunos manantiales calientes (CH-3, CH-4, CH-5 y CH-13) que presentan las mayores concentraciones de los iones de interés; esta tendencia podría ser el indicador de que dichos manantiales calientes tienen cierta huella geotérmica con dilución, conociendo que el agua geotérmica se caracteriza por la abundancia de iones de cloruro y sodio (Figura 14). En relación a dicha tendencia se observa un grupo de manantiales con ligero enriquecimiento en sodio y potasio pero no en cloro (muestras CH-8 y CH-1), y la muestra CH-2 que presenta enriquecimiento en cloruro y sulfato pero su contenido de sodio y potasio se ve disminuido; estas muestras posiblemente tengan influencia de otros procesos y la aplicación de geotermómetros debe ser a discreción, ya que no siguen la tendencia de las características aguas cloruradas sódicas geotérmicas.

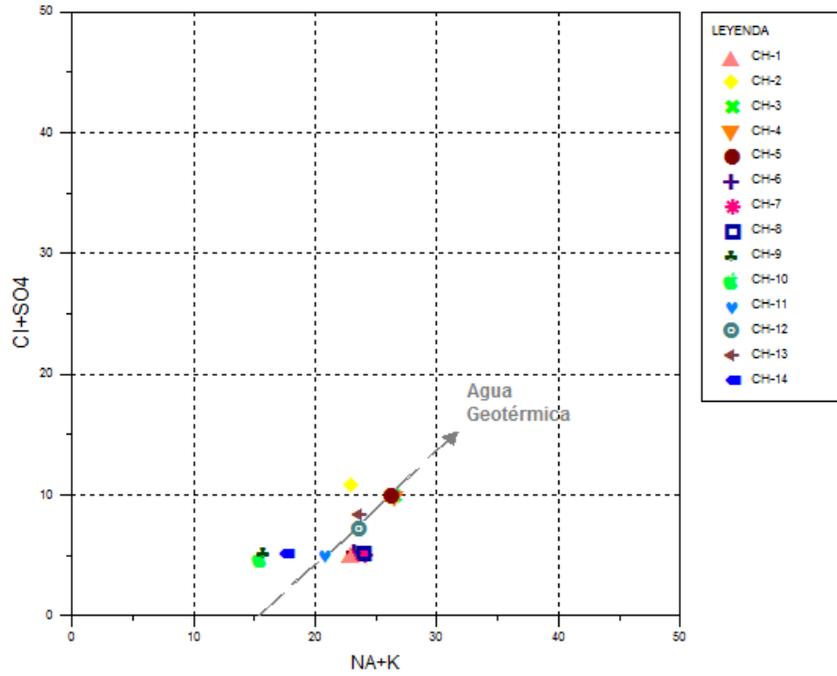


Figura 14: Diagrama de Ludwig-Langelier de cloruro más sulfato y sodio más potasio.

En el diagrama de la relación del cloruro y sulfato con el bicarbonato, se observa una clara separación entre los manantiales con mayores características de aguas superficiales (mayor concentración de bicarbonato), de los manantiales con cierta huella geotérmica (mayor concentración de cloruros y sulfatos) entre los que se encuentran las muestras CH2, CH3, CH4 y CH5 (Figura 15). La muestra CH-2 se podría considerar en la aplicación de geotermómetros, mas los geotermómetros catiónicos posiblemente no darían buenos resultados debido a que presenta diferencias en su concentración de sodio y potasio, tal como se observó en el diagrama previo, sin embargo, en el presente diagrama se observa que pudo haber tenido influencia de aguas maduras.

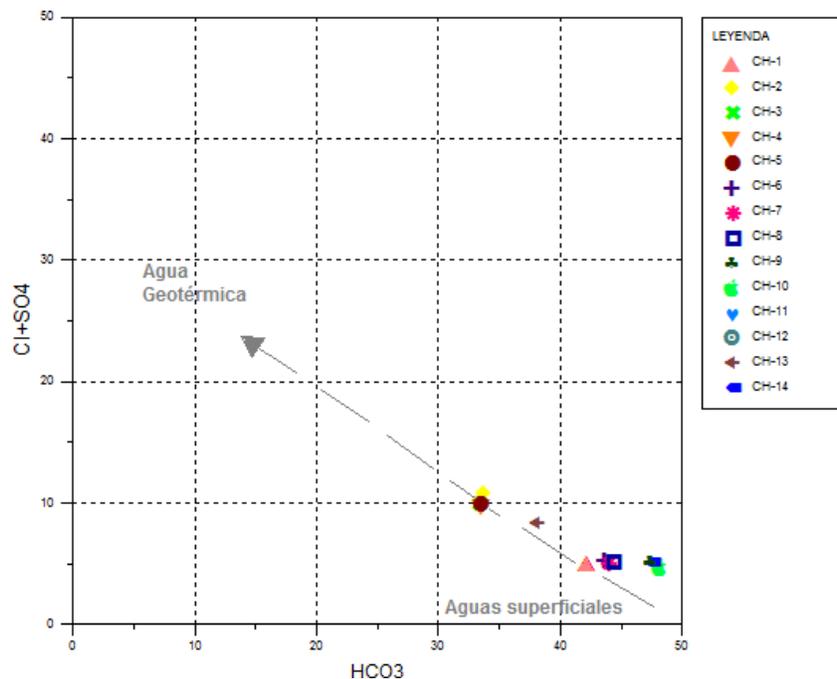


Figura 15: Diagrama de Ludwig-Langelier de cloruro más sulfato y bicarbonato.

Los diagramas de Stiff realizados han permitido agrupar los manantiales en cuatro grupos de acuerdo a su contenido de cationes y aniones principales. El grupo más abundante está constituido por los manantiales CH-2, CH-3, CH-4, CH-5 y CH-13, se trata de aguas bicarbonatadas, con importante contenido de sodio y cloruro, y menor contenido de sulfatos, calcio y magnesio (Figura 16, a); sus diagramas muestran aún la huella geotérmica característica de aguas maduras, con la particularidad de que se encuentran diluidas con aguas superficiales. El segundo grupo incluye a las muestras CH-1, CH-6, CH-7 y CH-8, constituyen manantiales con mayor contenido de bicarbonatos en referencia al grupo antes mencionado, mas su contenido de sodio y calcio es similar, no así el magnesio que tiene concentraciones ligeramente más altas y el cloruro y sulfato cuyas concentraciones son menores (Figura 16, b); estas aguas posiblemente contengan remanentes de aguas de altas temperaturas pero se han mezclado en gran medida con aguas superficiales. El grupo tres lo conforman las muestras CH-9, CH-10 y CH-14 que presentan el mayor contenido de bicarbonato, magnesio y calcio entre todos los manantiales; mientras que el sodio, cloruro y sulfato se reportan con valores inferiores a los grupos descritos previamente (Figura 16, c), por lo que pueden catalogarse como aguas provenientes de acuíferos superficiales. Las muestras CH-11 y CH-12 corresponden a aguas sin enriquecimiento de iones, sin embargo sobresale ligeramente el bicarbonato como anión más abundante (Figura 16, d); este grupo responde al patrón de aguas frescas de reciente caída, que no han logrado enriquecerse iónicamente por ser demasiado jóvenes.

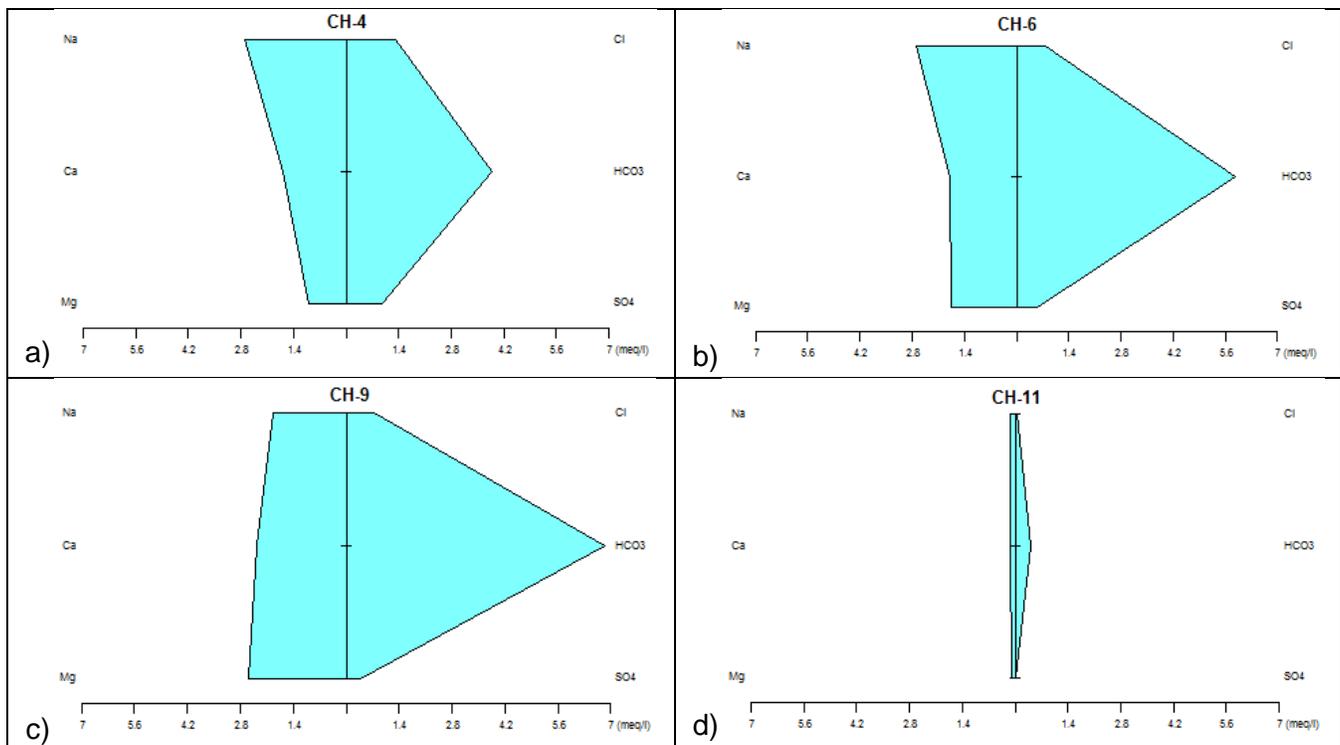


Figura 16: Diagramas de Stiff de las muestras más representativas de los distintos grupos.

En el diagrama de la relación cloruro (Cl) – boro (B) se observan dos tendencias en las muestras del área de estudio. La tendencia más favorecida en el contenido de dichos elementos tiene un factor de correlación (r) de 0.976, e incluye a las muestras CH-3, CH-4, CH-5 y CH-2 como las de mayor contenido de Cl y B; esta tendencia representa a las muestras con mayor huella geotérmica, además se encuentra alineada con las con las muestras CH-9, CH-10, CH-13 y CH-14 y con las aguas frescas de las muestras CH-11 y CH-12 a la base. La segunda tendencia apunta hacia un contenido

mayor de B que de Cl, incluye a las muestras restantes y tiene un factor de correlación (r) de 0.998 (Figura 17). Estas dos tendencias nos dan la idea de que las aguas recolectadas en el área de estudio provienen de dos orígenes diferentes uno con enriquecimiento de B y el otro relacionado a aguas geotérmicas maduras.

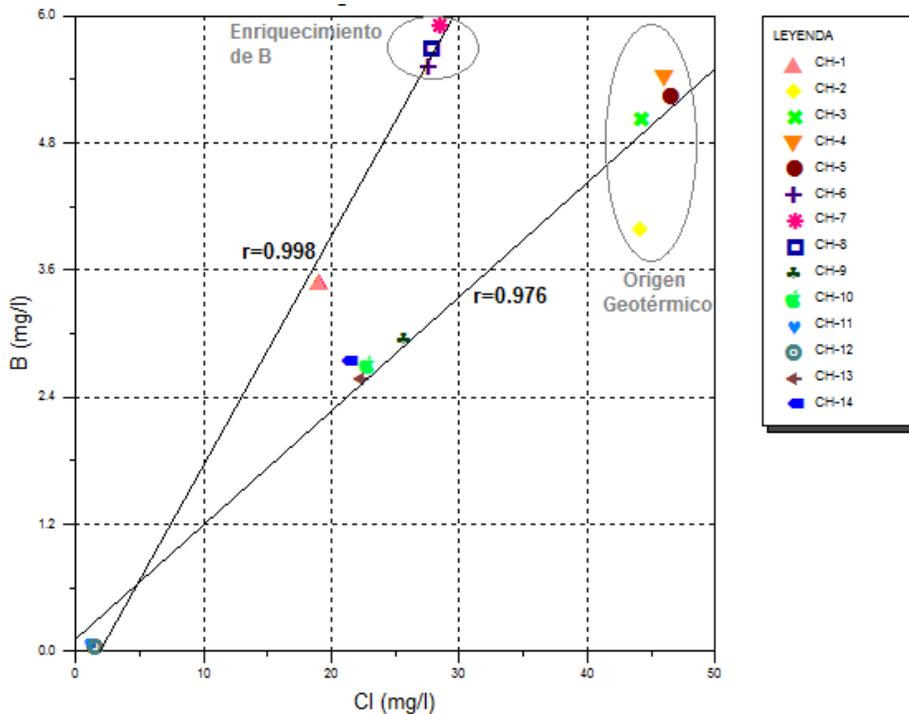


Figura 17: Diagrama de correlación entre Cl y B.

El diagrama de relación entre los cationes de sodio (Na) y potasio (K) muestra agrupamientos similares de las muestras de aguas en comparación con el diagrama Cl-B; asimismo se han definido dos tendencias de acuerdo al comportamiento de las muestras, la primera con un factor de correlación (r) de 0.999, incluye como muestras de mayor concentración de cationes a CH-3, CH-4 y CH-5, mientras que la segunda tendencia tiene un factor de correlación (r) de 0.991 e incluye a las muestras CH-6, CH-7 y CH-8; cabe recalcar que estas últimas muestras tienen mayores contenidos de Na y K que las muestras que incluye la primera tendencia (Figura 18). Debido a que las tendencias de las muestras son similares, la interpretación del origen de las aguas a partir de este diagrama podría dificultarse, ya que bien se podría tratar de un mismo origen para todos los manantiales, pero debido a la gran dilución de las muestras, y al comportamiento de las mismas en el diagrama Cl-B, no se puede asegurar lo mencionado.

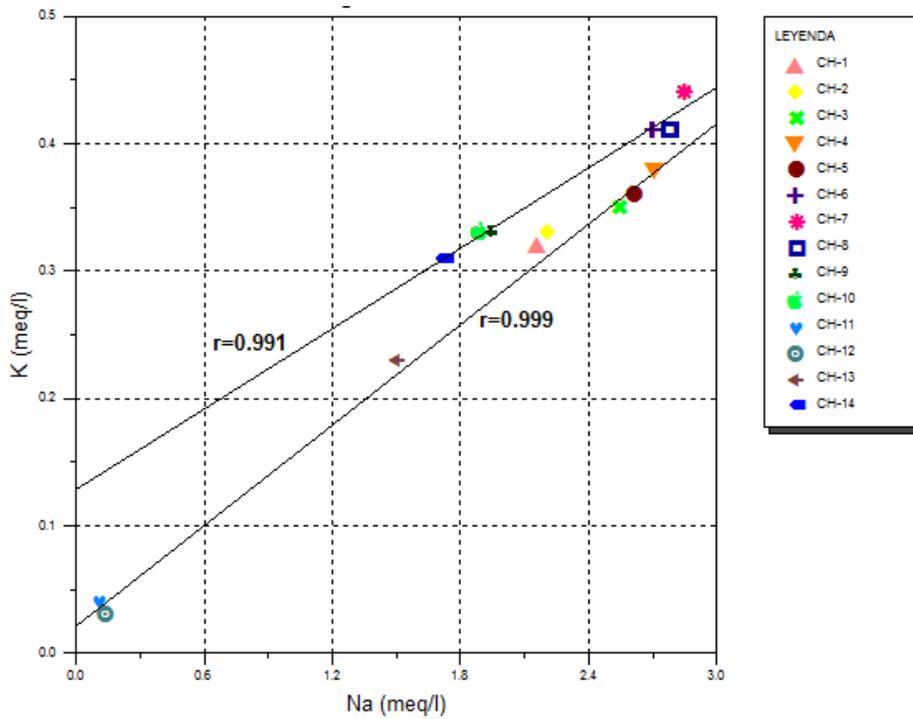


Figura 18: Diagrama de correlación entre Na y K.

El contenido de arsénico en las muestras de aguas es un indicador importante del origen de las mismas; el diagrama cloro (Cl) – arsénico (As) realizado permite observar que las muestras CH-2, CH-3, CH-4 y CH-5 presentan las mayores concentraciones de As (Figura 19), lo que contribuye a corroborar que serían las mejores representantes para la aplicación de geotermómetros, principalmente la muestra CH-4 que además presenta la mayor concentración de Cl y B.

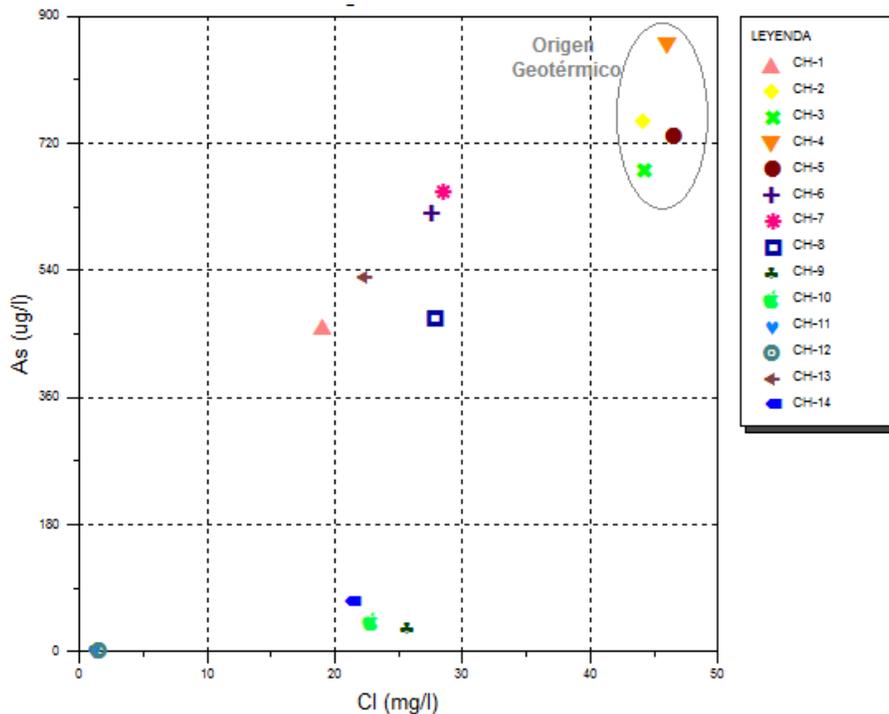


Figura 19: Diagrama de correlación entre Cl y As.

Como una herramienta adicional para determinar el origen de las 14 aguas, se ha elaborado el diagrama de Oxígeno-18 y Deuterio, en el que se ha trazado una aproximación de la línea meteórica local (LML) de Ecuador propuesta por Inguaggiato y otros (2010). Mediante esta técnica se puede observar que gran parte de las aguas están distribuidas sobre el trazo de la LML, a excepción de la muestra CH-4 que presenta una desviación positiva en el campo del Oxígeno-18, es decir, constituye un agua isotópicamente más pesada que las aguas netamente meteóricas (Figura 20). Esta diferenciación confirma la idea de que la muestra CH-4 conserva su huella geotérmica, por lo que sería la muestra de mejores características para la aplicación de los distintos métodos de geotermometría.

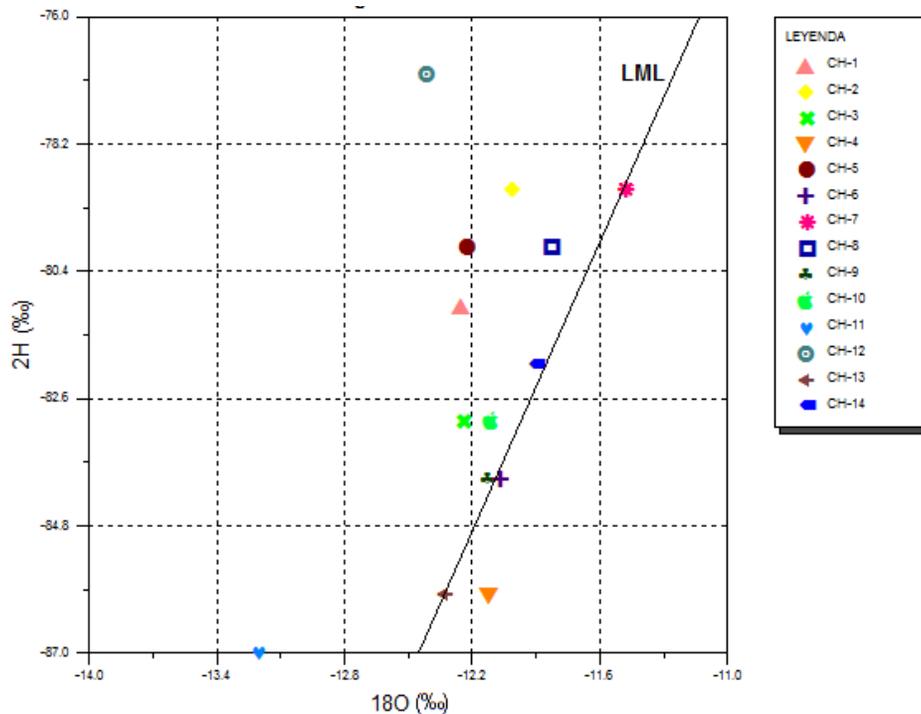


Figura 20: Diagrama de correlación entre Oxígeno-18 y Deuterio.

A manera de resumen se presenta a continuación un mapa en el que se observan las muestras de agua recolectadas en el área de estudio, ubicadas sobre la base estructural levantada. Las muestras se encuentran representadas mediante diagramas circulares de distribución de componentes en mg/l, que evidencian sus características químicas; la circunferencia central que se observa en algunas de ellas es proporcional a su contenido de cloruro, se ha seleccionado este componente debido a que representa uno de los indicadores de un origen geotérmico. Cabe recalcar que cada una de las muestras está ubicada sobre el trazo de alguna de las estructuras levantadas; y que como se ha mencionado, la muestra CH-4, así como CH-3 y CH-5 (en menor medida) son las aguas con características químicas mejor conservadas asociadas a un origen geotérmico. Además se puede observar que la muestra CH-13, que presentó características químicas ligeramente más diluidas que las muestras anteriormente mencionadas, estaría estrechamente relacionada a ellas por encontrarse sobre el mismo sistema de fallas (Figura 21).

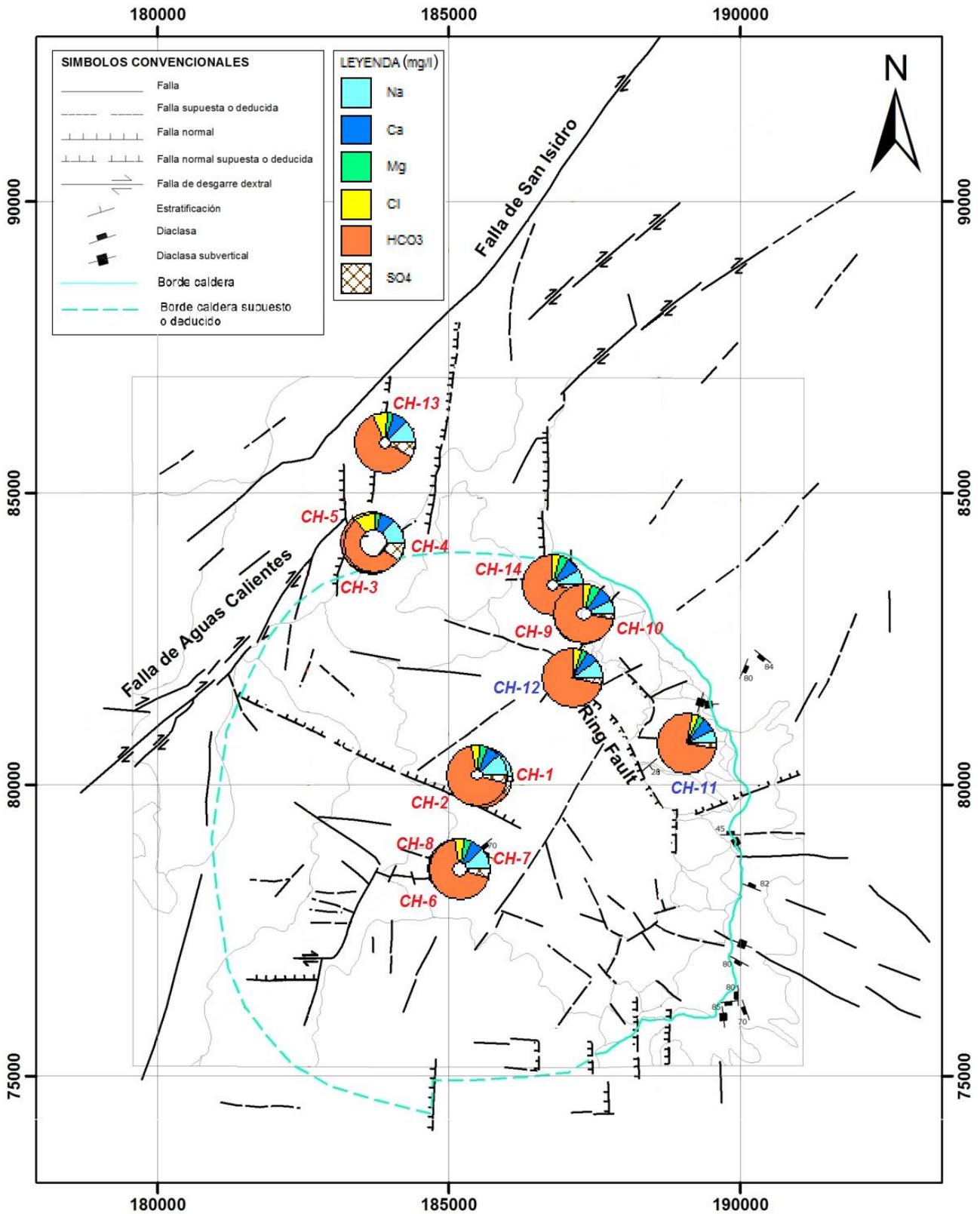


Figura 21: Mapa de ubicación de las muestras de agua recolectadas en la zona de estudio sobre la base estructural de la misma. Se presentan las muestras como diagramas circulares de distribución de componentes.

Geotermometría

La aplicación de las distintas técnicas geotermométricas se ha realizado en varias fases, apuntando a comparar los resultados obtenidos en cada una de ellas. Se han aplicado geotermómetros catiónicos, geotermómetros de sílice, geotermómetros de equilibrio mineral y geotermómetros de gases.

Geotermómetros de fase líquida

El geotermómetro catiónico del Triángulo de Giggenbach (1988) permite observar a las 14 muestras de manantiales concentradas en la zona de alto contenido de magnesio; esta concentración se produce debido a que las muestras se encuentran muy diluidas, al punto de presentar bajas concentraciones de Na y K, por lo que posiblemente la relación Na/K utilizada en los geotermómetros catiónicos no sea representativa y las temperaturas a obtener podrían no estar bien definidas para el reservorio mediante estos métodos. Sin embargo, se logra distinguir a la muestra CH-4 ligeramente separada de esta zona característica de las aguas superficiales o inmaduras; la extrapolación de la tendencia de las muestras permite definir una temperatura de aproximadamente 280°C (Figura 22).

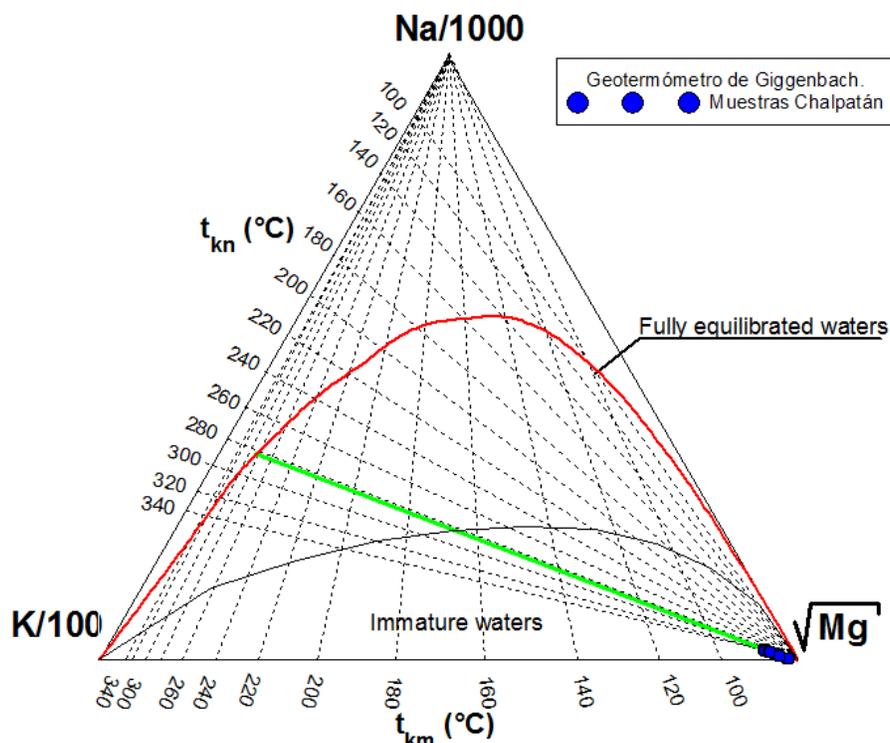


Figura 22: Geotermómetro catiónico de Giggenbach, para las muestras del área de estudio.

Además se han aplicado los geotermómetros de Na-K de autores como Truesdell (1976), Arnorsson (1983), Giggenbach (1988), entre otros; y el geotermómetro de Na-K-Ca de Fournier y Truesdell (1973) para las 14 muestras pero se ha resaltado el resultado obtenido para la muestra CH-4, por sus características geoquímicas que evidencian que conserva la mayor huella geotérmica.

Como se muestra en la Tabla 13, el cálculo de los distintos geotermómetros a partir de la relación Na/K genera temperaturas que se encuentran en el rango de los 290°C hasta los 310°C considerando las muestras más representativas, con un promedio de 305°C para la muestra CH-4. Estas temperaturas son muy poco consistentes con el marco geológico del área de estudio, considerando que la caldera de Chalpatán tendría una edad superior a los 1.2 Ma; esto puede

deberse a que las aguas se encuentran muy diluidas y a que de acuerdo con la fundamentación teórica la existencia de arcillas de temperatura aproximada o inferior a 200°C produce la alteración del contenido de sodio y potasio por intercambio catiónico perdiendo la representatividad de las características térmicas del reservorio.

Por otra parte el geotermómetro de Na-K-Ca de Fournier y Truesdell (1973) dio como resultado temperaturas de alrededor de 205°C a 210°C que podrían ser más consistentes con el recurso existente; esto se debe a que esta técnica geotermométrica al considerar el contenido de calcio de las aguas realiza implícitamente una corrección al efecto que tiene el intercambio catiónico que se produce en las arcillas.

Tabla 13: Cálculo de los geotermómetros catiónicos a partir de la relación Na/K (rosa) y Na-K-Ca (celeste).

Sitio	Truesdell, 76	Tonani, 80	Arnorsson, 83	Arnorsson, 83	Fournier, 79	Nieva, 87	Giggenbach, 88	Fournier y Truesdell, 73
CH-1	314.62	331.05	313.02	300.91	311.47	296.30	318.67	206.34
CH-2	316.00	332.56	314.29	301.76	312.44	297.24	319.54	207.08
CH-3	302.18	317.57	301.66	293.15	302.77	287.76	310.85	204.44
CH-4	305.13	320.76	304.36	295.00	304.84	289.80	312.71	206.18
CH-5	302.35	317.75	301.81	293.26	302.89	287.88	310.95	204.49
CH-6	318.98	335.79	317.00	303.60	314.50	299.26	321.39	210.34
CH-7	321.94	339.00	319.69	305.42	316.55	301.27	323.22	212.53
CH-8	313.83	330.19	312.30	300.42	310.92	295.76	318.18	209.31
CH-9	339.89	358.55	335.99	316.30	328.83	313.31	334.19	207.77
CH-10	344.91	364.03	340.53	319.31	332.22	316.64	337.22	208.92
CH-11	529.70	569.36	503.24	418.26	446.24	428.58	436.50	226.76
CH-12	387.35	410.54	378.67	343.96	360.25	344.13	362.02	199.71
CH-13	320.71	337.67	318.58	304.66	315.70	300.44	322.46	203.73
CH-14	351.13	370.82	346.15	323.00	336.40	320.74	340.93	211.46

Debido a que los geotermómetros catiónicos que incluyen al sodio y potasio, han producido temperaturas poco consistentes, se han aplicado los geotermómetros de sílice. En el geotermómetro gráfico de sílice se muestra la distribución de las 14 muestras de agua bajo estudio, cuya tendencia en la relación Temperatura (°C) – Sílice (ppm) se encuentra trazada tomando como referencia la muestra CH-4 y el grupo de muestras más representativo, hasta interceptar la línea de los 100°C (temperatura de ebullición) y posteriormente la curva de máxima pérdida de vapor; por medio de esta técnica se determina una temperatura aproximada de 200°C para el reservorio (Figura 23).

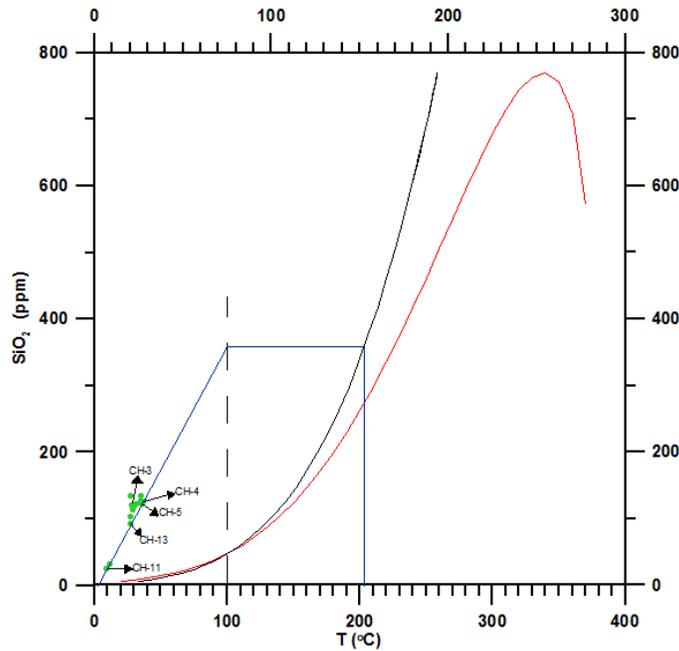


Figura 23: Geotermómetro gráfico de sílice.

El cálculo de los geotermómetros de sílice propuestos por Fournier (1977), Fournier y Potter (1982) y Arnorsson (1985), produce temperaturas en el rango de los 140°C a los 150°C para las muestras más representativas, con un promedio de 147°C para la muestra CH-4, los resultados de esta muestra han sido resaltados por constituir el manantial con la huella geoquímica mejor conservada (Tabla 14). Una temperatura aproximada de 150°C para el reservorio podría considerarse más representativa de las características y edad del mismo.

Tabla 14: Cálculo de los geotermómetros de sílice.

Sitio	Fournier, 77	Fournier, 77	Fournier y Potter, 82	Arnorsson, 85
CH-1	139.37	134.55	139.53	135.87
CH-2	148.03	141.79	148.22	143.32
CH-3	148.45	142.15	148.65	143.69
CH-4	150.34	143.72	150.55	145.30
CH-5	149.05	142.65	149.25	144.20
CH-6	154.68	147.33	154.93	149.00
CH-7	154.16	146.91	154.41	148.57
CH-8	151.02	144.29	151.24	145.88
CH-9	148.65	142.31	148.85	143.86
CH-10	148.21	141.94	148.40	143.48
CH-11	72.61	77.07	73.05	73.43
CH-12	82.23	85.53	82.75	83.22
CH-13	133.27	129.41	133.42	130.55
CH-14	144.20	138.60	144.37	140.04

Con el fin de definir un rango más preciso de temperatura para el reservorio a partir del contenido de solutos en las muestras existentes, se ha aplicado la técnica de geotermometría de equilibrio mineral a la muestra CH-4, que como ya se ha indicado, es la que presenta la huella geotérmica mejor conservada. El primer análisis se realizó con las características y composición originales de la muestra, con las que se generaron las simulaciones para diversos minerales a varias temperaturas entre los 36.2°C y 300°C. El resultado de las simulaciones de los minerales mejor asociados al marco

geológico de la zona de estudio, se muestra graficado en la Figura 24, en la que se observan dos zonas de convergencia para el $IS=0$, uno a aproximadamente 140°C y otro a 190°C ; sin embargo, las curvas de saturación de algunos de los minerales seleccionados convergen bajo el $IS=0$ a una temperatura aproximada de 160°C , por lo que se realizaron algunas correcciones a la muestra original.

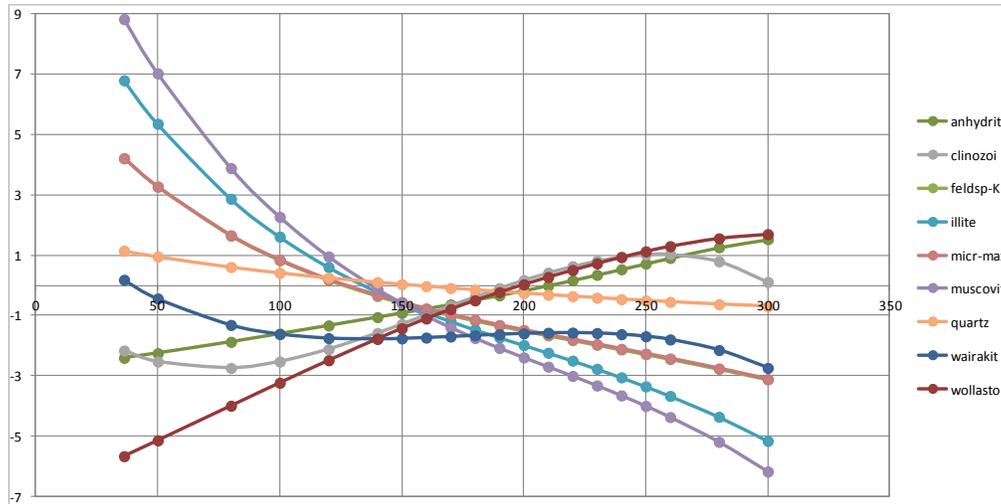


Figura 24: Distribución de los IS de diversos minerales, simulados con la composición original de la muestra CH-4.

La primera corrección aplicada siguiendo la metodología fue la fijación o ajuste de aluminio para determinar la actividad de este elemento, forzando el equilibrio del sistema en función de un único mineral con aluminio en su composición; durante este procedimiento se consideró la microclina como el mineral más adecuado para la fijación de aluminio en base al estudio desarrollado por Linares (2014), en el que señala a este aluminosilicato como el que permite al sistema una notable tendencia al equilibrio en un rango estrecho de temperatura. Sin embargo, el sistema no logró la convergencia de los IS debido al grado de dilución de la misma, por lo que se realizó la simulación con la fijación de aluminio por medio de la moscovita, por tratarse de un aluminosilicato de mayor peso molecular, mineral con el que se evaluó el reequilibrio del sistema y su comportamiento al determinar los IS. Como resultado de este reequilibrio se muestra la distribución de los índices de saturación de los minerales seleccionados, en donde se puede observar la convergencia de los mismos en un rango de temperatura de 150°C a 200°C (Figura 25).

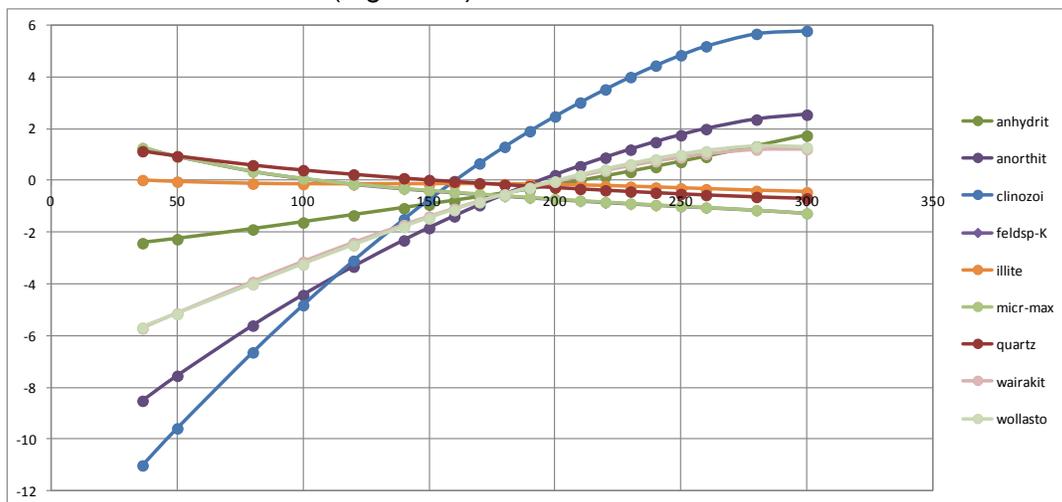


Figura 25: Distribución de los IS de diversos minerales, simulados con la composición de la muestra CH-4 equilibrada con moscovita.

Luego de definir el equilibrio acuoso con moscovita para el sistema, se realizó la reducción porcentual de una proporción de agua, con el fin de contrarrestar el efecto de la dilución que podría estar presente en la muestra. El equilibrio del sistema se reevaluó con una reducción del 10% de agua, obteniendo un resultado muy consistente con la simulación previa, en la que los IS presentan su convergencia entre los 150°C y 200°C (Figura 26).

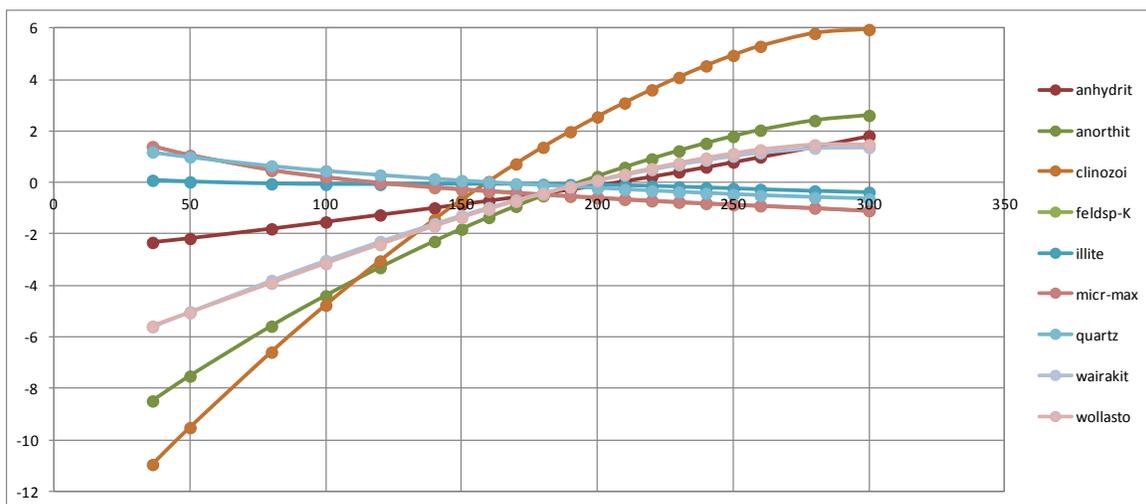


Figura 26: Distribución de los IS de diversos minerales, simulados con la composición de la muestra CH-4 equilibrada con moscovita y concentrada en un 10%.

Geotermómetros de fase gaseosa

A partir de la composición química de la única muestra de gas libre recolectada en el área de estudio (manantial CH-4), se ha intentado estimar la temperatura del reservorio usando los geotermómetros basados en la composición de los gases. El gas libre del sitio CH-4 ha sido caracterizado mediante el diagrama ternario He-Ar-N de Giggenbach (1992) como un gas cuyo origen podría ser meteórico, o que podría encontrarse altamente contaminado con aire, pero sin ninguna componente magmática o cortical importante, motivo por el cual la aplicación de los geotermómetros de fase gaseosa podría no generar resultados consistentes. Como medio de comparación se han ubicado en el diagrama los gases colectados en una fumarola de un campo geotérmico de El Salvador y en un pozo del mismo campo; en dos de ellas se puede observar la afinidad hacia el campo de los gases de origen magmático, mientras que la tercera (ES1) tiene gran proximidad al componente meteórico por ser una muestra de las primeras descargas del pozo que reflejaba influencia meteórica remanente por agua utilizada en su perforación, de forma similar a la muestra CH-4 se encuentra asociada a la componente meteórica indicando interacción con agua de acuíferos someros (Figura 27).

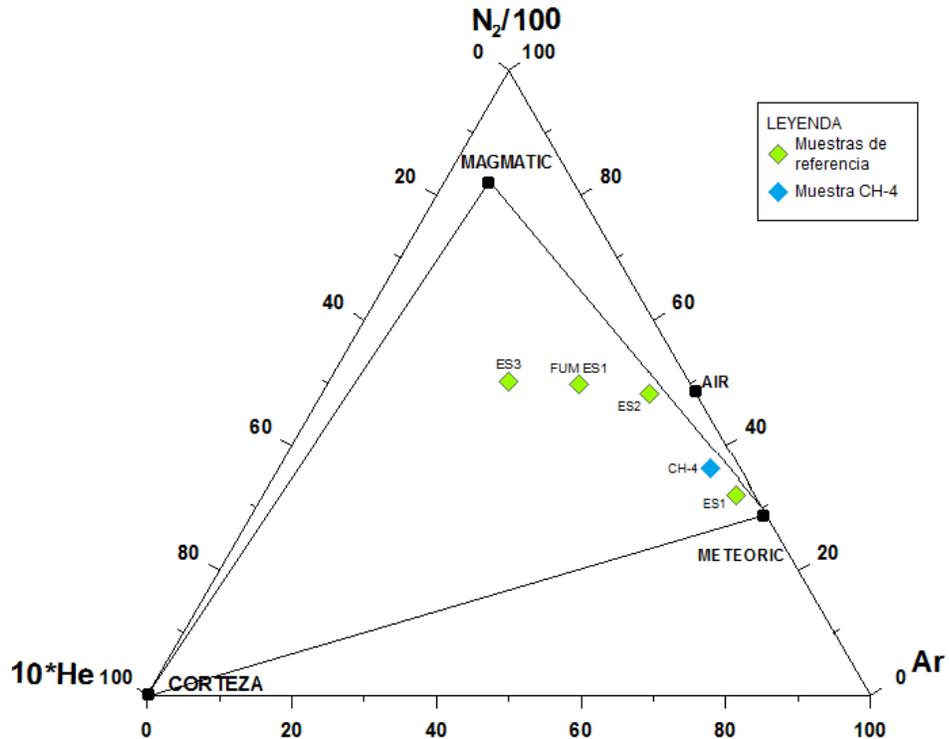


Figura 27: Diagrama ternario He-N-Ar para la caracterización del gas libre del sitio CH-4.

Se han aplicado tres técnicas de geotermometría de fase gaseosa al gas libre de la muestra CH-4. El geotermómetro de D’amore y Panichi (1980) que considera a los gases constituyentes CO₂-H₂S-H₂-CH₄ produjo una temperatura de 80.8°C, a partir del siguiente cálculo, en el que se ha considerado una P_{CO2} equivalente a 0.1 atmósferas debido a que este gas representa menos del 75% de los gases totales.

$$T = \frac{24775}{\left(2 \log \frac{0.017}{0.832} - 6 \log \frac{0.00006}{0.832} - 3 \log \frac{0.014}{0.832} - 7 \log 0.1 + 36.05\right)} - 273.15$$

$$T = 80.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La temperatura obtenida se encuentra muy por debajo de las estimaciones realizadas previamente mediante los geotermómetros de fase líquida, este resultado es congruente con el origen del gas debido a la componente meteórica del mismo y por tanto el resultado no es fiable ni representativo, por lo que se aplicaron dos técnicas más con el fin de corroborar o descartar el resultado de esta técnica.

La aplicación del geotermómetro de Giggenbach y Goguel (1989) muestra la relación entre el contenido de dióxido de carbono (CO₂) e hidrógeno (H₂) con respecto al contenido de argón (Ar); los valores obtenidos para el logaritmo de la relación CO₂/Ar (L_{CA}) e H₂/Ar (L_{HA}) son 1.21 y -2.96, respectivamente; dichos valores ubican a la muestra CH-4 en la región de gases no equilibrados también en correspondencia a la componente meteórica de los mismos; la lejanía del punto con respecto a la línea de equilibrio es indicativo de la contaminación de la muestra, sin embargo, para efectos de estimación se extrapola verticalmente hacia la curva de temperatura, en la que se lee aproximadamente 130°C (Figura 28). La relación de los gases considerados en este geotermómetro

es altamente sensible a la contaminación en las concentraciones de los mismos por la influencia del Argón tal como se observa en la muestra de referencia ES1, la cual refleja una menor temperatura a la medida en el pozo a causa de dicha contaminación, por lo que la temperatura definida por medio de este método, a pesar de resultar más cercana a las temperaturas obtenidas con los geotermómetros de fase líquida, no es considerada como confiable, y por ello se utiliza un último método de interpretación de gases.

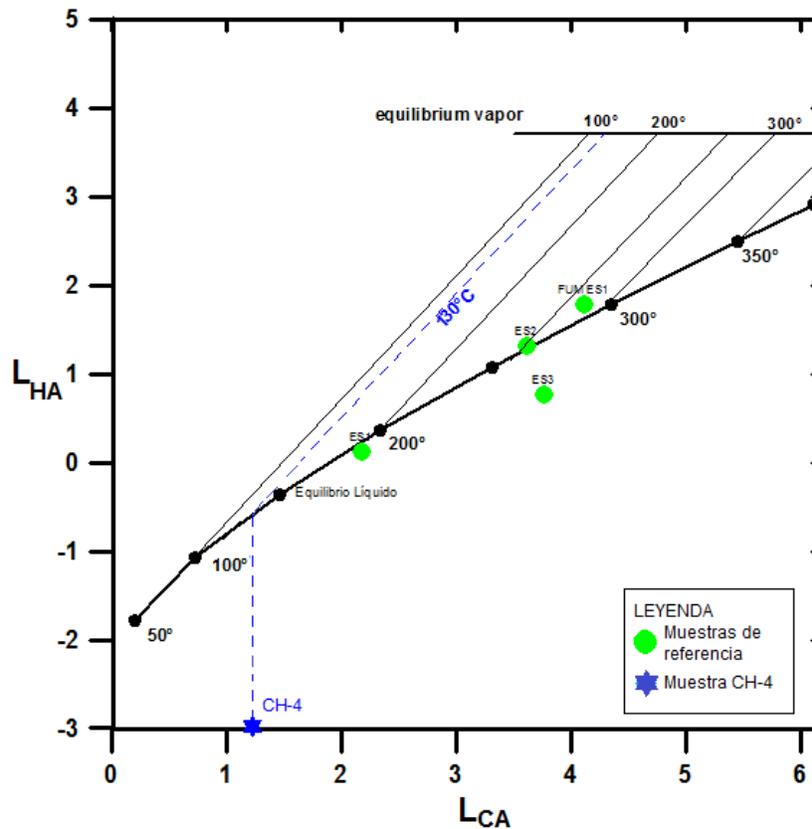


Figura 28: Geotermómetro CO₂/Ar (L_{CA}) e H₂/Ar (L_{HA}).

La grid de D'Amore (1998) requiere del cálculo de los factores FT y HSH2, que para la muestra CH-4 corresponde a -23.25 y -5.24, respectivamente; lo que la ubica por debajo de la línea de pérdida de vapor correspondiente a un reservorio de líquido dominante, sobre el isocontorno de temperatura de 275°C, que es una temperatura muy por encima de lo reflejado por los otros geotermómetros de gases. Se presentan además, tres muestras de referencia colectadas en un campo geotérmico de El Salvador, una de ellas perteneciente a una fumarola y las dos restantes colectadas en un pozo (Figura 29); las temperaturas determinadas para los gases de estas muestras de referencia mediante la grid de D'Amore han sido ratificadas con mediciones, esto proporciona un sustento a la técnica que es ampliamente utilizada en la determinación de temperaturas en distintos campos geotérmicos; por lo que resulta interesante el resultado obtenido con este geotermómetro y hace necesaria la toma de una muestra sin contaminación para obtener consistencia en los geotermómetros de gases o la toma del número de moles de vapor colectados para poder realizar la corrección por contaminación y determinar mejores valores de geotemperatura estimada por gases.

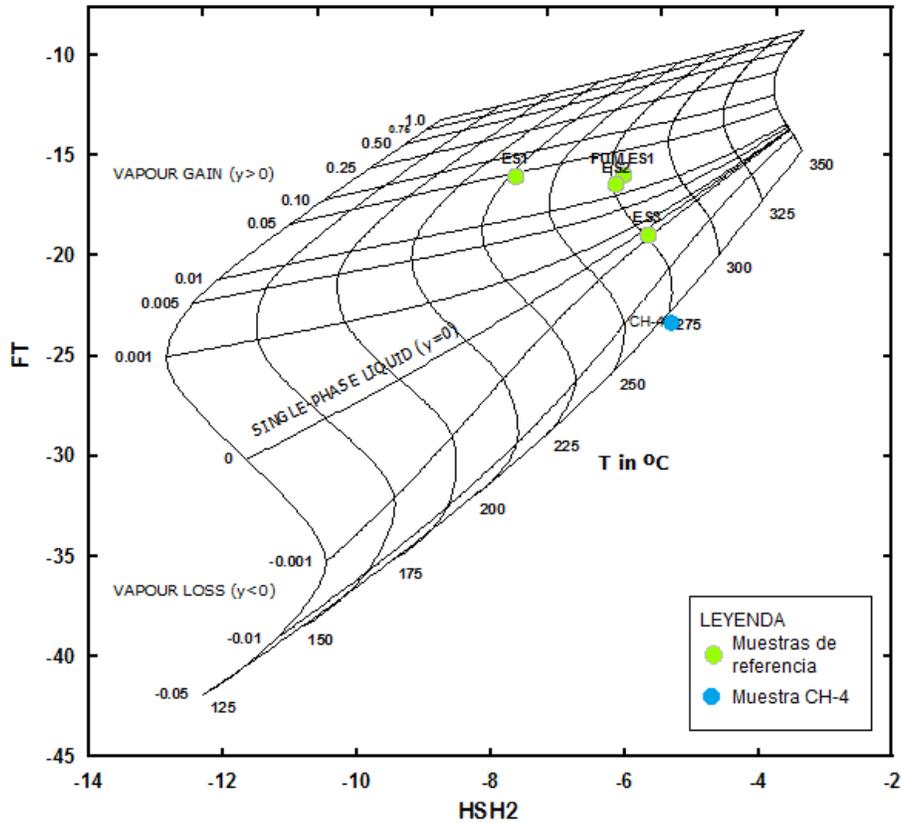


Figura 29: Geotermómetro gráfico de D'amore (1998).

Como resultados del presente apartado se han obtenido distintas temperaturas mediante geotermómetros de fase líquida y de fase gaseosa que se resumen en la Tabla 15:

Tabla 15: Resumen de las temperaturas obtenidas mediante las técnicas aplicadas.

	Técnica	Temperatura (°C)
Geotermómetros de fase líquida	Triángulo de Giggenbach	280
	Geotermómetros de Na/K	290 - 310
	Geotermómetro de Na-K-Ca	205 - 210
	Diagrama SiO ₂ - Temperatura	~ 200
	Geotermómetros de Sílice	140 - 150
	Geotermómetros de equilibrio mineral	150 - 200
Geotermómetros de fase gaseosa	Geotermómetro de D'amore y Panichi	80.8
	Diagrama CO ₂ /Ar - H ₂ /Ar	~ 130
	Grid de D'amore (FT-HSH2)	275

Se observa que los resultados de mayor consistencia son los obtenidos mediante los geotermómetros de fase líquida, mediante los que se podría definir una temperatura de reservorio en el rango de **150°C a 200°C**.

Propuestas de aplicación en usos directos

Con base en el rango de temperatura determinada por medio de la aplicación de técnicas geotermométricas, se pretende en el presente apartado, el desarrollo de algunas propuestas de

aprovechamiento del recurso geotérmico, considerando las características socioeconómicas de la población que se detallaron en uno de los capítulos previos. Cabe recalcar que el rango de temperatura definido corresponde a una temperatura de reservorio, es decir a la profundidad en la que se encontrara el recurso, que de acuerdo a los estudios geofísicos e hidrogeológicos realizados en el Estudio de Prefactibilidad de la Caldera de Chalpatán, podría encontrarse a los 500 a 1000 metros de profundidad; sin embargo esta profundidad sería verificable únicamente a través de la ejecución de sondeos. Esto significa que la temperatura en superficie sería inferior a la determinada por medio de las diversas técnicas geoquímicas. La disminución de temperatura que pudiera sufrir el recurso no se puede determinar con precisión, sin embargo, a continuación se realizarán algunas suposiciones para presentar las posibles temperaturas a ser aprovechadas en superficie con las propuestas de usos directos.

Queda claro que el primer desafío para el aprovechamiento del recurso será la extracción del mismo a superficie a partir de un pozo geotérmico; la primera suposición es, entonces, que en dicho pozo el nivel de agua se encuentre sobre la superficie topográfica por lo que resultaría ser artesiano, en este caso la temperatura en superficie podría determinarse a partir de tablas de vapor, considerando que se trata de un proceso isoentálpico en el que la entalpía del fluido en el reservorio será correspondiente a la entalpía del fluido en superficie. Es así que, en la Tabla 16 se detallan los parámetros termodinámicos definidos para los dos extremos del rango de temperaturas del reservorio, así como la temperatura en superficie para los dos casos que equivaldría a aproximadamente 88°C; la diferencia entre los dos extremos de temperatura considerados es que en superficie la calidad del fluido será mayor en el caso de encontrarlo a 200°C. Cabe recalcar que los parámetros han sido calculados tomando en cuenta que el área de estudio se encuentra a una altitud promedio de 3500 msnm a la que le corresponde una presión atmosférica de 0.658 bar.

Tabla 16: Parámetros termodinámicos y temperatura en superficie, definidos para una temperatura de reservorio de 150°C y 200°C

Reservorio	Temperatura	150°C	200°C
	Presión de saturación (P_{sat})		3.74 bar G
Superficie (3500 msnm)	Entalpía del líquido (H_L)	632.25 kJ/kg	852.39 kJ/kg
	Presión atmosférica (P_{atm})	0.658 bar	0.658 bar
	Temperatura	88.3°C	88.3°C
	Calidad (x)	0.115	0.211

La segunda suposición es que el nivel de agua se encuentre por debajo de la superficie, por lo que el pozo no fluirá por sí solo; en este caso sería necesaria la instalación de una bomba sumergible a una cierta profundidad, desde la que el fluido será extraído hacia la superficie. La temperatura en superficie para esta suposición, dependerá de aquella con la que se encuentre el fluido al entrar en contacto con la bomba sumergible o con el mecanismo elegido para la extracción del recurso; sin embargo dicha temperatura en superficie sería siempre mayor a los 88°C determinados para el primer caso.

En cualquier suposición, se contaría con una temperatura mínima de 88°C en superficie, suficiente para aprovecharla en casi cualquier aplicación de usos directos. Se debe considerar que la pérdida de calor que se produce entre el fluido geotérmico y el fluido de trabajo a emplearse en cualquiera de las aplicaciones, está en el promedio de los 15°C a los 20°C; por lo que la temperatura en superficie debe ser como mínimo 15°C a 20°C superior a la que se requiera para cada aplicación. En esta

sección se propondrán algunas de ellas considerando las características socioeconómicas del sector, esperando que de ser viables, sean aceptadas por la población.

Pasteurización de leche

Una de las principales actividades socioeconómicas de la provincia es la actividad ganadera y producción de leche, en base a ello se plantea la propuesta de un sistema de pasteurizado de leche con temperatura de media a baja entalpia.

La pasteurización es un proceso térmico realizado a los alimentos; los procesos térmicos se pueden realizar con la intención de disminuir las poblaciones patógenas de microorganismos o para desactivar las enzimas que modifican los sabores de ciertos alimentos. Se emplean temperaturas por debajo del punto de ebullición, ya que en la mayoría de los casos las temperaturas superiores a este valor afectan irreversiblemente ciertas características físicas y químicas del producto alimenticio. Uno de los objetivos del tratamiento térmico es la esterilización parcial de los alimentos líquidos, alterando lo menos posible la estructura física, los componentes químicos y las propiedades organolépticas de estos.

Existen tres principales procesos de pasteurización que se pueden aplicar a la leche: pasterización LTLT (Low Temperature, Long Time) o lenta a una temperatura promedio de 63°C durante 30 minutos; pasteurización HTST (High Temperature, Short Time) a altas temperaturas entre 72 – 75° C durante un breve periodo de 15 a 20 segundos; y la pasteurización UHT (Ultra High Temperature), un proceso a ultra altas temperaturas que ronda los 138°C y dura unos pocos segundos. Además de las mencionadas existen otras categorías de tratamiento térmico de la leche que se presentan en la Figura 30. (De Leon, Robles, Romero, & Salinas, 2017).

Principales categorías de tratamientos térmicos de la industria láctea		
Proceso	Temperatura	Tiempo
Termización	63-65 °C	15 seg
Pasteurización LTLT	63 °C	30 min
Pasteurización HTST de la leche	72-75 °C	15-20 seg
Pasteurización HTST de la nata, etc.	<80 °C	1-5 seg
Ultra pasteurización	125-138 °C	2-4 seg
Esterilización UHT	135 – 140 °C	pocos segundos
Esterilización en el envase	115-120 °C	20-30 min

Figura 30: Categorización de tratamientos térmicos de la industria láctea

De acuerdo a un prototipo de pasteurizador de leche desarrollado en un campo geotérmico de El Salvador se conoce que se ha trabajado con el método de pasteurización LTLT. El fluido de trabajo considerado en este prototipo es el agua, que se calienta alrededor de un recipiente de acero inoxidable con el calor remanente de una de las líneas de acarreo del campo; en dicho recipiente se coloca la leche a ser tratada y se la mantiene a una temperatura aproximada de 65°C durante 30 minutos; tras la operación de pasteurización, los productos tratados se enfrían rápidamente y se sellan herméticamente con fines de seguridad alimentaria (Figura 31); por esta razón, es básico en la pasteurización el conocimiento de los mecanismos de la transferencia de calor en los alimentos.



Figura 31: Prototipo de pasteurizador de leche y proceso de pasteurización en un campo geotérmico de El Salvador. Modificado de (Chavarría, 2019).

Biodigestores

Estrechamente relacionada a la producción de leche en la Provincia de Carchi, se encuentra la crianza de ganado vacuno, así como también ganado porcino, ovino y aves de corral como gallinas, patos, pollos, entre otros; mismos que generan desechos orgánicos que pueden transformarse mediante biodigestores para la generación de biogás y al mismo tiempo ser usados como fertilizantes luego de cumplir su ciclo en el biodigestor.

Los biodigestores son sistemas que producen biogás y fertilizante a partir de materia orgánica. Son sistemas en los que, en ausencia de oxígeno y presencia de consorcios bacterianos adecuados, se desarrolla de forma natural la digestión anaerobia y se captura el biogás producido (Martí, 2019). Según Herrero (2019), el biogás constituye una energía alternativa compuesta, principalmente, por dióxido de carbono y metano generados por la biodegradación de biomasa, obtenida de la materia orgánica en un ambiente desprovisto de oxígeno; se obtiene en mayor medida a partir de residuos orgánicos de origen animal o vegetal. Como combustible, tiene aplicaciones que van desde la generación de electricidad o energía térmica hasta carburante de vehículos adaptados para tal uso. Supone una oportunidad para las zonas rurales, pues les garantiza un suministro de gas o electricidad descentralizado producido gracias a toda materia orgánica de alrededor.

La producción de biogás de los estiércoles depende de a qué temperatura este el consorcio bacteriano trabajando y qué tiempo de retención se le dé a este consorcio para producir biogás; es aquí donde se implementa el uso de la energía geotérmica, con el fin de mantener una temperatura de aproximadamente 35°C en la que el tiempo de retención de las bacterias se reduce a 25 a 30 días (Tabla 17). Se debe considerar que cada estiércol tiene un potencial de producción diferente por lo que pueden producir el biogás más rápidamente que otros. Esto implica que hay que diferenciar de cuando se trabaja con estiércol de vaca o de cerdo. Pues este último es más rápido produciendo biogás.

Tabla 17: Relación entre temperatura y tiempo de retención recomendado para lograr producciones de biogás aceptables. Tomado de (Martí, 2019)

Temperatura	Tiempo de Retención (TR)
35 °C	25-30 días
30 °C	30-40 días
25 °C	35-50 días
20 °C	50-65 días
15 °C	65-90 días
10 °C	90-125 días

En El Salvador, se pretende la instalación de un planta piloto de biogás de 5kW, cuyo objetivo es el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en los campos geotérmicos para la producción de electricidad. El recurso a emplear sería agua geotérmica a aproximadamente 90°C, a partir de la cual se desarrollaría la transferencia de calor hacia el sustrato, en el que se encontrará enterrado el biodigestor, tal como se muestra en la Figura 32.

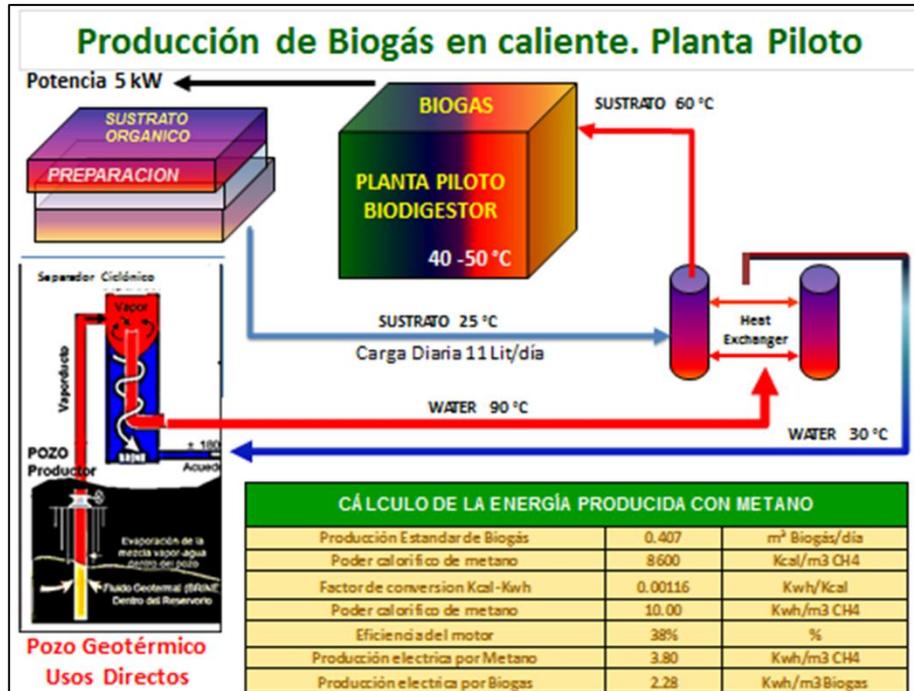


Figura 32: Esquema básico de los componentes que integran un biodigestor y su operación. Tomado de (Chavarría, 2019).

Invernaderos

Considerando la temperatura promedio para la Provincia de Carchi que se encuentra en aproximadamente 11°C, se puede considerar a los invernaderos geotérmicos como una buena opción para la diversificación de los cultivos en las zonas frías, ya que como fue detallado en capítulos previos, estas regiones se encuentran dominadas por cultivos transitorios de papa, por lo que la siembra de hortalizas y productos ornamentales como flores, podría dinamizar la economía del sector. La característica principal de un invernadero es que permite el cultivo de especies en lugares o épocas durante las cuales las condiciones climáticas externas no permitirían obtener el producto deseado, gracias a que son recintos delimitados en los que se controla la temperatura del ambiente, cantidad de luz, humedad de aire y del suelo, movimiento del aire, entre otros parámetros que influyen en el desarrollo de cada especie (Iglesias, 2006).

Así por ejemplo se podrían cultivar especies de zonas medias y bajas en las zonas más altas de la Provincia de Carchi, tales como algunos tipos de hortalizas, leguminosas y frutales (tomate, pimiento, frijol, ají, pepino, uva, plátano, guayaba, melón etc). Además se tendría elección de la época de siembra según la demanda del mercado; esto puede ser económicamente muy rentable al permitir colocar en el mercado productos fuera de su temporada normal de recolección.

De acuerdo a (Dickson & Fanelli, 2004), la calefacción en invernaderos puede darse a través de diversos mecanismos (Figura 33) como la convección natural (a), la calefacción en bancos (b), por

ductos de calefacción bajos para la calefacción de aire (c), por calefacción de suelo (d), por posición lateral (e), por medio de un ventilador aéreo (f), por ductos altos (g) o por ductos bajos (h).

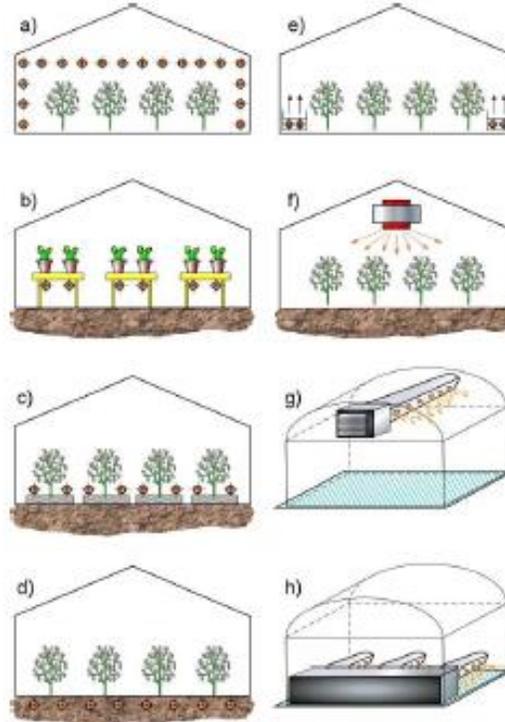


Figura 33: Sistemas de calefacción en invernaderos geotermiales. Tomado de (Dickson & Fanelli, 2004).

Climatización geotérmica de edificaciones y viviendas

Debido a su ubicación geográfica a aproximadamente 3000 msnm, el cantón Tulcán de la Provincia de Carchi presenta un clima frío andino de 9° a 11°C en promedio; por ello, el uso de la calefacción podría constituir una opción para el aprovechamiento del recurso geotérmico que se ha evaluado. El principio básico del sistema consiste en utilizar la homogeneidad de la temperatura del subsuelo respecto a su diferencia con el exterior. Se produce, de esta manera, un intercambio de energía calorífica entre el suelo y la edificación, que permite calentar en invierno y refrigerar en verano. Los primeros 100 metros bajo tierra son aptos para proveer y almacenar energía geotérmica mediante este sistema (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

El aprovechamiento de la energía puede darse a partir de sistemas abiertos que se caracterizan porque el portador del calor (agua subterránea) fluye libremente en el subsuelo y actúa, además de fuente de calor, como medio para el intercambio del mismo. El principal aspecto técnico de este tipo de sistemas es el relativo a los sondeos perforados para explorar la capa freática o los recursos de acuíferos poco profundos situados por debajo de ésta. El sondeo de captación, equipado con una bomba sumergible, conduce el agua subterránea hasta la bomba de calor, desde donde, una vez enfriada tras extraer su energía, se devuelve al acuífero de origen o se vierte a un cauce superficial.

Con el fin de evitar el enfriamiento continuo del agua subterránea, los sondeos de producción e inyección deben situarse, respectivamente, aguas arriba y aguas abajo del flujo subterráneo, y a la distancia adecuada, de acuerdo con los modelos de transmisión de calor (Díaz, 2017). (Figura 34)

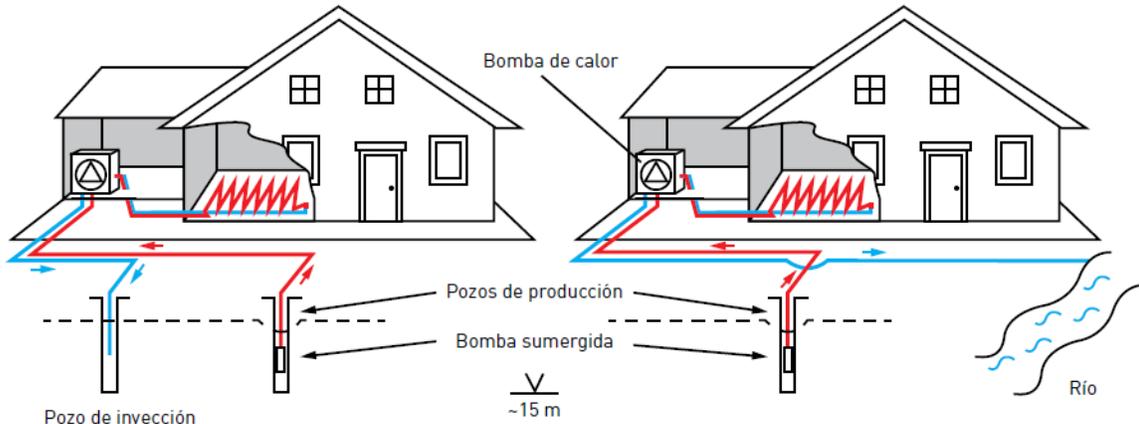


Figura 34: Diagrama de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con sondeos de captación de agua (sistema abierto). Tomado de (Díaz, 2017).

También es posible aprovechar la energía geotérmica a partir de sistemas cerrados, que consisten en realizar perforaciones verticales de 100 – 150 metros de profundidad con un diámetro de unos 140 – 165 mm, incorporando en su interior un intercambiador geotérmico, por donde circulará el fluido intercambiador de calor. Con posterioridad, las perforaciones se unen mediante tuberías horizontales hasta alcanzar una bomba de calor, dispositivo responsable de elevar la temperatura o disminuirla produciendo calor o frío, respectivamente. Finalmente, se produce la distribución del frío y del calor a través de los circuitos de climatización de la vivienda (Figura 35) (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

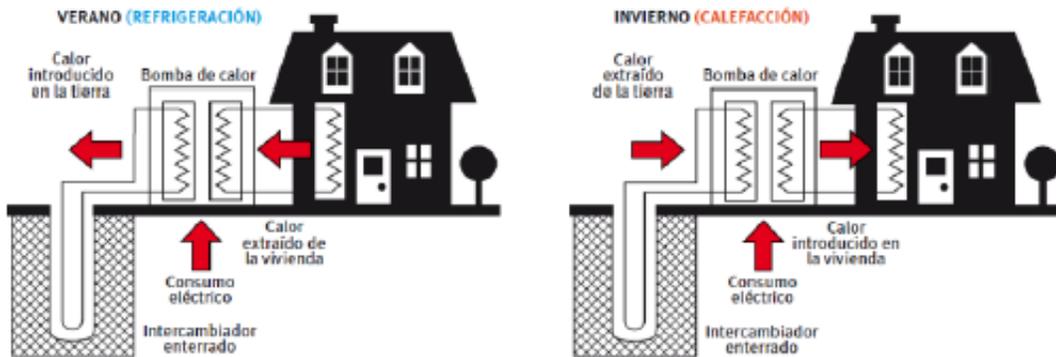


Figura 35: Esquema de funcionamiento de un sistema de climatización cerrado. Tomado de (CGS, INP, CELEC-EP, 2013).

X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las muestras de agua con las que se contó para el desarrollo de la presente investigación, constituyen manantiales principalmente bicarbonatados que en principio podrían parecer poco útiles para la aplicación de técnicas geotermométricas; sin embargo, se logró determinar que algunas de las muestras conservan cierta huella de un posible origen profundo y de la mezcla con aguas a altas temperaturas. Esta caracterización fue de gran importancia para la ejecución de las fases subsiguientes de este estudio.

Las temperaturas obtenidas mediante la aplicación de los geotermómetros catiónicos que emplean la relación Na/K resultaron no ser consistentes con las características del sistema geotérmico, que según la evolución volcanológica se conoce que tendría una edad mínima de 1.2 Ma; los resultados obtenidos con estos métodos se deben a la dilución de las aguas, que ha disminuido la concentración de los cationes al punto de quitarles representatividad respecto a su origen y al posible intercambio catiónico al que pudo estar sometido el sistema por acción de arcillas. Sin embargo el geotermómetro catiónico de Na-K-Ca produjo temperaturas más consistentes para el sistema debido a que al tomar en cuenta la concentración de calcio, realiza implícitamente una corrección al efecto que tiene el intercambio catiónico que se produce por la presencia de arcillas.

Las grandes diferencias entre las temperaturas obtenidas con la aplicación de los geotermómetros de fase gaseosa, impiden considerarlas en la definición de la temperatura del reservorio. Estas inconsistencias podrían deberse principalmente a la contaminación de la muestra con aire, lo que causa la modificación de los constituyentes originales del gas.

Por otra parte, los geotermómetros de sílice se han considerado como los de mejor consistencia con el sistema, sus temperaturas resultaron entre 140°C a 150°C y en aproximadamente 200°C. Estas temperaturas pudieron ser sustentadas con la aplicación de la técnica de geotermómetros de equilibrio mineral, en la que el rango de temperaturas en que se encontró el equilibrio para los minerales más representativos fue de 150°C a 200°C. De esta manera se ha definido a este rango como el más probable para el recurso.

El rango de temperatura definido para el reservorio geotérmico podría presentar pérdidas durante su ascenso a la superficie. El caso de mayores pérdidas considera un proceso isoentálpico, en el que el pozo a través del cual se extraiga el recurso posea características de artesianismo, en dicho caso, la temperatura en superficie sería de aproximadamente 88°C, aún suficiente para el aprovechamiento en usos directos. Un segundo caso constituiría el hecho de que el pozo no fluyera por sí solo, por lo que sería necesaria la instalación de una bomba que permita la extracción del recurso; en este caso la temperatura en superficie sería mayor a 88°C, considerando que el fluido no perdería energía en su ascenso gracias a la presencia de la bomba.

Las condiciones socioeconómicas del área de estudio han permitido plantear propuestas de aprovechamiento de la geotermia por medio de usos directos relacionados principalmente al sector agrícola y ganadero que se desarrolla mayoritariamente por la población. Estas propuestas deben ser examinadas con detenimiento a fin de determinar su viabilidad técnico-económica y su aceptación por parte de las comunidades.

Es recomendable realizar campañas de búsqueda y muestreo de gases en la zona de estudio, con el fin de analizarlos y emplearlos en la aplicación de geotermómetros; estas acciones podrían elevar el

grado de confiabilidad en los resultados obtenidos mediante los geotermómetros de fase gaseosa, ya que durante el presente estudio se contó con una sola muestra para la aplicación de estas técnicas. Así también, se podría repetir el análisis químico de la muestra existente para corroborar las concentraciones de los distintos gases, debido a que la muestra pudo haberse contaminado durante su recolección, razón por la que las temperaturas determinadas son inconsistentes.

Además es recomendable que las conclusiones producto de la presente investigación, sean validadas por medio de la construcción de un pozo exploratorio, cuyas características serían objeto de un estudio técnico, específico para ese fin.

XI. AGRADECIMIENTOS

Nuestro profundo agradecimiento a nuestras familias por apoyarnos siempre a pesar de la distancia;

A LaGeo, a la Universidad de El Salvador, al Programa de Entrenamiento en Geotermia de la Universidad de las Naciones Unidas y al Gobierno de Islandia por darnos la oportunidad de cursar este Diplomado que agregará valor a nuestras carreras profesionales;

A cada uno de los profesionales de las distintas áreas que aportaron a nuestros conocimientos y nos brindaron su acompañamiento a lo largo del Diplomado, en especial a quienes fueron nuestro apoyo y guía durante la elaboración de la presente investigación: el Ing. Noel López, Ing. Raúl Romero, Ing. José Luis Henríquez, Ing. Jaime Chavarría, Ing. William Robles e Ing. Javier Fuentes;

Al Ing. Danilo Asimbaya y al Ing. Andrés Lloret por permitirnos hacer uso de la información del proyecto;

A todos quienes de una u otra forma nos han ayudado en nuestro crecimiento personal y profesional.

XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (Septiembre de 2019). *Agencia de Regulación y Control de Electricidad*. Obtenido de Balance Nacional de Energía Eléctrica:

<https://www.regulacionelectrica.gob.ec/balance-nacional/>

Barragán, R., Arellano, V., Portugal, E., & Sandoval, F. (2003). Gas geochemistry for the Los Azufres (Michoacan) geothermal reservoir, Mexico. *ICGG*, 15-17.

Castillo, J. (2019). *Diplomado en Geotermia para América Latina, Panorama energético de la energía geotérmica*.

CGS, INP, CELEC-EP. (2013). *Estudio de Prefactibilidad del Modelo Geotérmico Integral de la Caldera de Chalpatán. Volumen 1: Geología - Volcanología*. Quito.

CGS, INP, CELEC-EP. (2013). *Estudio de Prefactibilidad del Modelo Geotérmico Integral de la Caldera de Chalpatán. Volumen 2: Geoquímica de Fluidos*. Quito.

CGS, INP, CELEC-EP. (2013). *Estudio de Prefactibilidad del Modelo Geotérmico Integral de la Caldera de Chalpatán. Volumen 5: Hidrogeología*. Quito.

CGS, INP, CELEC-EP. (2013). *Estudio de Prefactibilidad del Modelo Geotérmico Integral de la Caldera de Chalpatán. Volumen 6: Estudio Socio-económico*. Quito.

- Chavarría, J. (25 de Septiembre de 2019). Utilización directa de recursos de media y baja entalpía. Santa Tecla, La Libertad, El Salvador.
- De Leon, A., Robles, W., Romero, R., & Salinas, E. (2017). *Propuesta de prediseño de un sistema para pasteurizar leche utilizando baja entalpía*. San Salvador.
- Díaz, O. (2017). *Valoración del potencial energético basado en el recurso geotérmico de baja entalpía en la Isla de Gran Canaria*. Gran Canaria.
- Dickson, M., & Fanelli, M. (2004). *¿Qué es la Energía Geotérmica?* Santiago: Universidad de Santiago.
- Hernández, J. (23 de Julio de 2019). Reacciones químicas y equilibrios: Interacción agua roca y especiación acuosa. Santa Tecla, La Libertad, El Salvador.
- Iglesias, N. (2006). *Producción de hortalizas bajo cubierta, Estructuras y manejo de cultivo para la Patagonia Norte*. Alto Valle: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Inguaggiato, S., Hidalgo, S., Beate, B., & Bourquin, J. (2010). Geochemical and isotopic characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc. *Geofluids*, 525-541.
- Instituto Geológico y Minero de España. (1985). *Análisis Metodológico de las Técnicas Geoquímicas empleadas en Prospección Geotérmica*. Madrid.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). Resultados del Censo de Población y Vivienda en el Ecuador: Fascículo Provincial Carchi. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Linares, A. (31 de Octubre de 2014). Estimación del equilibrio mineral acuoso para la evaluación geotermométrica de aguas termales diluidas provenientes del sistema geotérmico del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia. San Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Lund, J., Bertani, R., & Boyd, T. (2015). Direct Utilization of Geothermal Energy 2015, Worldwide Review. *Geothermics*, 66-93.
- Magaña, M. I. (22 de Julio de 2019). Clasificación de fluidos geotérmicos y Gases en sistemas geotermiales. Santa Tecla, La Libertad, El Salvador.
- Martí, J. (2019). *Biodigestores tubulares, guía de diseño y manual de instalación*. Quito.
- Matus, A. (24 de Julio de 2019). Geotermometría. Santa Tecla, La Libertad, El Salvador.
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal Fluids. Chemistry and Exploration Techniques*. Aberdeen: Springer.
- Oduor, J. (2010). *Environmental and Social Considerations in Geothermal Development*. Nairobi.
- Powell, T. (24 de Enero de 2000). A review of exploration gas geothermometry. California.
- Tole, M., Ármannsson, H., Zhong-He, P., & Arnórsson, S. (1993). Fluid/mineral equilibrium calculations for geothermal fluids and chemical geothermometry. *Geothermics*, 22, 17-37.
- Zapata Lesmes, H. J. (2015). *Propuesta de una hoja de ruta para el fomento del desarrollo de proyectos*.

XIII. ANEXOS

Anexo 1: Archivo de entrada (SOLRUN.dat) para la herramienta SOLVEQ-XPT; correspondiente a la composición original de la muestra CH-4.

```

chalpatan ch4 original
< eprc >> ph >> unact >> alkaIn >> tempc >> rm >
.10000E-11.66900E+01.00000E+00.00000E+00.36200E+02.00000E+00

bsto ntem nmitt ipri ichb nloo c nsun igeo itre neut
37 1 1 0 0 40 3 0 1 0 0

saq> < name > < mtot >> mtry >> gamma >
1 H+ .0000000E+00 .2041738E-06 1.0000
2 H2O .9994206E+00 .1000000E+01 1.0000
3 Cl- .1300031E-02 .1000000E-03 1.0000
4 SO4-- .4711560E-03 .1000000E-06 1.0000
5 HCO3- .3899869E-02 .1000000E-06 1.0000
7 SiO2 .2090546E-02 .1000000E-06 1.0000
8 Al+++ .3706243E-05 .1000000E-06 1.0000
9 Ca++ .8450599E-03 .1000000E-06 1.0000
10 Mg++ .4948174E-03 .1000000E-06 1.0000
11 Fe++ .2291976E-04 .1000000E-06 1.0000
12 K+ .3800317E-03 .1000000E-06 1.0000
13 Na+ .2709897E-02 .1000000E-06 1.0000

<eqnam > ieq>
    
```

Anexo 2: Archivo de salida (SOLPLOT.dat) luego de la simulación de equilibrio del sistema a diferentes temperaturas, para la composición original de la muestra CH-4.

MINERAL	ÍNDICES DE SATURACIÓN CALCULADOS A PARTIR DE SIMULACIONES A DISTINTAS TEMPERATURAS: MUESTRA CH-4 (ORIGINAL)																			
	36.2°C	50°C	80°C	100°C	120°C	140°C	150°C	160°C	170°C	180°C	190°C	200°C	210°C	220°C	230°C	240°C	250°C	260°C	280°C	300°C
albit-hi	0.976	0.311	0.233	5.241	0.284	0.539	0.655	0.765	0.869	0.967	1.060	1.148	1.232	1.312	1.389	1.461	1.530	1.596	1.718	1.826
albit-lo	2.225	1.481	3.921	1.579	6.672	8.131	8.834	9.489	10.061	0.197	0.448	1.276	2.044	2.760	3.428	4.049	4.622	5.141	5.995	6.609
analcime	0.902	0.352	3.169	1.797	3.868	8.491	10.665	12.709	14.588	10.507	0.828	1.420	1.976	2.493	2.968	3.394	3.757	4.040	4.296	4.051
annite	1.745	2.296	2.545	1.095	3.557	5.440	6.324	7.153	7.913	16.274	10.791	10.905	10.872	0.161	0.341	0.527	0.715	0.903	1.256	1.524
beide-Mg	7.295	5.801	0.371	0.147	0.301	0.616	0.771	0.920	1.062	8.590	17.749	19.016	20.089	10.735	10.538	10.314	10.084	9.861	9.464	9.145
beide-Na	6.873	5.310	5.399	0.192	0.663	0.777	0.932	1.081	0.184	1.195	9.180	9.681	10.100	20.991	21.749	22.391	22.947	23.447	24.406	25.571
boehmite	0.060	0.700	1.949	0.869	0.461	4.815	5.717	6.563	1.224	0.495	1.319	1.435	1.544	10.448	10.734	10.972	11.173	11.351	11.687	12.106
chalcedo	0.882	4.036	0.536	6.437	0.037	8.621	9.145	9.639	7.339	1.358	0.773	1.018	1.233	1.646	1.743	1.831	1.909	1.971	2.031	1.987
clcl14/2	3.520	0.375	0.153	3.126	2.892	5.581	6.167	6.711	10.090	8.033	1.482	1.599	1.709	1.421	0.017	0.100	0.161	0.208	0.296	0.444
crisoba	0.617	0.450	0.153	0.349	7.529	6.278	7.670	8.987	7.186	10.487	8.637	9.152	9.585	1.813	1.586	1.731	1.862	1.983	2.208	2.449
cristo-a	0.617	0.451	0.612	3.034	4.355	8.196	9.423	10.565	10.203	7.558	10.820	11.088	11.292	9.946	1.911	2.000	2.079	2.143	2.205	2.164
cristo-b	0.201	0.065	0.612	1.276	3.353	1.521	2.135	2.717	11.567	11.297	7.797	7.893	7.866	11.436	10.245	10.495	10.708	10.896	11.253	11.692
diaspore	0.849	0.479	1.645	1.277	5.624	1.334	1.928	2.488	3.260	12.360	12.252	13.065	13.738	7.749	11.528	11.574	11.585	11.568	11.488	11.415
feldsp-K	4.210	3.267	0.160	0.165	0.229	2.628	2.951	3.257	3.001	3.759	12.886	13.126	13.115	14.282	7.579	7.380	7.172	6.965	6.571	6.202
gibbsite	1.543	1.059	0.179	1.061	0.083	2.630	2.952	3.259	3.541	3.451	4.211	0.168	0.412	12.925	14.711	15.042	15.293	15.480	15.741	15.985
illite	6.796	5.354	2.867	0.828	1.956	1.683	2.042	2.383	3.543	3.797	3.828	4.618	4.986	0.627	12.626	12.270	11.893	11.517	10.804	10.139
kaolinit	5.944	4.683	2.413	0.780	1.957	0.432	0.781	1.109	2.700	3.800	4.023	4.132	4.373	5.318	0.807	0.941	1.021	1.033	0.791	0.104

laumonti	4.251	3.239	1.601	3.834	0.932	3.855	4.497	5.093	1.413	2.988	4.025	4.217	4.382	4.569	5.620	5.894	6.141	6.360	6.714	6.978
margarit	1.371	0.277	1.653	1.610	2.489	1.999	2.282	2.543	5.622	1.687	3.244	4.219	4.384	4.521	4.735	4.881	5.012	5.127	5.302	5.398
micr-max	4.211	3.270	3.883	1.197	0.173	2.811	0.706	1.448	2.774	6.059	1.929	3.468	3.661	4.523	4.637	4.733	4.810	4.867	4.925	4.924
muscovit	8.827	7.028	1.673	0.765	1.400	11.892	3.520	4.162	2.137	2.959	6.382	2.141	2.324	3.827	4.639	4.735	4.811	4.868	4.926	4.924
paragoni	5.971	4.397	0.750	0.850	1.267	1.840	13.762	15.492	4.704	2.764	3.088	6.585	6.686	2.482	3.969	4.089	4.190	4.270	4.371	4.409
pyrophyll	6.707	5.183	2.458	0.840	7.921	3.737	2.628	3.372	17.004	5.108	3.325	3.159	3.180	6.716	2.618	2.736	2.842	2.938	3.123	3.333
quartz	1.143	0.950	0.600	2.267	0.178	0.724	4.420	5.054	4.057	18.205	5.342	3.822	4.260	3.167	6.704	6.674	6.642	6.615	6.604	6.661
sanid-hi	3.082	2.220	0.756	0.293	0.600	5.908	0.922	1.108	5.622	4.672	19.018	5.396	5.300	4.643	3.133	3.092	3.050	3.013	2.963	2.953
minneso*	1.978	2.705	0.429	2.437	0.168	0.097	0.525	0.727	1.277	6.111	5.206	19.425	19.485	5.097	4.981	5.282	5.554	5.806	6.282	6.794
wairakit	0.177	-0.917	1.918	1.008	2.278	2.963	6.737	1.392	0.308	1.426	6.511	5.659	6.034	19.305	4.835	4.546	4.255	3.976	3.485	3.109
H2O gas	-1.228	-1.261	4.557	0.409	0.300	1.508	0.167	7.522	1.609	0.386	1.552	6.823	7.051	6.339	18.991	18.623	18.254	17.920	17.434	17.252
CO2 gas	-1.388	-14.657	4.236	0.031	0.302	6.925	0.030	0.466	2.187	0.945	1.121	1.654	1.733	7.203	6.584	6.780	6.937	7.063	7.265	7.483
HCl gas	-15.244	-16.592	0.327	0.786	0.189	8.757	3.818	4.610	8.247	2.424	1.529	1.728	2.210	1.790	7.288	7.319	7.305	7.258	7.113	6.998
akermani	-18.549	-5.079	-0.333	3.605	0.952	11.314	1.676	1.829	0.759	2.880	3.163	2.064	2.553	2.581	1.831	1.857	1.875	1.888	1.919	1.992
alunite	-3.227	-3.944	-1.061	5.931	4.180	15.401	7.694	8.414	5.319	8.896	3.446	3.827	4.417	0.408	2.857	3.060	3.211	3.333	3.578	3.998
anal-dhy	-3.615	-0.712	-13.565	2.857	0.244	12.264	9.420	10.029	1.957	1.039	9.461	3.879	4.195	3.004	1.414	2.356	3.229	4.023	5.331	6.255
andalusi	-0.018	-8.703	-12.432	7.944	1.138	-0.884	13.281	15.137	9.070	5.927	1.303	9.940	10.338	4.940	3.419	3.802	4.154	4.473	5.014	5.443
grossula	-9.296	-2.258	-0.786	4.325	1.151	-11.958	17.152	18.785	10.550	2.047	6.425	1.547	1.771	4.423	5.398	5.798	6.141	6.431	6.856	7.108
anhydrit	-2.412	-2.850	-8.484	-0.004	5.293	-4.720	14.098	15.796	16.854	9.649	2.089	6.813	7.098	10.662	4.589	4.713	4.805	4.868	4.901	4.786
anorthit	-2.616	-13.354	-0.551	-0.975	7.353	-1.999	-0.871	-0.860	20.239	10.942	10.144	2.077	2.020	1.971	10.922	11.129	11.293	0.156	0.543	0.932
anthophy	-16.716	-3.513	-4.417	-12.958	7.162	-1.218	-11.741	-11.532	17.298	18.405	11.173	10.554	10.886	7.294	2.143	2.280	2.373	11.425	11.643	11.898
antigori	-4.912	-0.719	-1.899	-9.752	11.712	-13.361	-3.560	-2.456	-0.850	21.445	19.779	11.234	11.150	1.931	7.415	7.477	7.497	2.410	2.263	1.751
aragonit	-0.878	-7.788	-7.002	-1.305	8.360	-1.528	-2.124	-2.236	-11.329	18.536	22.346	20.980	22.024	11.149	1.826	1.716	1.609	7.493	7.485	7.627
artinite	-8.622	-0.247	-1.881	-0.374	-0.919	-4.697	-1.375	-1.518	-1.416	-0.839	19.454	22.933	23.254	10.966	11.354	11.514	11.640	1.509	1.346	1.236
brucite	-5.851	-5.122	-3.007	-10.359	-12.428	-3.306	-13.967	-14.513	-2.337	-11.130	-0.828	20.047	20.365	22.931	10.729	10.472	10.217	11.747	11.956	12.270
calcite	-0.714	-0.556	-5.921	-0.974	-7.170	-2.656	-1.625	-1.711	-1.649	-0.447	-10.935	0.026	0.270	23.387	23.719	24.407	25.008	9.981	9.596	9.356
camin625	-9.381	-8.812	-0.448	-4.587	-1.699	-1.062	-4.694	-4.684	-14.993	-2.431	-2.519	0.147	0.392	20.493	23.410	23.375	23.315	25.534	26.414	27.223
camin75	-10.594	-9.831	-0.314	-2.486	-0.846	-2.378	-3.453	-3.580	-1.788	-1.771	-1.887	-0.818	-0.810	0.501	20.512	20.482	20.441	23.244	23.091	22.936
chrysoti	-5.813	-4.365	-6.008	-5.640	-11.975	-2.713	-1.907	-1.176	-4.670	-15.406	-15.754	-10.744	-10.559	0.608	0.722	0.930	1.122	20.413	20.449	20.690
dap14/2*	-0.239	-6.941	-0.777	-1.612	-1.291	-0.284	-0.923	-0.783	-3.688	-1.860	-1.927	-2.604	-2.688	-0.805	0.787	0.923	1.003	1.293	1.554	1.692
clchl7a	-8.792	-2.856	-3.611	-2.902	-4.672	-1.123	-2.209	-2.034	-0.472	-4.652	-4.633	-1.998	-2.106	-10.380	-0.802	-0.803	-0.807	1.016	0.775	0.091
daph7a*	-4.208	-2.538	-0.153	-0.974	-2.947	-1.420	-2.228	-1.777	-0.640	-3.781	-3.861	-16.048	-16.300	-2.772	-10.208	-10.043	-9.884	-0.814	-0.833	-0.864
clinozoi	-2.171	-5.939	-7.549	-0.013	-4.169	-0.921	-0.700	-1.083	-1.856	-0.494	-0.341	-1.991	-2.056	-2.214	-2.857	-2.946	-3.039	-9.731	-9.447	-9.205
cord-hyd	-5.543	-8.179	-8.170	-4.859	-1.338	-5.124	-1.569	-1.979	-1.367	-1.680	-1.509	-4.614	-4.598	-16.524	-2.324	-2.435	-2.549	-3.136	-3.345	-3.575
cord-anh	-7.913	-2.416	-1.209	-1.043	-2.679	-5.057	-1.488	-1.547	-1.436	-1.007	-0.701	-3.935	-4.010	-2.122	-16.727	-16.917	-17.094	-2.667	-2.915	-3.182
corundum	-1.947	-4.510	-2.641	-2.662	-3.753	-0.099	-0.528	-0.158	-2.358	-1.764	-2.073	-0.181	-0.014	-4.586	-2.190	-2.263	-2.341	-17.260	-17.578	-18.014
diopside	-5.422	-4.424	-2.747	-6.712	-0.111	-1.589	-4.758	-4.410	-1.598	-2.709	-3.037	-1.347	-1.199	-4.092	-4.580	-4.579	-4.586	-2.425	-2.612	-2.832
hedenber	-5.269	-0.314	-6.119	-7.086	-1.254	-4.699	-4.593	-4.154	-4.082	-1.641	-1.679	-0.450	-0.251	-1.070	-4.185	-4.294	-4.421	-4.601	-4.656	-4.752
dolomite	-0.696	-0.315	-8.105	-2.536	-1.762	-6.262	-0.162	-0.222	-3.742	-3.778	-3.499	-2.369	-2.663	-0.097	-0.962	-0.882	-0.836	-4.569	-4.939	-5.450

dolo-ord	-0.696	-1.693	-3.190	-5.837	-5.898	-3.998	-1.292	-0.987	-0.279	-3.363	-3.017	-3.350	-3.656	-2.961	-3.267	-3.587	-3.921	-0.830	-0.974	-1.380
dolo-dis	-2.162	-3.136	-0.178	-7.671	-6.043	-0.269	-4.356	-4.012	-0.682	-0.334	-0.387	-1.714	-1.750	-3.963	-4.275	-4.598	-4.933	-4.272	-5.033	-5.911
enstatit	-3.708	-2.601	-0.172	-3.551	-2.127	-0.269	-5.857	-5.453	-3.680	-0.384	-0.099	-3.248	-3.025	-1.789	-1.836	-1.890	-1.954	-5.283	-6.040	-6.914
fayalite	-3.606	-0.741	-2.478	-0.008	-5.336	-0.525	-4.064	-4.114	-5.063	-3.372	-3.100	-2.708	-2.435	-2.829	-2.657	-2.506	-2.371	-2.028	-2.218	-2.482
ferrosil	-1.134	-8.331	-2.511	-0.008	-7.029	-1.002	-0.325	-0.378	-4.149	-4.698	-4.372	-0.437	-0.486	-2.195	-1.986	-1.802	-1.637	-2.245	-2.005	-1.784
forsteri	-9.722	-17.265	-0.598	-0.310	-3.814	-0.358	-0.325	-0.379	-0.430	-4.170	-4.183	-2.877	-2.712	-0.534	-0.580	-0.624	-0.666	-1.484	-1.191	-0.909
gehlenit	-18.261	-4.616	-1.899	-0.507	-0.147	-0.081	-0.572	-0.616	-0.430	-0.479	-0.526	-4.097	-3.880	-2.612	-2.577	-2.607	-2.698	-0.706	-0.780	-0.842
greenali	-5.785	-6.052	-0.398	-1.115	-0.147	-10.149	-1.097	-1.181	-0.659	-0.479	-0.526	-4.191	-4.203	-3.730	-3.646	-3.629	-3.674	-2.847	-3.310	-3.998
grunerit*	-8.538	-2.315	-5.406	-1.210	-0.424	-1.046	-0.588	-0.798	-1.255	-0.700	-0.740	-0.572	-0.616	-4.223	-4.258	-4.310	-4.382	-3.779	-4.155	-4.763
gypsum	-2.342	-6.985	-14.962	-1.092	-0.780	-1.837	-9.372	-8.615	-0.993	-1.321	-1.380	-0.571	-0.615	-0.658	-0.699	-0.739	-0.777	-4.478	-4.752	-5.181
halite	-6.970	-5.859	-2.057	-3.541	-0.309	-6.857	-1.199	-1.339	-7.884	-1.174	-1.346	-0.778	-0.815	-0.658	-0.699	-0.739	-0.777	-0.812	-0.876	-0.928
huntite	-7.002	-1.099	-0.230	-13.361	-1.759	-0.220	-1.767	-1.693	-1.468	-7.184	-6.517	-1.436	-1.492	-0.851	-0.886	-0.920	-0.953	-0.813	-0.879	-0.935
jadeite	-0.545	-1.551	-2.199	-0.297	-11.745	-2.958	-6.827	-6.793	-1.614	-1.587	-1.697	-1.510	-1.668	-1.551	-1.616	-1.688	-1.769	-0.983	-1.039	-1.086
kalsilit	-1.132	-2.884	-6.978	-0.371	-0.702	-2.787	-0.574	-0.897	-6.757	-1.530	-1.438	-5.884	-5.287	-1.824	-1.978	-2.133	-2.289	-1.860	-2.080	-2.372
kerolite	-3.791	-19.926	-3.286	-2.092	-1.970	-0.707	-3.048	-3.127	-1.194	-6.717	-6.673	-1.802	-1.906	-4.726	-4.207	-3.735	-3.320	-2.447	-2.775	-3.124
lime	-21.257	-1.248	-2.003	-6.951	-6.910	-0.103	-2.824	-2.851	-3.198	-1.471	-1.734	-1.337	-1.226	-2.011	-2.121	-2.236	-2.359	-2.973	-2.541	-2.529
magnesit	-1.545	-15.504	-2.208	-1.546	-2.731	-12.691	-1.096	-1.455	-2.870	-3.261	-3.320	-6.625	-6.572	-1.107	-0.979	-0.846	-0.708	-2.491	-2.789	-3.155
magn-hyd	-17.412	-27.695	-0.740	-2.422	-2.673	-3.671	-0.266	-0.410	-1.787	-2.884	-2.895	-1.989	-2.244	-6.514	-6.449	-6.378	-6.300	-0.570	-0.312	-0.135
merwinit	-30.599	-9.837	-17.252	-2.488	-14.102	-2.821	-12.028	-11.394	-0.540	-2.095	-2.383	-3.377	-3.433	-2.505	-2.776	-3.060	-3.360	-6.212	-6.009	-5.762
monticel	-11.159	-6.034	-0.583	-15.621	-6.122	-10.472	-2.525	-1.453	-10.790	-0.662	-0.781	-2.905	-2.915	-3.490	-3.549	-3.612	-3.680	-3.677	-4.370	-5.170
nesqueho	-5.209	-10.322	-11.391	-0.137	-2.566	-0.339	-2.892	-2.935	-0.477	-10.219	-9.677	-2.657	-2.926	-2.928	-2.944	-2.966	-2.995	-3.754	-3.920	-4.117
pargas/2	-11.574	-8.624	-1.415	-8.713	-13.990	-1.884	-8.807	-7.221	-2.953	-2.954	-2.944	-0.900	-1.024	-3.196	-3.471	-3.756	-4.053	-3.032	-3.137	-3.291
par/2Fe*	-9.672	-9.629	-21.596	-2.119	-3.518	-0.126	-0.568	-0.777	-5.722	-4.320	-3.015	-9.162	-8.671	-1.160	-1.310	-1.481	-1.679	-4.365	-5.046	-5.843
periclas	-10.643	-1.545	-7.040	-17.710	-0.817	-1.715	-1.112	-0.379	-0.971	-1.153	-1.324	-2.936	-2.939	-8.201	-7.751	-7.322	-6.918	-1.909	-2.500	-3.316
phlogopi	-2.462	-10.764	-7.568	-5.244	-9.167	-9.825	-0.591	-1.015	-1.401	-1.756	-2.085	-1.799	-0.661	-2.965	-3.023	-3.121	-3.269	-6.543	-5.900	-5.418
portland	-11.625	-1.516	-7.383	-8.423	-3.238	-1.194	-2.100	-2.447	-2.761	-3.048	-3.313	-1.489	-1.648	-1.805	-1.961	-2.117	-2.275	-3.477	-4.119	-5.162
prehnite	-1.313	-8.854	-6.057	-5.321	-2.286	-0.389	-10.130	-10.426	-10.718	-11.011	-11.308	-2.398	-2.705	-3.013	-3.330	-3.660	-4.008	-2.435	-2.767	-3.120
px.Ca-Al	-8.997	-5.264	-7.566	-4.198	-5.099	-3.988	-0.212	-2.978	-2.520	-2.097	-1.711	-3.565	-3.813	-4.066	-4.329	-4.608	-4.907	-4.378	-5.201	-6.184
sepiolit	-6.363	-0.075	-8.985	-6.293	-6.797	-5.787	-3.469	-4.846	-4.408	-3.992	-3.599	-11.613	-11.925	-12.242	-12.564	-12.886	-13.205	-5.228	-5.956	-6.843
siderite	-0.284	-0.172	-1.474	-7.865	-0.695	-0.131	-5.307	-2.147	-2.546	-2.917	-3.265	-1.363	-1.047	-0.763	-0.504	-0.268	-0.049	-13.518	-14.107	-14.619
silic-am	-0.064	-7.909	-8.309	-1.162	-0.214	-1.254	-1.718	-6.000	-5.691	-5.389	-5.097	-3.227	-2.872	-2.534	-2.211	-1.907	-1.625	-1.370	-0.964	-0.721
spinel	-8.278	-7.303	-2.622	-7.810	-7.239	-6.626	-6.313	-0.034	-0.096	-0.155	-0.211	-3.598	-3.924	-4.247	-4.575	-4.910	-5.255	-5.612	-6.370	-7.225
sylvite	-7.194	-0.514	-0.372	-0.750	-0.541	-0.998	-1.193	-1.371	-1.535	-1.688	-1.832	-4.820	-4.560	-4.322	-4.110	-3.929	-3.786	-3.687	-3.656	-3.907
talc	-1.558	-7.837	-6.961	-0.483	-0.582	-0.669	-0.710	-0.749	-0.785	-0.821	-0.854	-0.266	-0.319	-0.370	-0.419	-0.466	-0.512	-0.555	-0.634	-0.701
tremolit	-10.633	-0.976	-7.468	-6.246	-5.491	-4.724	-4.345	-3.975	-3.618	-3.281	-2.969	-1.970	-2.104	-2.236	-2.368	-2.502	-2.638	-2.778	-3.071	-3.388
actinol*	-3.147	-5.269	-1.478	-7.534	-7.572	-7.585	-7.583	-7.577	-7.565	-7.548	-7.525	-0.886	-0.917	-0.946	-0.974	-1.000	-1.024	-1.046	-1.085	-1.114
Fe-actin	-7.549	-0.444	-1.321	-1.621	-1.759	-1.784	-1.768	-1.740	-1.705	-1.668	-1.631	-2.688	-2.441	-2.231	-2.059	-1.925	-1.827	-1.764	-1.740	-1.861
wollasto	-5.675	-5.151	-4.001	-3.240	-2.494	-1.777	-1.434	-1.107	-0.796	-0.504	-0.231	-7.497	-7.463	-7.422	-7.375	-7.321	-7.259	-7.189	-7.021	-6.818
zoisite	-2.214	-2.578	-2.783	-2.568	-2.156	-1.615	-1.317	-1.011	-0.706	-0.407	-0.121	-1.601	-1.581	-1.575	-1.590	-1.628	-1.697	-1.802	-2.154	-2.747

