



Programa Regional de Entrenamiento

Geotérmico (PREG)



Diplomado de especialización en geotermia-2017

Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Unidad de Postgrados



Proyecto Final

Tema:

Geoquímica Preliminar del Prospecto Geotérmico Volcán Mombacho,
Nicaragua.

Presentado por:

Guillermo Antonio Martínez Márquez – Ingeniero Químico

Directora del trabajo:

Lic. María Inés Magaña

Ciudad Universitaria, Noviembre 2017

INDICE

1.	Resumen	4
2.	Introducción	5
3.	Planteamiento del problema	6
4.	Justificación del estudio	6
5.	Objetivos	6
5.1	Objetivo General	6
5.2	Objetivos Específicos	6
6.	Marco Teórico	7
6.1	Geoquímicas de las aguas termales	7
6.4	Fluidos primarios	9
6.5	Fluidos secundarios	10
7.	Diagrama de clasificación de las aguas	12
7.1	Diagrama de Piper-Hill-Langelier	12
7.2	Diagrama Cl-SO ₄ -HCO ₃	12
7.3	Diagrama Na-K-Mg	12
8.	Isótopos	13
9.	Geotermómetros líquidos	15
9.1	Geotermómetros catiónicos	15
9.2	Geotermómetro Sílice	16
10.	Geotermómetros de gases	16
11.	Diagramas de clasificación de gases geotérmicos	17
12.	Metodología	18
12.1	Recopilación de Información	18
12.2	Trabajo de campo	18
12.3	Muestreo in-situ	19
12.4	Métodos analíticos	20
12.5	Evaluación de la calidad de los resultados	21
12.6	Clasificación de las aguas	21
12.7	Origen de las aguas que alimentan el sistema geotérmico	21
12.8	Relaciones binarias	21
12.9	Calculo de geotermómetros	22
13.	Análisis de datos	22
13.1	Geología y Tectónica	22

13.2	Composición química de las aguas	22
13.3	Clasificación de las aguas	26
13.4	Origen de las aguas y recarga del sistema.....	29
13.5	Relaciones binarias.....	30
13.5	Cálculo de Geotermómetros.....	33
13.6	Clasificación de gases y geotermómetro de gases	35
14.	Presentación de resultados	38
14.1	Modelo Geoquímico conceptual preliminar	39
15.	Conclusiones y Recomendaciones.....	40
16.	Agradecimiento	41
17.	Referencias Bibliográficas.....	42
18.	Anexos	43

1. Resumen

El Volcán Mombacho es un tipo estrato volcán por productos andesíticos y basálticos moderadamente diferenciados. Aunque el volcán está actualmente inactivo, existen evidencias que indican que haya tenido una actividad efusiva en tiempo relativamente recientes y se concluye que hay indicios favorables para la existencia de una interesante anomalía térmica en el subsuelo, relacionado con la presencia de cuerpos magmáticos relativamente someros según la CNE, 2001 (Plan Maestro).

Las manifestaciones termales del área se debe a una fuerte actividad fumarólica de tipo volcánica, con temperatura de 107 °C en la altura del cráter principal del Volcán Mombacho, la fumarola tiene características hidrotermales con cierta influencia magmática.

En dirección al sur, en la planicie del volcán existen matinales de aguas termales superficiales con temperaturas medidas en el rango de 30°C y 56°C, con pH entre 5.9 y 8.60. También, en la dirección NE del volcán existen manantiales termales de 55°C con pH ligeramente ácido.

Las muestras recolectadas para este trabajo fueron caracterizadas geoquímicamente, entregando como resultado que en general son aguas del tipo sulfatadas clorurada Sódica, sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas, estas aguas son productos de la mezclas de aguas someras con pequeña contribución de fluido primario y vapor caliente con gases volcánicos de origen profundo, ubicadas en la zona del sistema geotérmico.

A partir de la composición isotópica se determinó que el origen de las aguas superficiales de los manantiales proviene de aguas meteóricas, mientras que el vapor condensado de la fumarola se deriva de aguas magmáticas como se muestra en el diagrama $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ en el cual se presenta también la curva meteórica mundial.

En la evaluación de las relaciones iónicas de Na/K, una relación baja tienden a presentarse en aguas que han alcanzado rápidamente la superficie, y por lo tanto, la zona de estudio está asociada con estructuras que permiten el ascenso de fluidos o zonas altamente permeables.

La temperatura posible del reservorio podría estimarse en el rango de 260°C a 285°C, estos valores fueron estimados a partir de distintos métodos:

1. Ecuaciones empíricas, como geotermómetros de cationes (Na/K) y de gases.
2. Diagrama de geotermometro Na-K-Mg (Giggenbach, 1988).
3. Diagrama de Na-K / Mg-Ca (Giggenbach & Goguel, 1989).

2. Introducción

La energía geotérmica es un recurso renovable, debido a que el calor de la tierra es considerado como infinito y cada vez que se extrae será restaurado de forma continua, siempre y cuando se tenga un buen manejo del recurso geotérmico, puesto que el fluido que transportará el calor hacia la superficie no es infinito. Nicaragua se encuentra en un lugar privilegiado para la generación de energía geotérmica, un ejemplo de ello es la zona Sur del Volcán Mombacho.

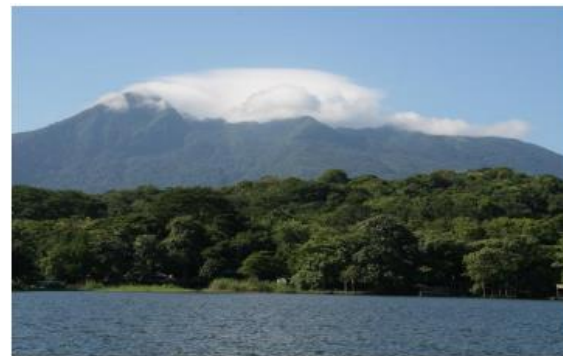


Fig. 1: Volcán Mombacho

El Volcán Mombacho se localiza en el extremo NO del Lago de Nicaragua (Cocibolca) en el segmento SE de la cadena volcánica de los Maribios, el volcán tiene un volumen de 50 Km³ y una elevación aproximadamente de 1340 m. Se caracteriza por presentar una morfología suave, con laderas de poca pendiente, con presencia de estructuras volcánicas (figura 1).¹

Nicaragua cuenta con dos campos en explotación, el campo geotérmico Momotombo, que en 1983 entró en operación la primera unidad de generación de 35 MWe, y en 1989 fue instalada una segunda unidad de 35 MWe, completando así la capacidad de la Planta Momotombo en 70 MWe. Durante el año 2003 ORMAT instaló y puso en operación una Planta de Ciclo Binario con una capacidad de 7 MWe. En junio 2013, la capacidad bruta de la planta Momotombo se estimó en 25 MWe incluida la planta de Ciclo Binario.

Durante los años 1992-1995 la empresa INTERGEOTERM, S.A. realizó investigaciones exploratorias y perforaciones profundas en un área de concesión geotérmica con una superficie de 90 km² alrededor de la zona de San Jacinto – Tizate, desde el año 2005 la empresa Polaris Energy de Nicaragua comenzó a explotar geotérmicamente el campo, operando con dos turbinas a boca de pozo con capacidad de 10 MWe las que fueron integradas al Sistema Interconectado Nacional. En el 2013 se concluyó la Segunda Fase de expansión de la planta geotérmica San Jacinto Tizate, siendo la capacidad instalada de 72 MWe y actualmente está produciendo 60 MWe.²

En este proyecto se pretende realizar la elaboración de un modelo geoquímico conceptual preliminar, con resultados químicos facilitados por el laboratorio de geoquímica de la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL). El modelo estará integrado por diferentes elementos tales como: origen de las aguas, fuente de calor, movimiento de fluidos, descarga del sistema, clasificación de aguas y gases, con el fin de conocer el tipo de sistema geotérmico existente en el área, y de esta forma definir el tipo de aprovechamiento de la fuente de energía geotérmica.

¹ Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua, Volumen X, Evaluación del área de Masaya – Granada – Nandaime.

² <https://energialimpiaparatodos.com/2016/08/23/tierra-de-volcanes-contexto/>

3. Planteamiento del problema

Como parte de los estudios del Plan Maestro, se realizaron nuevas mediciones de MT y TDEM en el Volcán Mombacho y la región inmediata al sur del mismo. Los resultados sugieren que un sistema geotérmico podría existir en el flanco sur del volcán, donde una capa conductora somera (250 m de profundidad), con espesor de 500 m, se extiende hacia el sur de la cima del volcán aproximadamente la elevación 300 a 400 m s.n.m. Es por lo anterior que se requiere realizar la caracterización geoquímica de las aguas de las manifestaciones termales del prospecto, que ayudará a definir la clasificación de los fluidos, así como la estimación de temperatura mediante el uso de geotermómetros, también conocer el origen de las aguas y el movimiento del fluido.

4. Justificación del estudio





En el Plan Nacional de Desarrollo Humano (PNDH), se expresa la estrategia del Gobierno de Nicaragua de buscar la transformación de la matriz de generación de energía eléctrica, la cual para Noviembre del 2017 reporta que el 41.418% de la energía consumida proviene de fuentes no renovable y el 58.582% de energía limpia. Del total de energías renovables que ocupa Nicaragua, un 16.117% proviene de generación geotérmica, otro 17.748% de eólica, 13.260% biomasa, 9.906% hidroeléctrica y 1.581% solar.³ Por lo que el gobierno promueve investigaciones geocientíficas de áreas de interés geotérmico con el propósito de promover el desarrollo de esta fuente de energía y de esta forma contribuir con el cambio de la matriz energética existente en el país.

5. Objetivos

5.1 Objetivo General

Elaborar un modelo geoquímico conceptual preliminar a partir de los resultados químicos de las manifestaciones termales de las áreas aledañas del Volcán Mombacho.

5.2 Objetivos Específicos

-  Caracterizar las aguas de las manifestaciones termales mediante herramientas geoquímicas como diagramas triangulares entre otras.
-  Determinar el origen de las aguas del sistema geotérmico.
-  Calcular las relaciones binarias entre los parámetros químicos de las especies de interés geotérmico.
-  Estimar temperaturas profundas del sistema geotérmico mediante geotermómetros líquidos y gases.

³ <http://www.cndc.org.ni/>

6. Marco Teórico

6.1 Geoquímicas de las aguas termales

Introducción

Durante la pasada década la geoquímica ha incrementado su papel en la evaluación y desarrollo de los recursos geotérmicos. Las perforaciones profundas en la mayoría de los ambientes geotérmicos, han proporcionado un gran volumen de información sobre la composición química, evolución y estructura térmica de los yacimientos geotérmicos. Estas informaciones han conducido al desarrollo de geotermómetros cuantitativos que se basan en las composiciones isotópicas y químicas de los fluidos.

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos, métodos utilizados, y resultados de la exploración geoquímica de la concesión geotérmica de áreas aledañas del Volcán Mombacho y que incluye datos químicos e isotópicos de vapor condensado.

Antecedentes Teóricos

Para identificar el rol que juegan en un análisis geoquímico los diversos constituyentes químicos de fluidos geotermales, Giggenbach (1991) propuso una subdivisión, que se basa en la información que éstos pueden entregar:

- Fluidos Conservativos (trazadores): corresponden a constituyentes no reactivos y químicamente inertes. Cuando se adicionan a la fase acuosa, idealmente no se modifican. Las razones de estos componentes se mantienen constantes al ser afectados por dilución, proveyendo así una signatura química que permite trazar el origen de las aguas.
- Fluidos Geoindicadores: especies químicamente reactivas, que responden a cambios en el ambiente de una forma que es conocida, proveyendo información acerca de las condiciones de equilibrio agua-roca en el reservorio geotermal.

Dentro de los fluidos trazadores se encuentran los gases nobles He y Ar, seguido por otros constituyentes comparativamente conservativos como Cl, B, Li, Rb, Cs y N₂. Por otra parte los fluidos geoindicadores incluyen aquellas especies que forman parte en las interacciones termodependientes entre minerales aluminosilicatados y los fluidos geotermales tales como Na, K, Mg, Ca y SiO₂, de la misma forma que el H₂, H₂S, CH₄, y CO₂, involucrados en las reacciones redox dependientes de la presión y temperatura.

El límite entre ambos grupos no es rígido, debido a que algunos elementos al ser sometidos al cambio en las condiciones de presión y temperatura pueden traspasar el límite entre trazadores y geoindicadores, como es el caso del cesio (Cs), que a una temperatura mayor que 250°C es inerte, mientras que a bajas temperaturas es incorporado en ceolitas (Giggenbach, 1991).

Las aguas geotermales contienen todos los iones mayores que se encuentran comúnmente en las aguas subterráneas, pero sus concentraciones son por lo general más altas que en aguas subterráneas no termales. De la misma forma la concentración de los elementos traza es mucho más alta que en las aguas no termales debido a la interacción agua-roca (Chandrasekharam & Bundschuh, 2008). Debido a la compleja interacción agua-roca existente en un sistema geotermal Giggenbach (1988) propuso que un sistema con cercana asociación magmática puede ser descrito en términos de dos procesos extremos, que si bien son hipotéticos, se encuentran claramente definidos. Estos procesos son:

- Dilución inicial de las rocas corticales en aguas ácidas formadas, por ejemplo a través de la absorción de vapores magmáticos en aguas de circulación profunda. Las aguas formadas en este proceso de alteración “dominado por fluido” contienen en gran parte de los constituyentes más solubles en proporción cercana a la roca original. La roca resultante de este proceso se encuentra fuertemente empobrecida en los componentes más fáciles de lixiviar.
- Equilibrio final de la fase fluida con “la roca” en esta configuración termodinámicamente estable, generada por la recristalización de la roca original, termodinámicamente inestable. La composición química de esta fase de roca estable, secundaria, se acerca, o es la misma (isoquímica) a la roca original. Este proceso se completa sólo en teoría en reservorios estacionarios de edad infinita. Sin embargo, la composición de los fluidos en estos sistemas de alteración “dominados por roca” es, para un amplio rango de rocas aluminosilicatadas, determinado únicamente por la temperatura y salinidad (contenido de cloruros).

La composición de las aguas, gases y rocas en un sistema dinámico de alteración hidrotermal actual, puede esperarse que corresponda a un estado estacionario intermedio entre los miembros extremos de ambos procesos.

6.3 Clasificación geoquímica de fluidos geotermales

Los fluidos geotermales tienen diversas composiciones químicas que generalmente reflejarán el marco geológico-geotérmico. Normalmente estas diferencias dependen de la contribución de volátiles desde fuentes magmáticas y de la recarga del sistema. Variados trabajos se han realizado utilizando esta característica para identificar tendencias y entender los procesos que controlan la composición del fluido y de esa forma entender el sistema geotérmico particular (e.g. Giggenbach, 1988; Goff y Janik, 2000; Gupta y Roy, 2007).

Una buena síntesis fue propuesta por Arnórsson et al. (2007) quienes caracterizaron los fluidos geotermales en dos categorías principales, basándose en los procesos de diferenciación geoquímica que tienen lugar durante la evolución del fluido. Estas categorías son: a) fluidos primarios y b) fluidos secundarios. De esta forma, se definen los fluidos primarios como aquellos que se encuentran en la base de la celda convectiva (nivel de

profundidad-base) y pueden ser producto de la mezcla de volátiles magmáticos con diversos componentes fluidos, como aguas meteóricas, marinas y connatas. Los fluidos primarios son principalmente de tipo clorurado, sulfato-ácido y salmuera híper-salinas. A medida que estos fluidos primarios ascienden hacia la superficie, sufren procesos de separación y mezcla que dan origen a fluidos secundarios. Los cambios más importantes que ocurren en estos fluidos son (Arnórsson, et al., 2007).

1. Flasheo: generación de una fase líquida y otra gaseosa, por efectos de descompresión en el ascenso.
2. Separación de fases en un fluido salino, generando una salmuera híper-salina y diluida.
3. Condensación del vapor al contacto con aguas subterráneas o superficiales para producir aguas sulfato-ácidas o aguas bicarbonatadas ricas en sodio o CO_2 .
4. Mezcla de CO_2 proveniente de fuentes profundas con aguas termales.
5. Mezcla de fluidos termales con aguas superficiales de baja temperatura.

6.4 Fluidos primarios

La composición química de los fluidos geotermales primarios está determinada por la composición de la fuente de fluidos y aquellas reacciones que involucren tanto la disolución de minerales primarios, como la precipitación de minerales secundarios junto con los procesos de adsorción y desorción. Generalmente la fuente de fluidos es agua meteórica o marina, siendo posible además identificar componentes de fluidos magmáticos, metamórficos y connatos.

Aguas Cloruradas

Este tipo de agua es muy común en los sistemas geotermales. Un alto porcentaje de las sales en disolución en las aguas termales cloruradas corresponde a NaCl. La concentración de cloruro típicamente va desde cientos hasta algunos miles de ppm. El contenido de cloruros depende de la disponibilidad de sales, las cuales pueden ser lixiviadas de las rocas del reservorio, o formarse de las reacción entre HCl magmático y los minerales formadores de roca. La concentración de la mayor parte de los componentes en aguas NaCl se determina por el equilibrio local con minerales secundarios si la temperatura supera los 100 –150 °C (e.g. Giggenbach, 1991).

Aguas Sulfato-ácidas

Este tipo de fluidos es frecuente en sistemas geotermales volcánicos, generalmente asociado a volcanes andesíticos (e.g. Truesdell, 1991). La acidez es causada por HCl y/o HSO_4^- , generando que el pH de estos fluidos en la cabeza de los pozos pueda ser muy baja (pH~2 a 25°C). Sin embargo, a altas temperaturas estas aguas son casi neutras, ya que la acidez está dada por el HSO_4^- que se disocia bajo esas condiciones. Así, la mayor diferencia

entre aguas cloruradas y sulfato-ácidas reside en que el buffer de pH para las aguas cloruradas es $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$, mientras que para las aguas de tipo sulfato-ácidas es $\text{HSO}_4^-/\text{SO}_4^{2-}$ (Arnórsson, et al., 2007).

Salmueras

Estas aguas son el resultado de procesos que concentran sales hasta dar origen a salmueras geotermales. Uno de estos es la disolución de evaporitas por aguas meteóricas y su reacción con minerales primarios de rocas volcánicas y HCl magmático. Además, aguas termales connatas salinas han sido encontradas en cuencas sedimentarias. La separación de fases es otro de los procesos que produce un aumento en la concentración de sales, este proceso de diferenciación origina por tanto, un fluido secundario.

6.5 Fluidos secundarios

Aguas sulfato-ácidas vapor calentado, la absorción y condensación de vapor y gases por parte de aguas subterráneas, acuíferos colgados, agua meteórica de infiltración somera, o lagos volcánicos, genera aguas termales “vapor-calentadas”. Esta denominación describe el hecho de que la condensación del vapor es un proceso exotérmico conducente al calentamiento de las aguas en contacto con la pluma ascendente de vapor y gas. Se caracterizan por un contenido bajo de Cl y relativamente alto de sulfato. Las aguas ácidas disuelven fácilmente los minerales primarios de las rocas volcánicas comunes (alcanzan valores de $\text{pH} < 1$), dejando un residuo de sílice oquerosa, anatasa, azufre nativo, sulfuros, esmectita y caolinita.

Aguas carbonatadas

Este tipo de aguas es común, tanto en los sistemas geotermales en áreas con actividad volcánica y en zonas sísmicamente activas sin volcanismo (Arnórsson, et al., 2007). Cuando el CO_2 es el principal gas contenido en el vapor, como ocurre generalmente con los gases de naturaleza geotérmica, las aguas vapor-calentadas asociadas serán del tipo carbonatadas. Si además se tienen concentraciones importantes de gases de H_2S , las composiciones resultantes pueden ser sulfatadas-carbonatadas aunque en este caso el pH es relativamente ácido. Por último, las aguas carbonatadas pueden ser el resultado de una mezcla de fluidos primarios a alta temperatura con aguas subterráneas frías ricas en HCO_3^- (Arnórsson, et al., 2007).

Aguas Mezcladas

La mezcla de fluidos termales con aguas superficiales en las zonas más someras del sistema es uno de los procesos que más comúnmente afecta a los fluidos geotermales durante el ascenso (Fournier, 1977). Estas aguas pueden exhibir razones de mezcla variables y pueden ser reconocidas por una correlación inversa de la temperatura y el

caudal de las manifestaciones, así como también por una correlación positiva entre componentes conservativos e isotópicos. Debido a que la mezcla de aguas altera el equilibrio agua-mineral, se producen cambios en las concentraciones iniciales de componentes reactivos (Arnórsson, et al., 2007). En caso que las aguas superficiales sean razonablemente puras, como normalmente es el caso, este proceso puede ser simplificado como dilución simple del fluido del reservorio geotermal, para algunos componentes (Reed y Spycher, 1984; Pang y Reed, 1998). Dentro de las modificaciones producidas, éstas típicamente incluyen un aumento en las concentraciones de Ca y Mg y una disminución en la razón de Na/K (tabla 1).

Tabla 1. Interpretación de relaciones de concentración química de especies de interés geotérmico (Módulo III PREG-2015)

Na/K	Baja razón permite delimitar áreas de alta temperatura o zonas de directa migración, no responde tan rápidamente al enfriamiento con indicadores que utilizan Silice, alta razón puede indicar rutas indirectas que permiten reacciones agua roca o enfriamiento.
CO ₂ /H ₂ S CO ₂ /H ₂ CO ₂ /NH ₃	Disminuye en vapor separado a baja temperatura debido a reacciones con roca y agua. Baja razón y alto contenido de sulfhídrico en el primer caso sugiere un vapor originado de bajo de la capa de oxidación y posiblemente en el acuífero de alta temperatura. Si la razón se incrementa en una dirección dada a través de un campo significa que el flujo inicia desde los valores menores, o sea en dirección contraria al incremento de temperatura. De manera general, altos valores indican viaje por largo trecho, indicando remoción de ácido sulfhídrico, hidrógeno y amoníaco.
Cl/B Cl/HCO ₃ Cl/SO ₄	Pueden proporcionar indicios de los límites de área explotada, patrones de circulación de fluidos, zona de recarga y descarga y la distribución de la salinidad total del agua, altos valores indican zonas de alta temperatura.
Na/Li	Índice cualitativo de calidad geotermal. En sistemas de alta temperatura su valor ronda entre los 60-80 y en aguas normales puede llegar hasta valores de 1500 debido a procesos de dilución y en casos contrario de evaporación.
Na/B Cl/B	Tendencia constante o lineal indican misma fuente de origen, cuando el valor disminuye podría estar indicando procesos de dilución y en casos contrario de evaporación.
Na/Ca	Alta razón indican alta temperatura y movimiento más directo a la superficie, puede ser usado de manera similar a la relación Na/K para delinear zonas de mayor ascenso de fluidos.
Na/Mg	Alta razón indica zonas de alta temperatura, valores bajos indican mezcla con agua.
SiO ₂ /K	Incremento en su razón desde agua profunda a superficial, indica mezcla con agua fría con productos de alteración de potasio a baja temperatura, pequeños cambios denotan depositación limitada de la sílice durante el ascenso.
Ca/HCO ₃	El calcio y bicarbonato suelen tener relación inversa uno aumenta cuando el otro disminuye, alta razón indica zonas de alta temperatura.
Ca/Mg	Alta razón indican migración directa y poca dilución.

7. Diagrama de clasificación de las aguas

7.1 Diagrama de Piper-Hill-Langelier

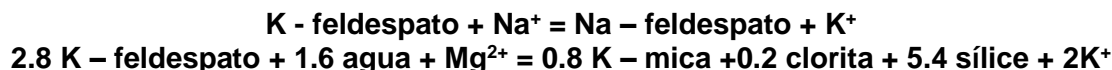
Formado por dos triángulos equiláteros donde se representa, respectivamente la composición aniónica y catiónica del agua y un campo central romboidal en que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Es necesario calcular las concentraciones de los iones en porcentaje y solo se pueden reunir en cada triángulo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Como aniones se suele representar a HCO_3 , SO_4 y Cl y como cationes a Na , K , Ca y Mg .

7.2 Diagrama $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$

En este diagrama, los rangos de composición están indicados para varios grupos típicos de agua, tales como aguas volcánicas y aguas calentadas por vapor, aguas maduras y aguas periféricas. Normalmente, el grupo más adecuado para la aplicación de geoindicadores comprenden las aguas neutrales con bajo sulfato, alto cloruro "aguas geotérmicas" a lo largo del eje de Cl-HCO_3 , cerca de la esquina del Cl , nombradas aguas maduras. Además, no sólo pueden ser utilizados para eliminar las aguas no adecuadas, también pueden proporcionar una indicación inicial de las relaciones de mezcla o agrupaciones geográficas, por ejemplo, el grado de separación entre los puntos de datos para cloruro alto y las aguas bicarbonatadas dan una idea del grado relativo de la interacción de los fluidos cargados de CO_2 a más bajas temperaturas, y de los crecientes contenidos de HCO_3 con el tiempo y la distancia recorrida por el agua subterránea (Giggenbach, 1988). Por lo tanto, es importante para clasificar las muestras en diferentes grupos controlar las relaciones de estas muestras en general, antes de más estudios químicos.

7.3 Diagrama Na - K - Mg

Giggenbach (1988) fue pionero en las técnicas para la derivación de geoindicadores de Na-K-Mg-Ca . Si sólo son considerados Na-K-Mg , un diagrama triangular se puede utilizar para distinguir entre aguas equilibradas, parcialmente equilibradas (incluyendo aguas mezcladas) y aguas inmaduras. Los geotermómetros sólo se pueden aplicar a las aguas equilibradas y parcialmente equilibrada. El diagrama triangular se basa en la dependencia de la temperatura de dos reacciones:



La zona de equilibrio parcial sugiere ya sea un mineral que se ha disuelto, pero no ha alcanzado el equilibrio, o una mezcla de agua que ha alcanzado el equilibrio (por ejemplo, agua geotérmica) diluido con agua no equilibrada (por ejemplo, agua subterránea fría), puntos cerca de la esquina de $\sqrt{\text{Mg}}$ generalmente sugieren una alta proporción de las aguas subterráneas relativamente frías, no necesariamente " inmaduras".

8. Isótopos

Isótopo son todos aquellos átomos del mismo tipo que tienen una cantidad diferente de neutrones en el núcleo, lo cual los hace más pesados o más ligeros que el átomo más abundante pero conservando todas las propiedades (es similar a una persona que ha perdido peso y se ve diferente pero sigue siendo la misma persona).

La característica distinguible será la masa o peso, relacionado a su movilidad, los electrones son los encargados de ligar a los átomos en las reacciones químicas y tienen un peso despreciable mientras que los protones y los neutrones en el núcleo le dan el peso al átomo. Y debido a que la ausencia o ganancia de un neutrón en un átomo es perceptible y medible, los isótopos tendrán diferente movilidad lo que hará variar las proporciones originales respecto al lugar de muestreo, mientras que el resto de características se conservarán (cumpliendo todas las leyes físicas, químicas, de asociación de los elementos y conservación de la masa y energía).

La figura 2 muestra los diferentes tipos de isótopos que existen y cada subcategoría se define a continuación:

- i. Isótopos ligeros: Son átomos del mismo tipo con deficiencia de neutrones. En los gráficos de abundancia describen valores más negativos.
- ii. Isótopos pesados: Son átomos del mismo tipo con ganancia de neutrones. En los gráficos de abundancia describen valores más positivos.
- iii. Isótopos estables: Son átomos no radiactivos del mismo tipo con diferencias de neutrones que no producen desintegración nuclear.
- iv. Isótopos inestables o radiactivos: Son átomos radiactivos que producen decaimiento o desintegración nuclear medible.



Fig. 2: Tipos de isótopos, Fuente: Amaya, 2016

En la mayoría de los casos, las composiciones isotópicas de hidrógeno y oxígeno de los fluidos geotermales no mantienen la identidad isotópica original del agua de la que provienen. Habitualmente dichas aguas presentan un enriquecimiento, o bien ^{18}O con proporciones constantes en deuterio/hidrógeno⁴.

Debido a sus diferencias en propiedades físico-químicas, la transformación de las sustancias isotópicas va acompañada de un efecto de fraccionamiento isotópico. La partición de fraccionamiento isotópico entre dos sustancias con diferente razón isotópica es llamada fraccionamiento isotópico⁵.

La figura 3 muestra además de la línea meteórica global de referencia (Giggenbach, 1992), otras líneas paralelas y porcentuales que indican zonas de aguas primarias de origen magmático (o aguas andesíticas muy antiguas), también otros puntos de aguas de descargas geotérmicas (círculos negros), agua de mar (cuadrado blanco), aguas subterráneas (círculos blancos), vapor de agua condensada de gases volcánicos (cuadrados oscuros), entre otros tipos de agua.

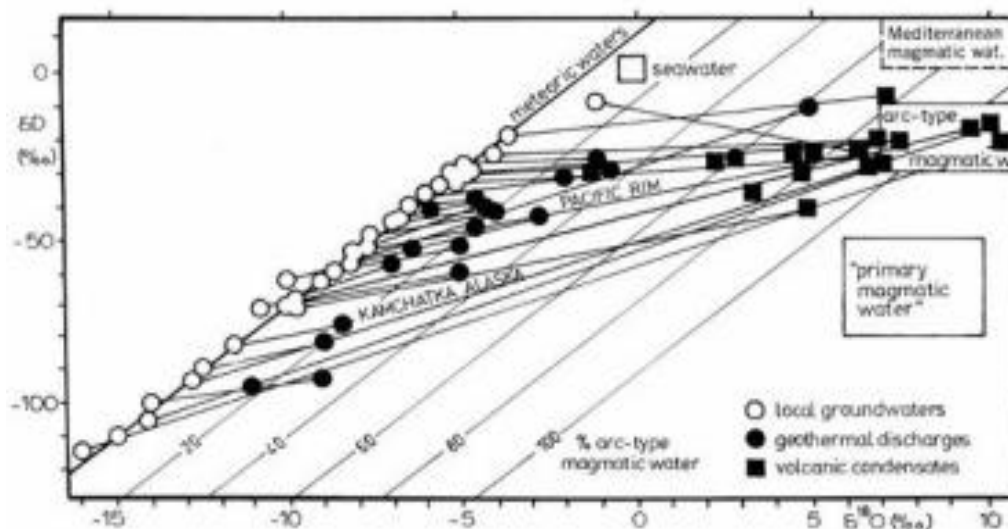


Fig. 3: Composición isotópica de línea meteórica, agua geotérmicas, descargas de aguas volcánicas y aguas subterráneas asociadas locales. (Curso Virtual de geotermia, edición 2016, Módulo III).

Aplicación de isótopos

Los isótopos son muy útiles en sistemas geotérmicos para muchos aspectos tales como clasificación de tipos de fluidos: superficiales, someros, juveniles-maduros, magmáticos, etc. así como también para la clasificación del tipo de sistema presente (líquido dominante o vapor dominante). También han sido utilizados en datación de edades de aguas subterráneas ($^3\text{H}/^1\text{H}$), por su puesto que son útiles para determinar el origen de las aguas

⁴ Análisis metodológico de las técnicas geoquímicas empleadas en prospecto geotérmico, Julio 1985.

⁵ Matus A., 2017. Geoquímica aplicada a la geotermia, técnicas isotópicas, Módulo III de geoquímica.

o su recarga ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$). Así como también movimiento de fluidos ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$ vs geoindicadores químicos como cloruros), análisis de agrupamiento en contraste con localización real de sitios, etc. Los isótopos han sido útiles además para la determinación de la extensión superficial del sistema y para definir interacción agua roca, y geotermometría isotópica, entre otras.

9. Geotermómetros líquidos

En la exploración y monitoreo de un sistema geotérmico, la estimación de las temperaturas ayuda a estimar el potencial geotérmico y la factibilidad de explotar el recurso para la generación de energía eléctrica. Esta estimación de temperaturas se realiza mediante el uso de geotermómetros que emplean la composición química o isotópica de los fluidos que emergen en manantiales hidrotermales o fumarolas, o que son extraídos de pozos perforados (Rodríguez, Santocho y Reyes, 2008). La composición de fluidos geotérmicos está controlada por reacciones químicas, que dependen principalmente de la temperatura de equilibrio entre el fluido geotérmico y los minerales a profundidad.

Los geotermómetros pueden ser aplicados en fase acuosa, gaseosa y mineral, los geotermómetros en fase acuosa asumen la consecución del equilibrio químico en los sistemas geotérmicos, se considera que los geotermómetros de gases corresponden al equilibrio entre los respectivos gases y los buffer minerales (Renderos, 2002). La utilidad de los geotermómetros no consiste solamente en utilizar ecuaciones empíricas derivadas de equilibrios químicos termodinámicos para estimar temperaturas sino que además se deben verificar la validez de los distintos geotermómetros al aplicarlos en diferentes campos.

Entre las condiciones de aplicabilidad de los geotermómetros están:

- No se deben tener contribuciones significativas de las especies químicas del sistema externo;
- Necesaria fuerte dependencia de relaciones cuantitativas entre especies implicadas en la reacción con la temperatura.

La aplicación e interpretación geotermométrica requiere un buen entendimiento de los procesos involucrados en el sistema geotermal. Actualmente se han desarrollado una amplia variedad de geotermómetros para fase acuosa, destacando las diferentes versiones del geotermómetro de sílice (D'Amore y Arnórsson, 2000) y los geotermómetros de composición catiónica.

9.1 Geotermómetros catiónicos

Se basan en la distribución de álcalis entre la fase sólida y la fase líquida, pueden ser: Na/K, Na-K-Ca, Na-Ca-K-Mg, entre otros (Na-Li, K-Mg), funcionan bien para aguas

calientes, por lo que la aplicabilidad podría llegar hasta los 350°C debido a que están basados en relaciones que son menos afectadas por diluciones y separación de vapor, volviendo el reequilibrio más lento en comparación a los geotermómetros de sílice.

9.2 Geotermómetro Sílice

Su principio básico es la variación de la solubilidad con la temperatura, como la sílice está presente en diferentes formas es posible estimar temperaturas con geotermómetros de cuarzo, cristobalita, calcedonia, sílice amorfa entre otras). En resumen Rodríguez, Santocho y Reyes (2008) mencionan que la aplicación de los geotermómetros de SiO₂ ha presentado diversos problemas en la predicción de temperaturas debido a la presencia de procesos de mezcla de fluidos, re - equilibrio químico y de pérdidas de vapor, así como problemas relacionados con su determinación analítica, los geotermómetros catiónicos no presentan estas dificultades debido a que éstos se basan en relaciones iónicas y no en concentraciones de una sola especie química, sin embargo, su aplicación podría verse afectada por reacciones de intercambio iónico con minerales arcillosos, procesos de enriquecimiento de algunos cationes o por la falta de equilibrio entre solutos y minerales de alteración presentes en estos sistemas. En la siguiente tabla se muestran las ecuaciones empíricas y la aplicabilidad de algunos geotermómetros acuosos:

Tabla 2. Ecuaciones empíricas de Geotermómetros acuosos (Módulo III PREG 2015)

Geotermómetro	Ecuación Empírica	Aplicabilidad
Cuarzo - sin pérdida de vapor (Fournier, 1977)	$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{1309}{5.19 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	Hasta 250°C
Cuarzo con pérdida de vapor (Fournier, 1977)	$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{1522}{5.75 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	Hasta 250°C
Calcedonia (Fournier, 1977)	$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{1032}{4.69 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	Hasta 250°C
Cristobalita (Fournier, 1977)	$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{1000}{4.78 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	Hasta 250°C
Sílice Amorfa (Fournier, 1977)	$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{731}{4.52 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	Hasta 250°C
Na/K (Truesdell, 1976)	$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{856}{0.857 - \log \frac{\text{Na}}{\text{K}}} - 273.15$	T > 250°C
Na-K-Ca (Fournier, 1973)	$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{1647}{\log \frac{\text{Na}}{\text{K}} - \left(\beta \log \sqrt{\frac{\text{Ca}}{\text{Na}}} + 2.06 \right) + 2.24} - 273.15$	T > 250°C

10. Geotermómetros de gases

Los geotermómetros para vapor pueden ser clasificados en tres grupos, el primero está basado en el equilibrio gas-gas, el segundo grupo se basa en el equilibrio gas-mineral e

involucra a gases residuales H₂S, H₂ y CH₄. Los dos primeros grupos de geotermómetros para gases requieren sólo los datos sobre la abundancia relativa de los componentes gaseosos en una fase gaseosa, mientras que el tercer grupo pide información sobre las concentraciones de gases del vapor (Jacobo, 2003). En general los geotermómetros de gases son más seguros que los geotermómetros en fase acuosa debido a factores como las fuentes reducidas de gas, menos contaminación de gases, menos procesos de mezcla y el reequilibrio es más lento. Las temperaturas de estos geotermómetros se calculan convirtiendo la relación gas/vapor en los análisis de gas a presiones parciales, asumiendo el comportamiento de los gases ideales, corregido por la compresión de vapor (Powell, 2000). En la siguiente tabla se muestran las ecuaciones empíricas para los geotermómetros de gases:

Tabla 3. Ecuaciones empíricas para Geotermómetros de gases (Módulo III PREG 2015)

Geotermómetro	Ecuación Empírica	Aplicabilidad
D'Amore y Panichi (DAP, 1980)	$T(^{\circ}C) = \frac{24775}{(2 \log(\frac{CH_4}{CO_2}) - 6 \log(\frac{H_2}{CO_2}) - 3 \log(\frac{H_2S}{CO_2}) - 7 \log PCO_2 + 36.05)} - 273.15$	Hasta 350°C
Fischer-Tropsch (FT, Giggenbach, 1980)	$\log P_{CO_2} + 4 \log P_{H_2} - 2 \log P_{CH_4} = 10.76 - \frac{9323}{T}$	Hasta 350°C
Nitrógeno - Amoníaco - Hidrogeno (NAH, Giggenbach, 1980)	$\log P_{N_2} + 3 \log P_{H_2} - 2 \log P_{NH_3} = 11.8 - \frac{5400}{T}$	Hasta 350°C
Sulfuro de Hidrógeno - Hidrógeno (HSH, Giggenbach, 1997)	$3 \log P_{H_2S} - \log P_{H_2} = 15.71 - \frac{1041}{T}$	Hasta 350°C

11. Diagramas de clasificación de gases geotérmicos

Entre los gases relativamente más solubles en agua están: el amoníaco, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono. Entre los menos solubles en agua están el metano, hidrógeno, nitrógeno, argón, helio. Los sistemas de alta temperatura tienen un contenido significativo de dióxido de carbono, metano e hidrógeno mientras que los sistemas de baja temperatura están dominados por el nitrógeno. El gas de mayor proporción es el dióxido de carbono (alrededor 95%), y del 1 al 5% el resto de gases. El orden de solubilidades en la fase líquida puede resumirse de la siguiente manera: NH₃ > H₂S > CO₂ > N₂ > CH₄ > H₂.

Altos valores de las relaciones CO₂/H₂S, CO₂/H₂, CO₂/NH₃ indican, que los gases han viajado por un largo recorrido por lo que ha existido remoción de H₂S, H₂ y NH₃ del vapor por reacciones con las rocas en su camino y por ende entre más largo el recorrido dichos gases resultan más deficientes. Los principales gases nobles son: He y Ar por lo que normalmente se construye el diagrama triangular: N₂-Ar-He. El N₂ tiene normalmente un carácter inerte. Los gases de placas convergentes tienen una relación N₂ /Ar > 1500, los gases de placas divergentes una tiene una relación N₂ /Ar < 250 ver figura 4.

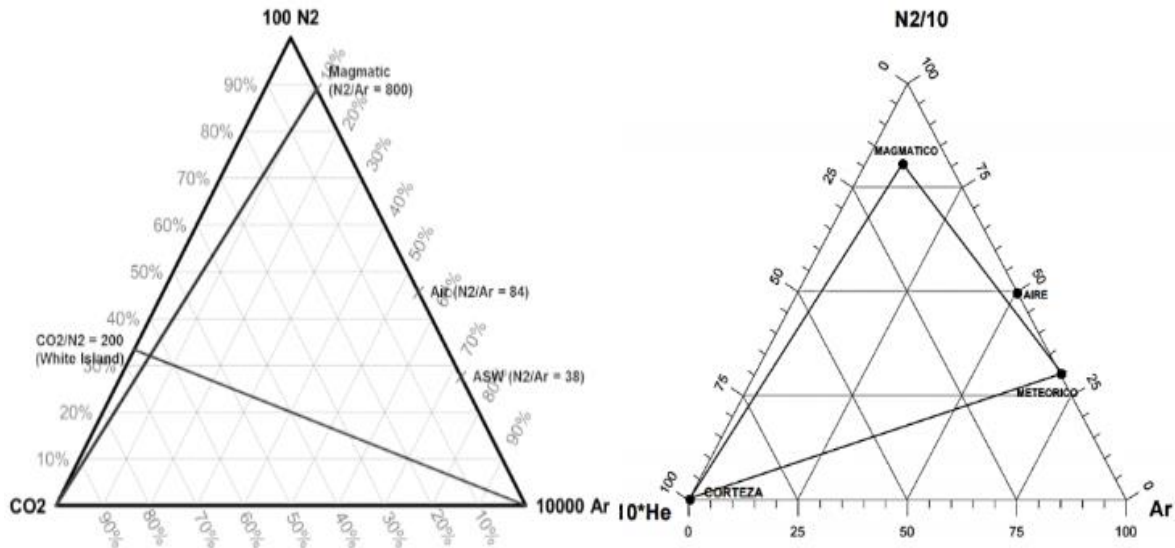


Fig. 4: Diagrama triangular para gases (Módulo III PREG -2015)

12. Metodología

12.1 Recopilación de Información

Se recopiló la información relacionada con el trabajo realizado en campo, los análisis de laboratorio realizado, la cual se describe a continuación:

12.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo incluyó una campaña de exploración en el mes de Marzo del presente año, se recorrió la zona Sur, Norte del área de interés geotérmico del volcán Mombacho durante cinco días. La campaña fue de reconocimiento, donde además se recolectaron muestras de agua y gases (figura 5). La mejor estrategia para la toma de muestras de aguas consiste en recoger un número razonable de muestras de aguas termales y no termales, distribuidas por toda el área de estudio, que se muestra en la figura 6.



Fig. 5: Fumarola del volcán Mombacho

12.3 Muestreo in-situ

Para el análisis geoquímico de las aguas, las muestras se recolectaron en botellas de polietileno de 500 ml para aniones (sin acidificar) y cationes, para amonio en agua se utilizó un frasco ámbar de 75 ml acidificando la muestra con ácido clorhídrico 6N para eliminar cualquier interferencia, la muestras de carbonatos se recolectaron en un frasco de vidrio transparente de 75 ml sin acidificar, siguiendo el procedimiento establecido en el laboratorio de geoquímica de la Empresa Nicaragüense de Electricidad. Las muestras de cationes se acidificaron con ácido nítrico 8 N, con el objetivo de prevenir la precipitación de componentes de cationes y algunos metales traza y para la tomas de muestras de gases se usaron bulbos de Giggenbach de 300 ml, con 50 ml de Hidróxido de sodio 4N en el interior del bulbo.

Los parámetros medidos en las aguas son:

- Temperatura, utilizando un equipo digital Thermometer (-50°C ~ +260°C)
- pH con medidor de PH electrónico (pH 330i) de 0.01 de resolución
- Conductividad eléctrica, Conductímetro digital Thermometer (modelo YSI 63)

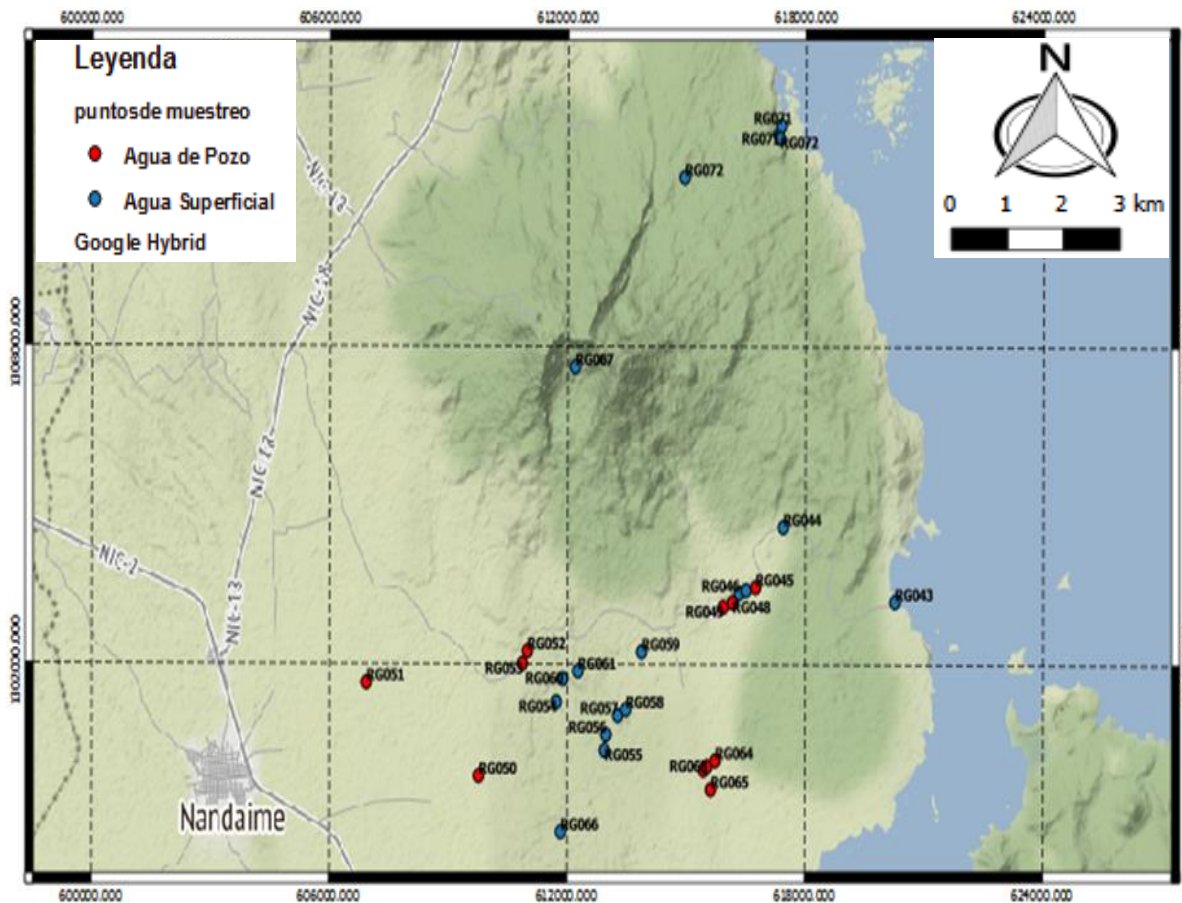


Fig. 6: Mapa con puntos de muestreos de aguas, Volcán Mombacho

12.4 Métodos analíticos

Los análisis químicos de las muestras fueron realizados en el Laboratorio de Geoquímica de la Empresa Nicaragüense de Electricidad de Nicaragua (ENEL). Estos consistieron en espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma acoplada (ICP-AES) (equipo modelo 2280, Perkin Elmer) para determinar las concentraciones de los cationes, la determinación de sulfatos por el método Turbidimétrico (modelo HACH 2100 AN) y valoración potenciométrica para determinar bicarbonatos y carbonatos, los métodos analíticos utilizados se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Elementos y su metodología de medición.

Elemento	Metodología	Tratamiento
K+	Espectroscopía de Emisión Atómica	Acidificada con HNO ₃ (1+1)
Na+		
Ca²⁺		
Mg²⁺		
Li⁺		
NH₄⁺ (agua)	Método Potenciométrico / Electrodo de Ión Selectivo	Acidificación con HCl (1+1)
Cl⁻	Valoración Potenciométrica con AgNO ₃	Ninguno
SO₄²⁻	Turbidimetría. Método Nefelométrico	Ninguno
F⁻	Método Potenciométrico / Electrodo de Ión Selectivo	Ninguno
HCO₃⁻, CO₃²⁻	Valoración Potenciométrica con HCl	Refrigeración. Se analiza el día siguiente de muestreo
B	Valoración Potenciométrica. Método del Manitol.	Ninguno
Fe²⁺	Espectroscopía UV - Visible	Ninguno
SiO₂	Espectroscopía UV - Visible	Dilución en campo de 1:10
H₂S (agua y vapor)	Titulación por Yodometría	Ninguno
CO₂ (vapor)	Valoración Potenciométrica	Ninguno
NH₄⁺ (vapor)	Método Potenciométrico / Electrodo de Ión Selectivo	Ninguno
pH	Potencimetría	Ninguno
Conductividad	Método Electrométrico	Ninguno
Sólidos Totales Disueltos	Método Gravimétrico	Ninguno

12.5 Evaluación de la calidad de los resultados

Para verificar la fiabilidad de los resultados del análisis químico de las muestras se recurre al Balance Iónico (B.I) de los componentes disueltos en las aguas. Aunque este procedimiento no es válido para aguas “no potables” (Murray & Wade, 1996), es utilizado en aguas termales para verificar los análisis. Este balance se define como la diferencia de los elementos de carga positiva con los de carga negativa, en porcentaje, expresado de la siguiente manera:

$$BI = 100 * \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

Para efectos de este estudio todos los datos que se encuentren “no balanceados” serán incluidos de todas formas, si es que el balance no supera el 10%, sobrepasando ese límite la muestra será descartada y serán incluidas en futuros muestreo y análisis.

12.6 Clasificación de las aguas

Luego de los análisis geoquímicos y de la obtención de las componentes mayoritarias de las muestras de agua recolectadas, se aplican herramientas gráficas y matemáticas específicas para el estudio de aguas termales. Como se mencionó anteriormente existen diversos gráficos que se utilizan para la clasificación de las aguas, en el presente trabajo se realizará la evaluación elaborando los siguientes diagramas:

- ✓ **Diagrama de Piper** mediante las hojas de cálculo de Powell y Cumming (2010).
- ✓ **Diagramas Triangulares (Na-K-Mg, Cl-SO₄-HCO₃, Cl-Li-B)** mediante las hojas de cálculo de Powell y Cumming (2010).

12.7 Origen de las aguas que alimentan el sistema geotérmico

Se utilizaran datos isotópico de aguas superficiales (anexo, proporcionado por el Laboratorio de Geoquímica ENEL, Nicaragua) y vapor condensado de estudio de gases realizado en la fumarola del volcán Mombacho (Garafolo et al., 2007). Con el fin de analizar el origen de los fluidos que alimenta el sistema. Se utilizara el programa Aguachem para la elaboración de diagramas isotópicos.

12.8 Relaciones binarias

Al evaluar las relaciones aniones/cationes se puede delimitar áreas explotadas, patrones de circulación de fluidos, distribución de salinidad total en el reservorio, enfriamiento, calidad geotermal, génesis de los fluidos, migración de los fluidos hacia la superficie. En este trabajo se determinarán las relaciones utilizando hojas de cálculo de Excel.

12.9 Cálculo de geotermómetros

La aplicación de los geotermómetros químicos es uno de los métodos más importantes métodos para la exploración y desarrollo de los recursos geotérmicos. Son útiles para predecir temperaturas de un posible recurso geotérmico mediante las muestras colectadas en superficies y en el reservorio durante la explotación. En este trabajo se determinarán los geotermómetros catiónicos y gaseosos, por medio de las hojas de cálculo propuestas por Powell y Cumming (2010).

13. Análisis de datos

13.1 Geología y Tectónica

El área del volcán Mombacho se ubica en el sector SO de Nicaragua en la parte meridional del Bloque Chortis de corteza continental perteneciente a la Placa Caribe, específicamente el área se ubica en el margen SO de la depresión nicaragüense en la línea volcánica del pacífico entre la Caldera de Apoyo y la Isla Zapatera en el lago de Nicaragua (CNE, 2001).

En el área se han definido tres sistemas de fallas con orientación NE-SO, N-S, y algunas NW-SE donde el sistema de falla N-S y NE-SO controlan las principales manifestaciones termales superficiales en forma de fumarolas y manantiales de agua caliente con precipitaciones de azufre y sílice respectivamente (figura 7).⁶

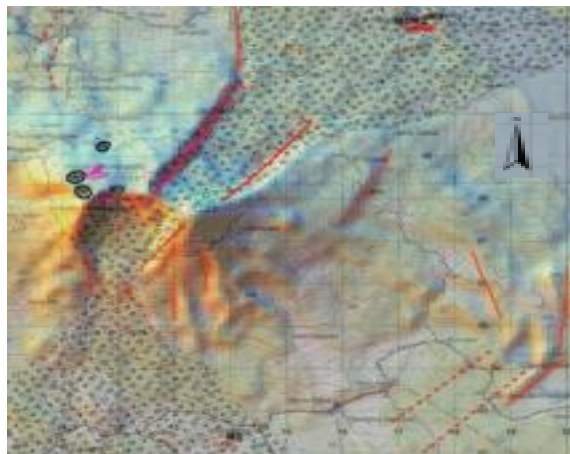


Fig. 7: Mapa de ubicación de fallas

13.2 Composición química de las aguas

Para hacer el análisis del sistema geotermal en las áreas aledañas al volcán Mombacho se consideraron las manifestaciones termales ubicadas en la zona N-S. En la tabla 5 se presenta los datos de los análisis químicos realizados a las muestras de área interés geotérmico.

⁶ Perspectivas Geotérmicas de la Laguna de Apoyo y el Volcán Mombacho, Noviembre 2009.

13.3 Clasificación de las aguas

❖ Diagrama de Piper Hill Langelier

Los resultados de las fuentes termales presentados en la figura 8, no presenta con claridad la clasificación de agua tipo geotérmica (NaCl), posiblemente debido a que el fluido geotérmico se mezcla con agua meteórica generando dilución en la cantidad de sólidos disueltos principalmente los cloruros, más adelante mediante diagramas se determinara si existe mezclas de aguas, sin embargo hay 4 puntos en la zona 1 (Rg.059, 071, 072 y 073), donde se ubicaron los puntos de mayor temperatura medida, de 34 °C a 56 °C, con respecto a sus concentraciones químicas y al diagrama de Piper, estas aguas se clasifican en sulfatadas cloruradas sódicas, sin embargo en la zona 2 (Rg.053, 067 y 074) tenemos aguas sulfatadas cálcicas y en la zona 3 se ubican la mayoría de las aguas de tipo bicarbonatada cálcica magnésica.

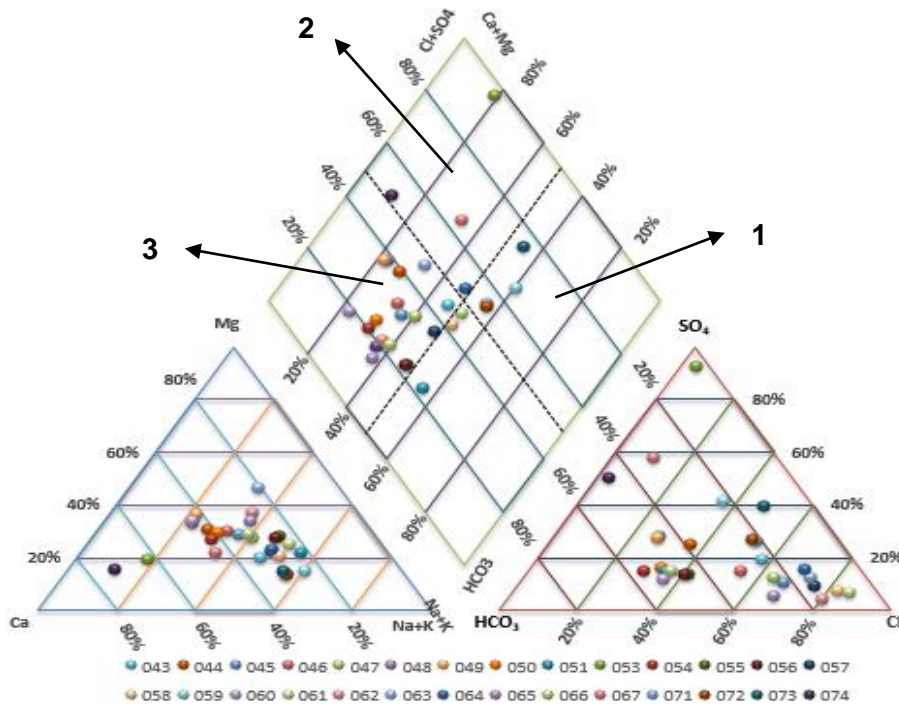


Fig. 8: Diagrama de Piper para la muestras de aguas

❖ Diagramas Ternario Cl-SO₄-HCO₃

Una clasificación de las aguas fue realizada con base en el contenido de los tres aniones en mayor concentración Cl-SO₄-HCO₃.

En la figura 9, se observan todas las fuentes termales analizadas, de las cuales las mayorías de ellas se encuentran en región de altos contenidos de bicarbonatos, es decir

son aguas periféricas o bicarbonatadas y algunas se ubican cerca del vértice de alta concentración de sulfato estas aguas son calentadas por vapor y gases volcánicos.

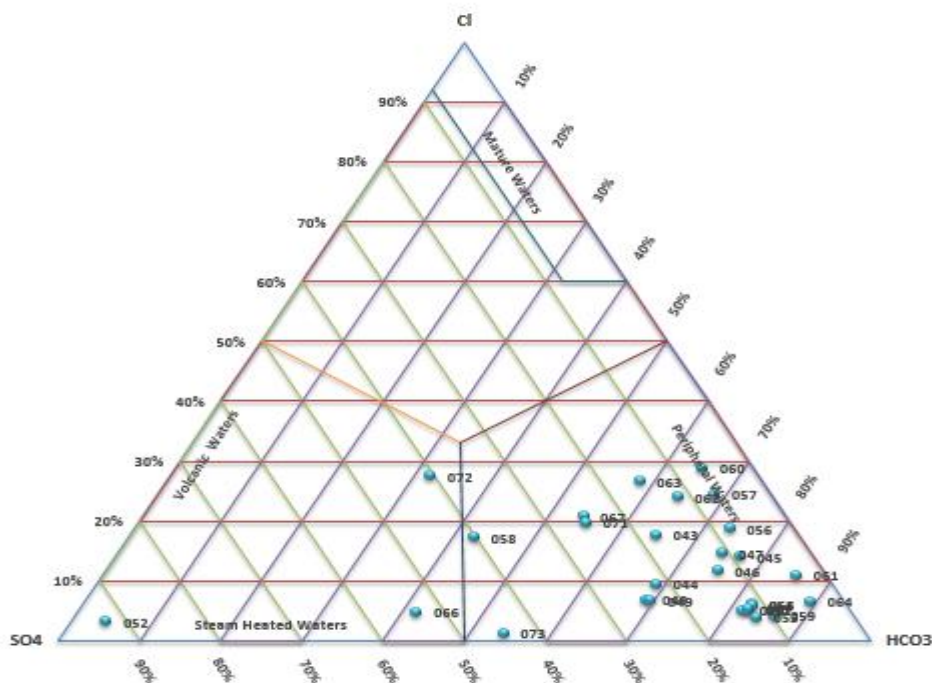


Fig. 9: Diagrama ternario CI-SO₄-HCO₃

❖ Diagramas Ternario Na-K-Mg

El diagrama que utiliza la ecuación Na-K (Arnórsson et al., 1983) y la ecuación K/Mg (Giggenbach, 1988) fue utilizado para la interpretación de las muestras el área de estudio como se ilustra en la figura 10.

De acuerdo a la figura, se observa que todas las fuentes termales analizadas, como se ve, no existe ninguna muestra correspondiente al equilibrio total, ni al equilibrio parcial, todas las aguas están muy cerca al vértice de Mg²⁺, presentan alto contenido de este ión que evidencia mezcla con aguas superficiales inmaduras, presenta un mayor grado de dilución, y la temperatura estimada mediante este método se ubica en 261°C.

❖ Diagramas Ternario Cl- B- Li

Giggenbach y Goguel (1989) propusieron este diagrama para dilucidar el origen de las aguas termales y la existencia de uno o más **upflows** bajo supuesto de que el cloro, boro y litio son elementos conservativos. Este último probablemente sea el metal alcalino menos afectado por procesos secundarios, por lo que es un buen elemento para evaluar el origen de los otros elementos conservativos (Giggenbach, 1991).

Como se ve en la figura 11, se puede apreciar que las aguas se concentran hacia la esquina del Cl, con una cierta dispersión entre los resultados, probablemente debido a mezclas con aguas con una baja razón de B/Cl, posiblemente exista un **upflow** único para todo este sistema debido a que las muestras se concentran en una zona.

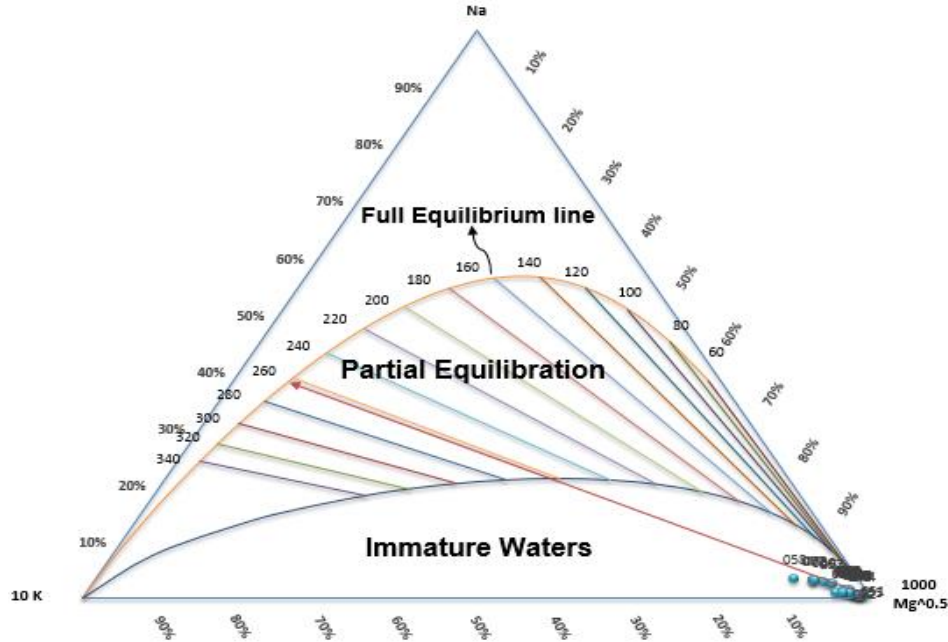


Fig. 10: Diagrama de Na-K-Mg

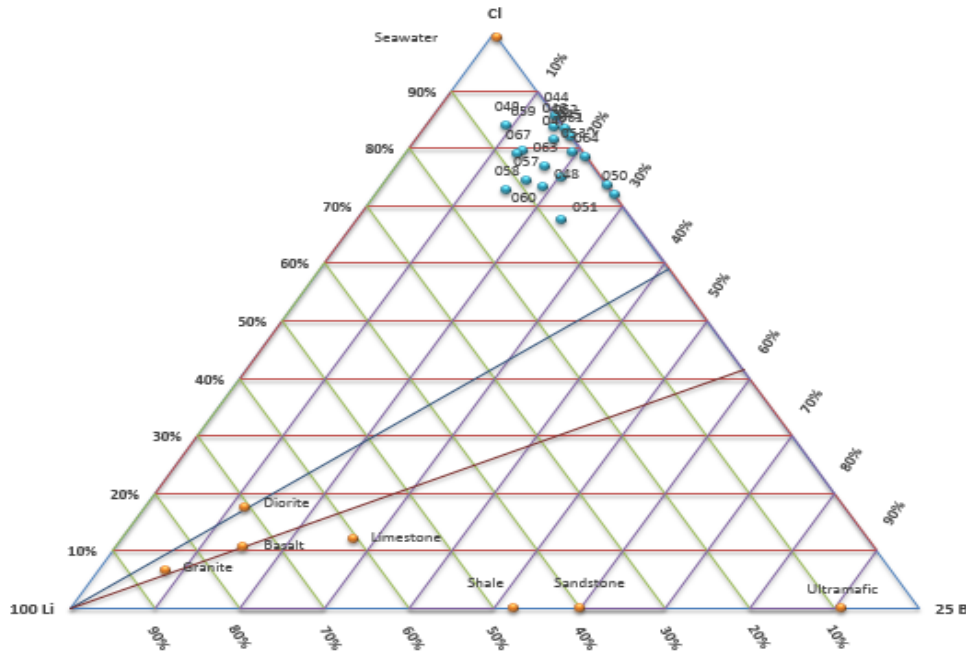


Fig. 11: Diagrama ternario Cl-Li-B

13.4 Origen de las aguas y recarga del sistema

Los análisis isotópicos se representan en el diagrama convencional de $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ junto a la línea meteórica mundial (figura 12), este diagrama muestra que la mayoría de las aguas superficiales en la zona de estudio se localizan muy cerca de la línea meteórica mundial, excepto una que se desvía un poco.

Para aquellas muestras que están próxima a la línea, son aguas de origen meteórico y la muestra que se aleja un poco de la línea meteórica mundial (Rg. 043) también es de origen meteórico. El alejamiento se debe al cambio de su quimismo ocasionado por proceso de evaporación. Las composiciones isotópicas del hidrógeno y oxígeno del vapor condensado indican que el vapor de la fumarola es proveniente de aguas magmáticas.

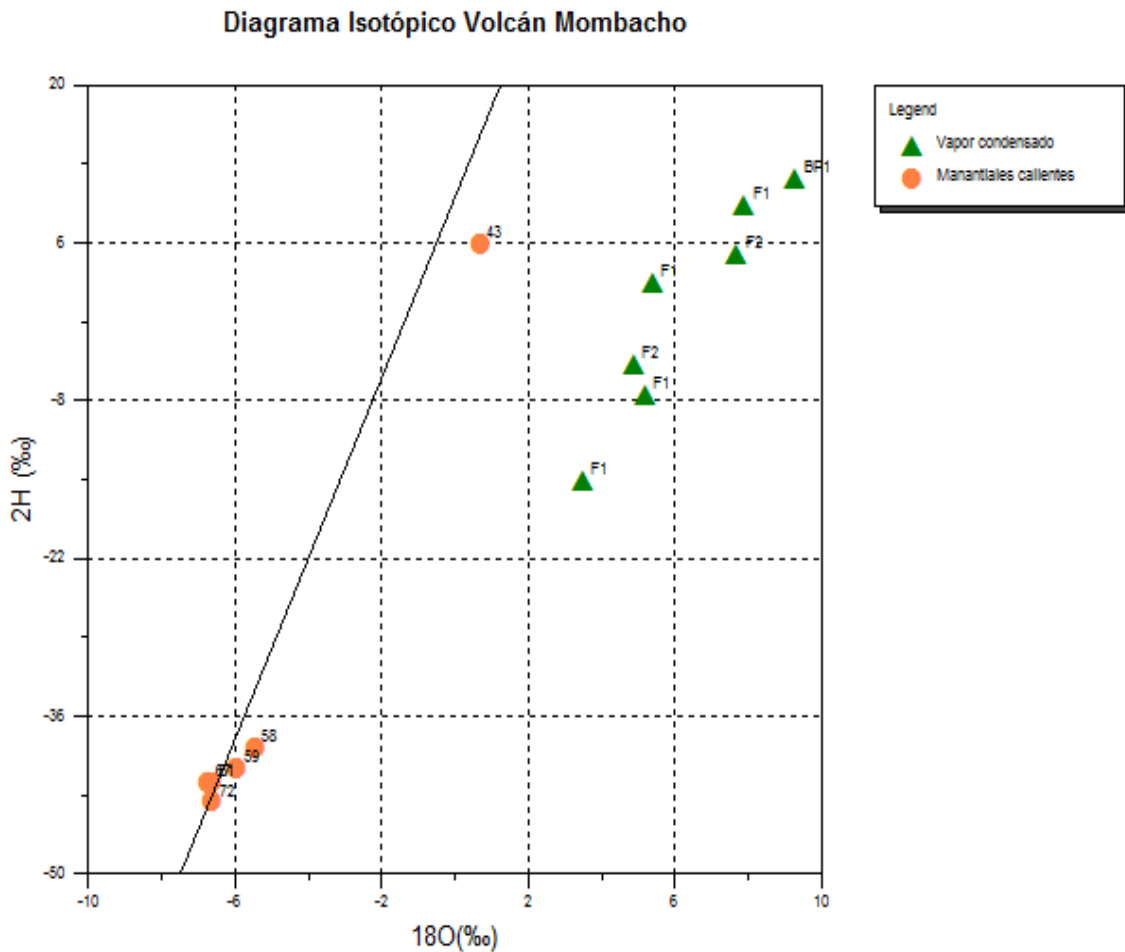
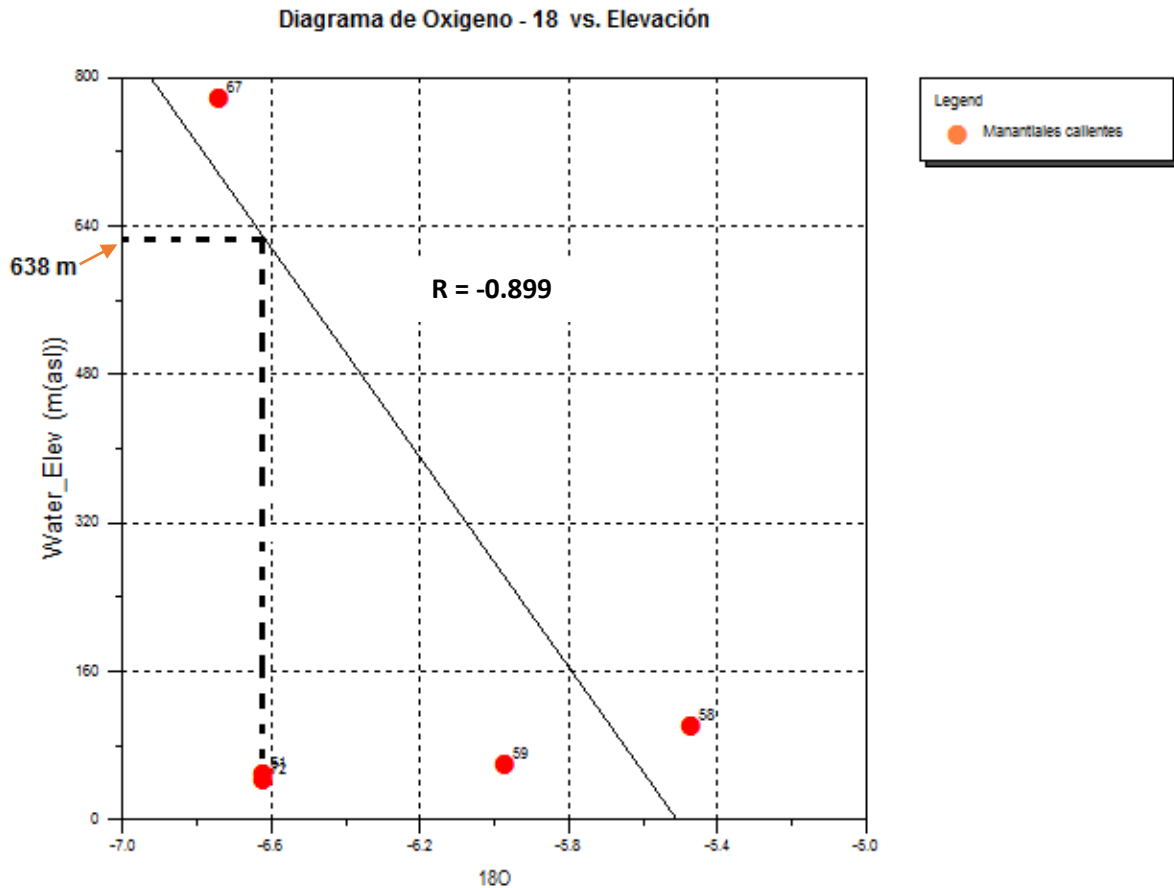


Fig. 12: Diagrama Isotópico

La recarga del sistema podría ubicarse cerca de donde nace el río Brujo, a unos 638 m sobre el nivel del mar (figura 13).



13.5 Relaciones binarias

❖ Relaciones Na/K y Na/Mg

En los resultados de la razón de concentración de especies químicas Na/K que se evidencia en la figura 14, se observa que los valores del área de estudio se encuentra por debajo de 6, estas bajas razones, suelen presentarse en aguas que han alcanzado rápidamente la superficie, y por lo tanto, están asociadas con estructuras que permiten el ascenso de fluidos o zonas altamente permeables (Nicholson, 1993), mientras que en la figura 15, se pueden observar valores bajos de Na/Mg, indicando que en la zona existe mezclas de aguas.

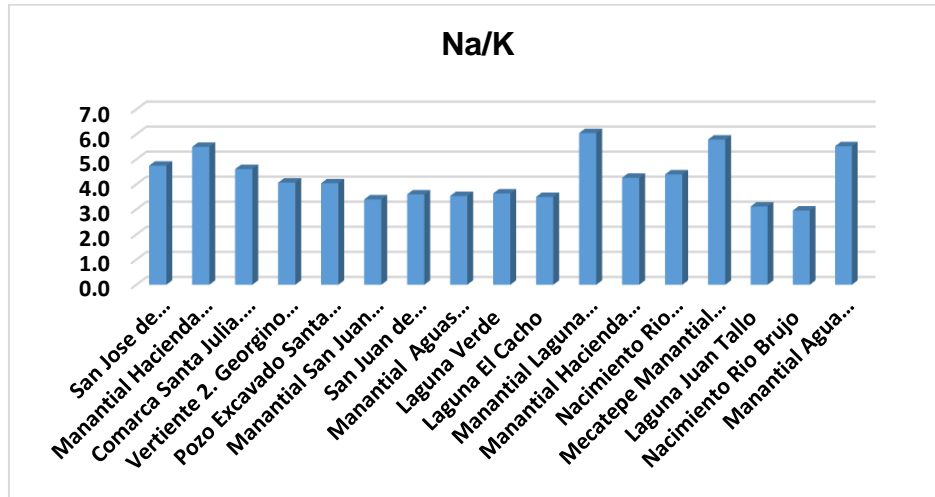


Fig. 14: Representación de la razón Na/K

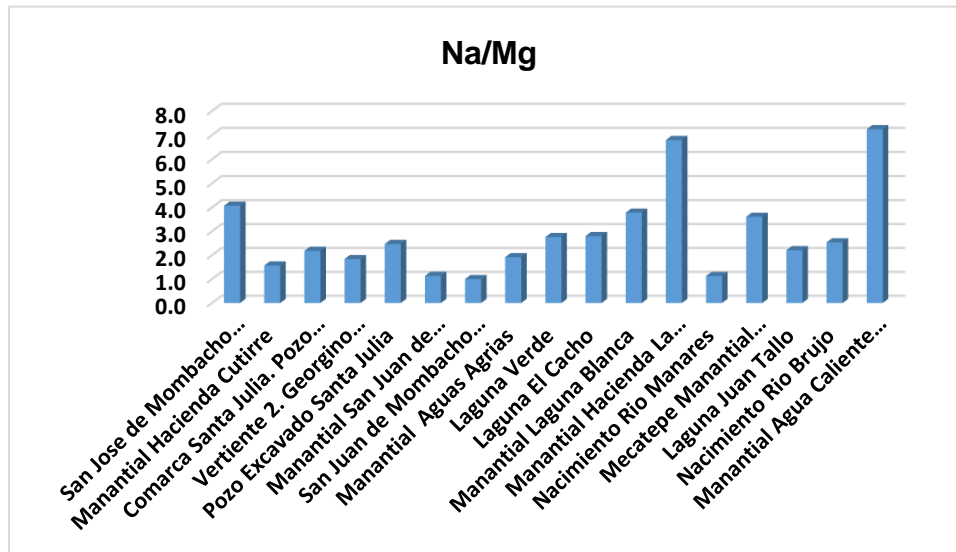


Fig. 15: Representación de la razón Na/Mg

❖ Relaciones Cl/SO₄

En los resultados de la razón de concentración de especies químicas Cl/SO₄ que se evidencia en la figura 16, se observa que el valor de la razón es más elevado para el lugar manantial Mecatepe, estas aguas posiblemente se mezclen directamente con fluido geotérmico profundo, ya que presentan mayor concentración de cloruro, sodio, boro en comparación con el resto de las muestras.

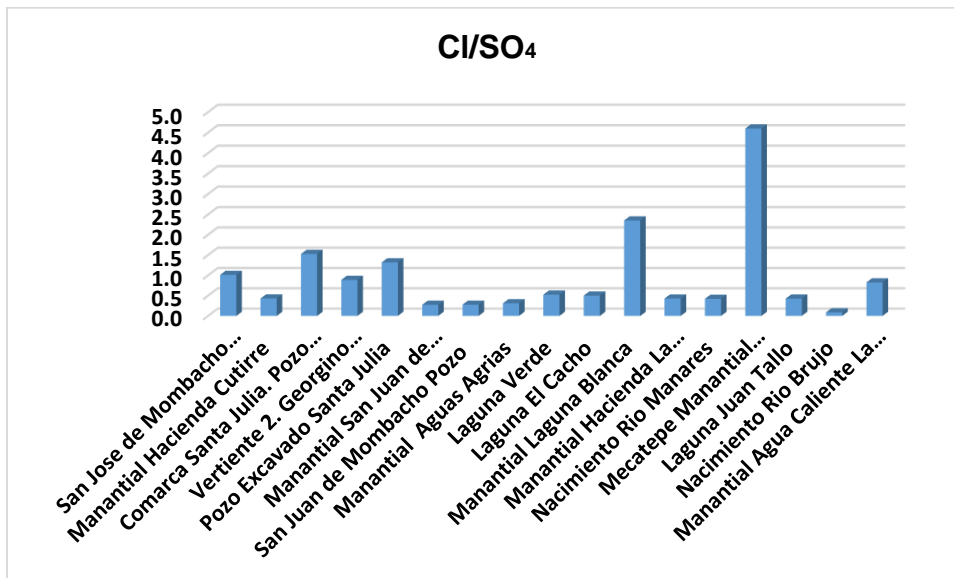


Fig. 16: Representación de la razón Cl/SO₄

En la figura 17 se presenta gráficamente la relación de Cl/B de las muestras analizadas, las mayorías de las muestras presentan valores altos de relación Cl/B, indicando la existencia de una zona de alta temperatura de la cual probablemente proviene un fluido primario perteneciente a un reservorio.

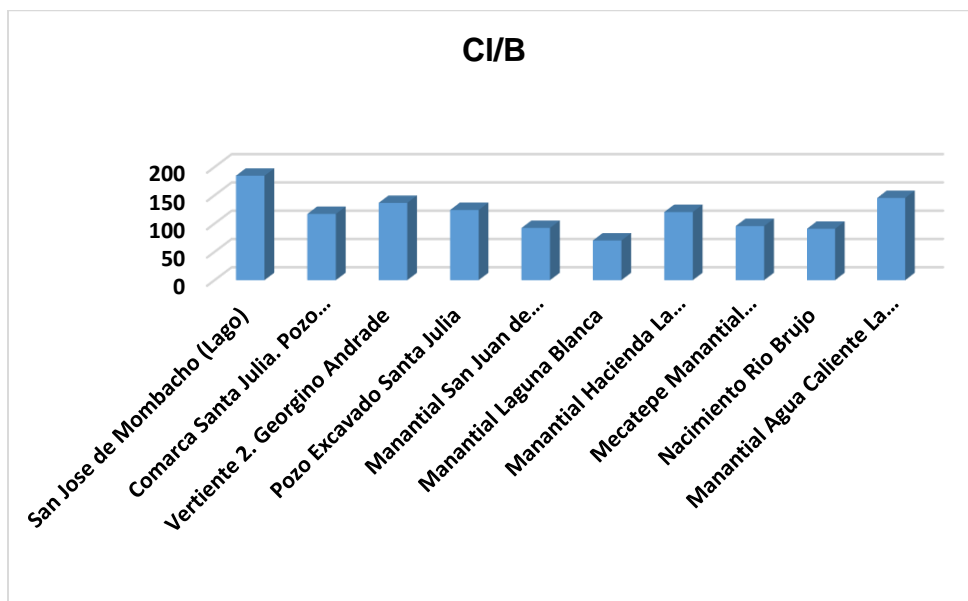


Fig. 17: Diagrama de relación Cl/B

❖ Diagramas de dispersión

La mezcla de dos aguas puede ser indicada en un gráfico donde se ploteen dos elementos conservativos, uno respecto del otro, ya que éstos son comparativamente inertes y no precipitan o reaccionan con minerales (Truesdell, 1991). La mezcla se muestra por lo general como una línea recta desde el primer miembro al segundo. Los miembros que se alejan de la recta pueden indicar error analítico o la existencia de un tercer miembro de mezcla.

La figura 18, muestra el diagrama de dispersión del área de estudio Cl vs. B, se aprecia una relación casi lineal para las muestras analizadas indicando claramente que existen mezclas de aguas meteóricas con fluido termal.

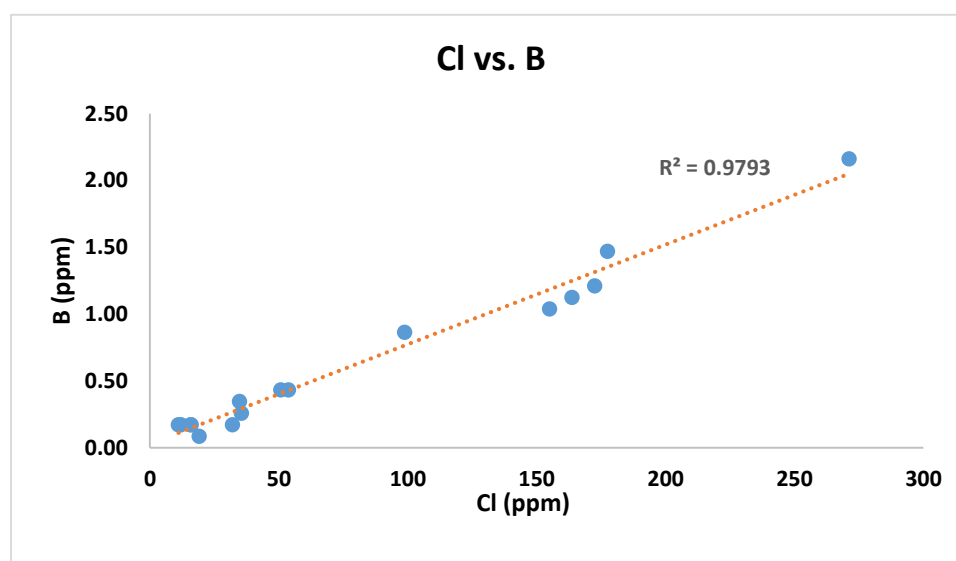


Fig. 18: Diagrama de dispersión Cl vs. B

13.5 Cálculo de Geotermómetros

En las tablas 6 se presenta el cálculo de geotermómetros realizado para las áreas del volcán Mombacho, se utilizaron geotermómetros catiónicos (Na/K). La ventaja de utilizar los geotermómetros catiónicos en vez de los componentes individuales, radica en que los primeros son menos susceptibles a ser modificados por procesos secundarios como ebullición y dilución, debido a que su constante de equilibrio depende de la temperatura y no de un componente individual, como es el caso de los geotermómetros de sílice.

De la tabla 6, solo es confiable la información que arrojan los geotermómetros aplicados a las muestras de los lugares con registro (**Rg. 058, 059, 061, 063, 064, 067, 071, 072, 073**) puesto que son estas muestras las que presentan, alto contenido de Cl, Na y altas temperaturas de descarga medidas en campo, además se obtienen valores similares.

Calculando el promedio de las temperaturas de las muestras mencionadas anteriormente y descartar los valores >289°C, por considerar datos sobre estimados, el resultado fue de 260°C, similar a la temperatura obtenida de 261°C en el diagrama Na-k-Mg (figura 10).

Para aumentar la fiabilidad de los resultados y obtener un rango de temperatura, se presenta el diagrama de Na-K / Mg-Ca (Giggenbach & Goguel, 1989), que es otro "geoindicador". El diagrama se elaboró con las muestras de los lugares con los registros mencionados antes. El rango de temperatura estimada mediante este método es de 260°C a 285°C (figura 19), este rango de temperatura incluye el 261°C.

Tabla 6. Geotermómetros líquidos

Rg	Lugar	Medicion en campo	mg / Litro			Geotermómetros cationicos						
		T °C	Cl	Na	K	Truesdell 1976	Tonani 1980	Arnorsson 1983	Arnorsson 1983	Fournier 1979	Nieva and nieva 1987	Giggenbach 1988
043	San Jose de Mombacho	28	32	29	6	285	299	286	289	290	276	300
044	Manantial Hacienda Cutirre	30	13	11	2	262	275	265	274	274	260	285
045	Comarca Santa Julia. Pozo	31	51	42	9	289	304	290	292	294	279	303
046	Vertiente 2	31	35	29	7	310	326	309	306	308	293	316
047	Pozo Excavado Santa Julia	29	54	45	11	311	327	310	306	309	294	317
048	Manantial SJ de Mombacho	29	16	17	5	343	362	339	326	331	315	336
049	San Juan de Mombacho	29	19	18	5	332	350	329	320	324	308	330
050	El Limonal Pozo Excavado	28	11	18	5	338	356	334	323	327	312	333
051	Comarca Aguas Agrias	33	12	50	9	262	275	265	274	274	260	285
053	Comarca Aguas Agrias	28	35	67	28	415	441	403	368	378	361	377
054	Comarca Aguas Agrias	29	11	23	7	335	354	332	322	326	310	332
055	Laguna Verde	31	16	40	11	330	348	327	318	322	307	328
056	Laguna El Cacho	31	15	42	12	338	356	334	323	327	312	333
057	Manantial Laguna Blanca	32	73	61	10	249	260	253	265	264	250	276
058	La Plazuela II. El SPA	40	205	156	24	239	250	243	258	257	243	269
059	La Plazuela.	56	177	218	51	302	318	302	301	303	288	311
060	Nacimiento Rio Manares	28	13	22	5	297	312	297	297	299	284	308
061	Mecatepe. Manantial Hidrot.	50	315	235	41	255	267	258	269	269	254	280
062	San Luis de Manares	30	99	120	19	243	254	247	261	260	246	272
063	San Luis de Manares	33	271	173	24	226	235	231	249	247	233	260
064	San Luis de Manares	35	266	185	28	235	245	240	255	254	240	266
065	San Luis de Manares	30	57	115	19	249	261	253	265	265	250	276
066	Laguna Juan Tallo	28	12	27	9	360	381	354	337	342	327	346
067	Nacimiento Rio Brujo	48	16	36	12	371	393	364	343	350	334	353
071	Agua Caliente La Calera #1	48	164	163	30	262	274	264	274	274	259	285
072	Agua Caliente La Calera #2	55	155	159	30	268	281	270	278	278	264	289
073	Agua Caliente La Calera #3	53	172	166	31	264	277	267	276	276	261	286

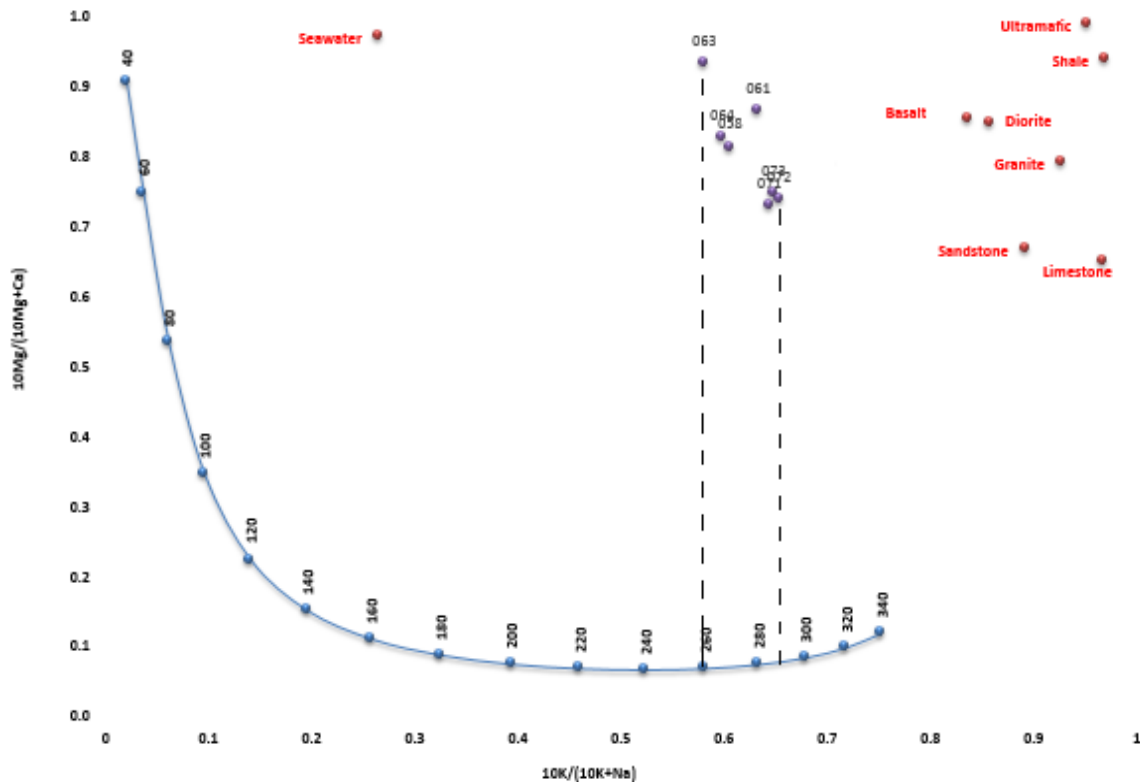


Fig. 19: Diagrama de Na-K / Mg-Ca

13.6 Clasificación de gases y geotermómetro de gases

La fumarola del Volcán Mombacho se encuentra ubicada en el lado noroeste de la cima del volcán a unos 1,031 m de altura sobre el nivel de mar (figura 20). Es un sistema de descarga natural de vapor y gases, la temperatura más alta de descarga en la fumarola es 107 °C.

Los componentes en la fase volátil presentes en la fumarola, el vapor de agua como especie dominante (90% o más) y de los gases secos el que se encuentra en mayor concentración es el dióxido de carbono (CO₂), seguido del dióxido de azufre (SO₂), además hay presencia de otros gases típicos de sistemas hidrotermales (Tabla 7).

Los contenidos menores de N₂, Ar y He en los gases de la fumarola (figura 21), indica que el N₂ proviene de origen atmosférico, el He y Ar se suministra por una fuente no atmosférica (manto), la posible fuente de calor puede ser un intrusivo magmático que esté por debajo de la fumarola y que probablemente de origen a un reservorio.

De acuerdo a la figura 22, que presenta los resultados de geotermómetros de gases de la fumarola, posiblemente indicaría que la temperatura del vapor que está en la parte somera por debajo del subsuelo es de 200°C.

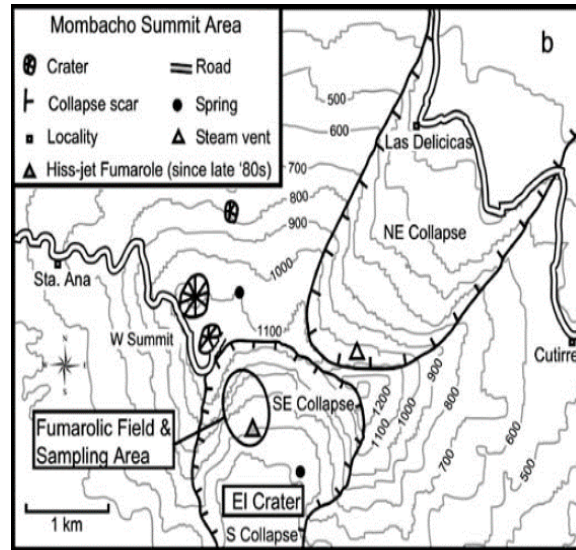


Fig. 20: Fumarola del Mombacho (fotografía: equipo de ENEL)

Garafolo et al., 2007

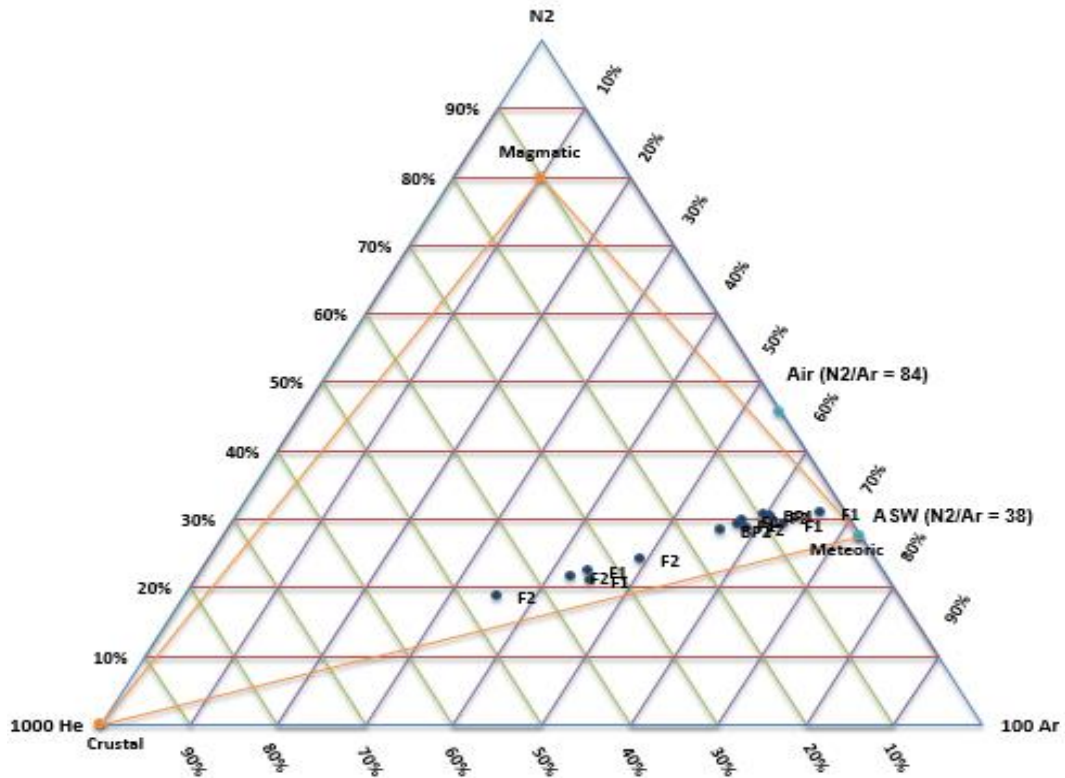


Fig. 21: Diagrama ternario N₂-He-Ar de muestras de gases de fumarola Mombacho

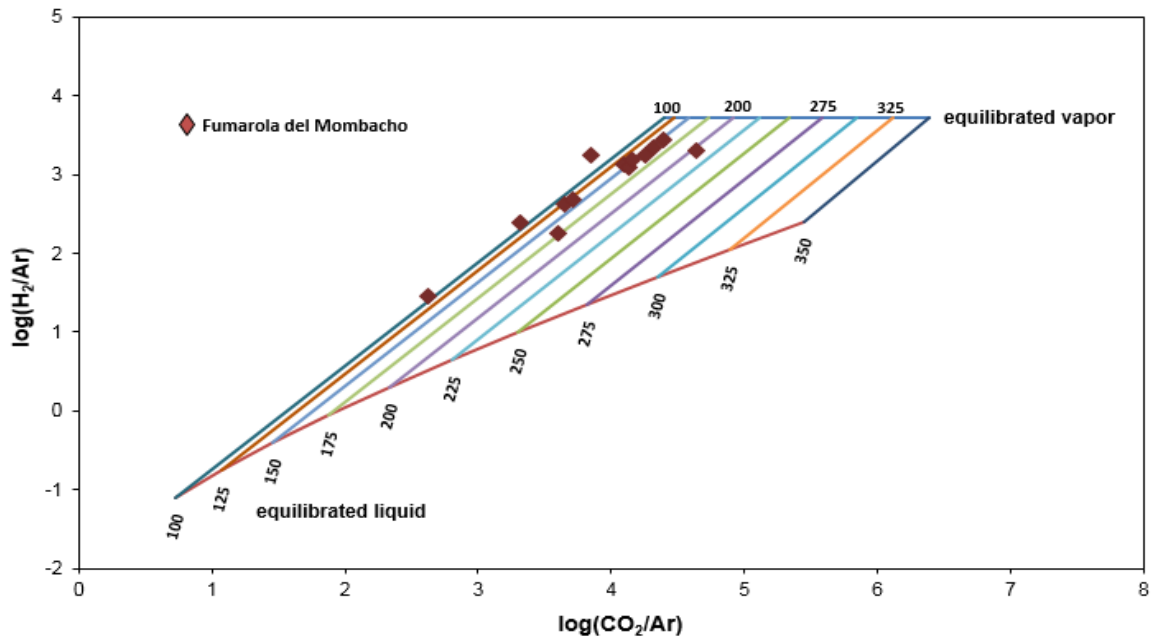


Fig. 22: Diagrama cruzado H₂/Ar vs. CO₂/Ar de muestras de gases de fumarolas (Volcán Mombacho)

Tabla 7. Outlet temperatures (in °C) and chemical and isotopic composition of the fumarolic discharges from Mombacho volcano

No.	Sample	Date	T°C	CO ₂	HCl	HF	SO ₂	H ₂ S	S	H ₂ O	N ₂	CH ₄	Ar	O ₂	Ne	H ₂	He	CO	δ ¹⁸ O	δD
1	F2	Mid-Nov 2002	120.6	8815	26.61	ND	81.95	1774	0.213	987072	63.04	0.201	1.249	0.335	0.0010	2166	0.105	0.001		
2	F1	Mid-Nov 2002	119.2	24616	1.814	ND	20.74	2177	0.268	971681	312.7	0.106	6.218	80.36	0.0032	1103	0.467	0.008		
3	F2	Mid-Nov 2002	115.6	28826	2.239	ND	40.93	2315	0.413	965735	319.4	0.245	6.407	77.03	0.0034	2677	0.092	0.002	7.7	4.9
4	F1	End-Nov 2002	119.6	36702	4.305	ND	61.20	1908	0.477	953499	4057	0.192	87.25	1168	0.0352	2513	0.352	0.039	7.9	9.3
5	F1	End-Nov 2002	119.6	26566	2.339	ND	8.312	528.9	0.259	970289	74.30	0.307	1.456	8.293	0.0010	2521	0.031	0.002		
6	F2	End-Nov 2002	116.0	24172	2.392	ND	7881	1095	0.341	963896	94.91	0.219	1.955	13.66	0.0014	2605	0.041	0.002		
7	F1	Mar 2003	115.0	20575	2.243	0.150	6.074	1294	0.552	977889	184.2	0.030	3.994	44.27	0.0035	1950	0.299	0.001	5.2	-7.5
8	F2	Mar 2003	118.0	21831	2.380	1.494	145.0	1845	0.176	973625	43.25	0.231	0.892	3.825	0.0008	2503	0.048	0.001		
9	BP1	Mar 2003	94.2	59053	5.245	3.293	319.6	4648	0.387	930333	224.4	0.172	4.397	56.99	0.0028	5351	0.069	0.003	9.3	11.6
10	BP2	Mar 2003	93.7	60202	7.520	4.722	560.0	4906	0.370	927609	209.3	0.279	4.161	26.37	0.0034	6471	0.114	0.034		
11	F2	Apr 2003	118.4	163171	10.70	ND	81.49	16199	1.185	802923	401.6	1.067	7.761	39.68	0.0053	17162	0.988	0.018	4.9	-4.9
12	F1	Jul 2003	118.0	56149	56.70	ND	17.83	2026	0.215	939155	65.94	0.223	1.298	0.830	0.0010	2527	0.029	0.002	5.4	2.4
13	F1	Apr 2005	116.4	35518	7.678	4.000	3275	4324	0.567	951793	782.4	0.096	16.96	114.9	0.0102	4164	0.208	0.003	3.5	-15.1

Garafolo et al., 2007

14. Presentación de resultados

Los resultados obtenidos en el diagrama de Piper mostró la clasificación de tres tipos de aguas predominantes, sulfatada clorurada sódica, sulfatadas cálcicas, indicativas de procesos de reducción de anhidrita y oxidación de H_2S y aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas magnésicas típicas de zonas poca profundas, por otra parte el diagrama de aniones mayores $Cl-SO_4-HCO_3$ con firma que las mayorías de las aguas son periféricas ricas en bicarbonatos y otras calentadas por vapor con gases volcánicos.

La clasificación de los gases provenientes de la fumarola muestra características de gases de origen magmático con datos numéricos que dan la idea que hay mezcla en bajo grado con aire.

El diagrama isotópico para Mombacho demostró que las muestras de aguas superficiales son de origen meteórico posiblemente afectadas por pequeñas contribuciones de aguas derivadas del magma, mientras las muestras de vapor condensado tomado de la fumarola es de origen magmático, la recarga del sistema está ubicada a 638 m de altura.

Los resultados obtenidos de las relaciones binarias Na/K , Cl/SO_4 , Na/Mg y Cl vs. B , muestra lo siguiente:

1. En la zona de estudio las bajas razones de Na/K , indica la existencias de zonas altamente permeable, permitiendo el ascenso de fluidos a la superficie.
2. Las bajas razones de Cl/SO_4 , indica la posibilidad que el flujo patrón se origine debajo de la fumarola principal del sistema generando dos zonas descargas en dirección NE y S en la base del volcán Mombacho.
3. Tanto las razones binarias bajas de Na/Mg y el diagrama de dispersión $Cl-B$, indican posible mezclas de aguas superficiales con fluido primario al NE y S del volcán.

14.1 Modelo Geoquímico conceptual preliminar

A partir de los resultados del análisis de datos de la química de aguas y gases, presentado en el estudio, se construirá el modelo geoquímico conceptual preliminar para el sistema geotérmico del Volcán Mombacho (figura 23).

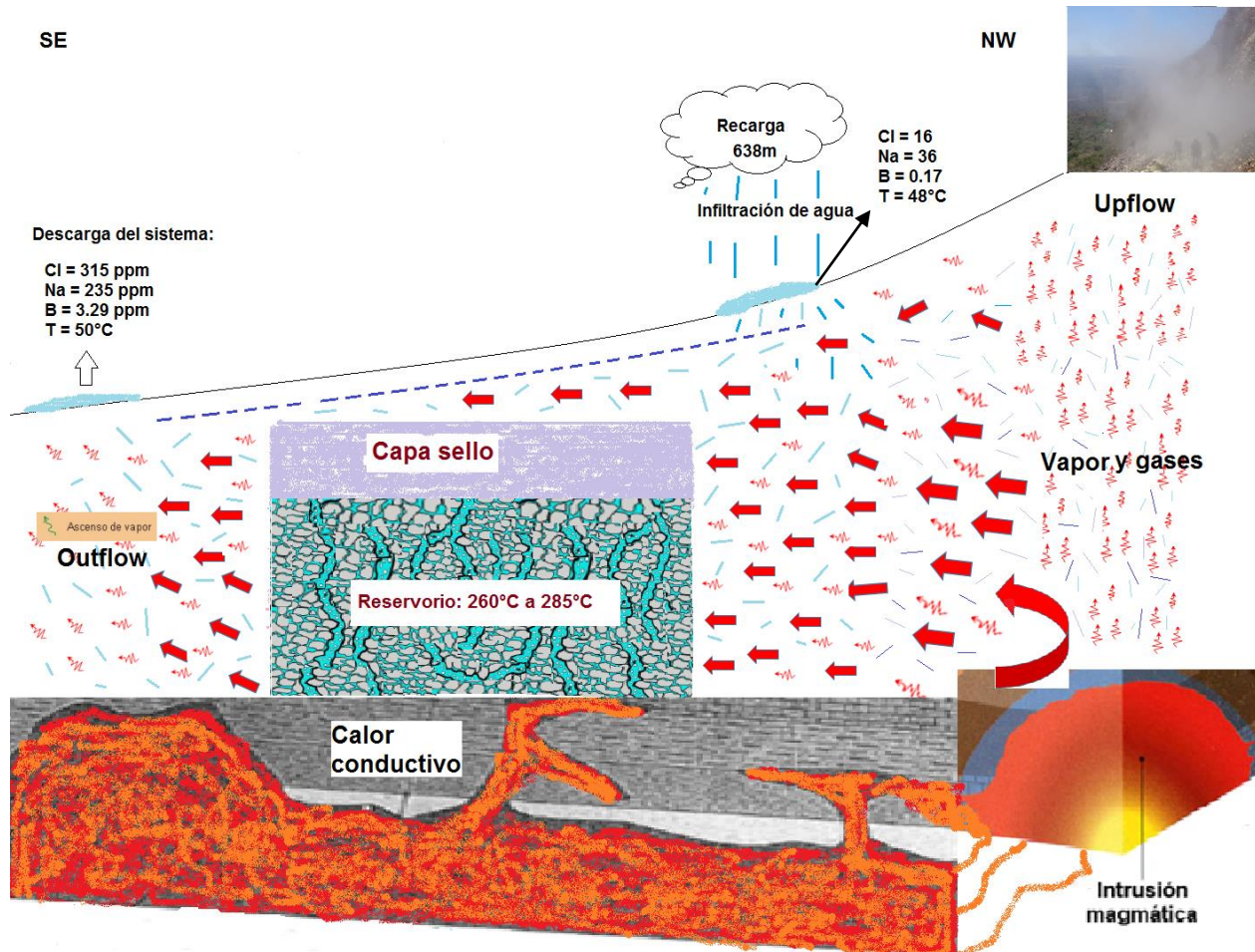


Fig. 23: Modelo Geoquímico Volcán Mombacho

15. Conclusiones y Recomendaciones

La caracterización geoquímica de las aguas termales de las zonas aledañas del Volcán Mombacho, indican que son aguas de mezclas, estas aguas se originan del fluido primario que a medida que asciende hacia la superficie se mezcla con aguas meteóricas someras generándose cambios en el quimismo del fluido primario.

Los isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, indican que las aguas termales son producto de la mezcla entre agua meteórica con pequeño aporte de aguas magmáticas y vapor con gases magmático, siendo el componente mayoritario y principal el agua meteórica.

Con base en los resultados de las relaciones de especies químicas disueltas en las aguas, la baja razón Na/K, sugiere que hay procedencia de fluidos profundos que ascienden a la superficie, mientras que la relación Cl/SO_4 es alta para la agua del manantial Mecatepe, posiblemente esta agua esté influenciada directamente por fluidos profundos en comparación al resto de los sitios muestreados, por otra parte la razón Cl/B sugiere que probablemente existe una zona de alta temperatura y que las muestras pertenezcan a un mismo reservorio.

Finalmente la utilización de varios métodos, indican la posibilidad que la temperatura en profundidad del fluido original se situó en el rango de 260°C y 285°C .

Por lo tanto, si en el futuro se llegara a comprobar la existencia del recurso en la zona de interés geotérmico del volcán Mombacho y se confirmara que la temperatura del reservorio está en el rango mencionado anteriormente, el vapor pudiera ser utilizado para generar energía eléctrica en una planta simple de flasheo.

En próximos estudios en la zona se recomienda realizar:

Un análisis hidrológico profundo. Contrastar zonas de baja pendiente, alto orden hidrológico y relativamente alta permeabilidad, con objeto de identificar y describir zonas de recarga.

16. Agradecimiento

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

Al Ing. Martínez, Presidente ejecutivo de la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL), por brindar el apoyo de otorgar el permiso para asistir al Diplomado de Geotermia para América Latina (2017) en el Salvador.

A la Lic. María Inés Magaña, quien fue la instructora idónea para este trabajo de graduación.

A las instituciones UES, LaGeo, NDF, ICEIDA y UNU-GTP por haberme brindado la oportunidad de extender mis conocimientos e invertir en mi proceso de formación integral.

17. Referencias Bibliográficas

- BID y UES, 2016. Curso básico en exploración geotérmica para la integración regional, Módulo III y IV.
- Consejo Nacional de Energía CNE. (2001). Plan maestro geotérmico de Nicaragua, volumen x, evaluación del área de Masaya – granada – Nandaime.
- Celis Abarzúa R, 2012. Caracterización geoquímica del sistema geotermal termas de Puyehue – aguas calientes, región de los lagos, Chile.
- Garafolo et al. Antonio Delgado, Franco Tassi, Orlando Vaselli y Thor H. Hansteen, 2007. Fumarolic gases at Mombacho volcano (Nicaragua): presence of magmatic gas species and implications for volcanic surveillance.
- Giggenbach & Goguel 1989. Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges.
- Instituto geológico y minero de España (IGME) 1985. Análisis metodológico de las técnicas geoquímicas empleadas en prospecto geotérmico.
- Jacobo, P (2003). Gas chemistry of the Ahuachapán and Berlín geothermal fields, El Salvador. UNU-GTP.
- Magaña, M. I., 2017. Geoquímica gases en sistemas geotermiales. Módulo III de geoquímica.
- Matus A., 2017. Geoquímica aplicada a la geotermia, técnicas isotópicas, Módulo III de geoquímica.
- Maureira G. A. 2013. Alteración hidrotermal y geoquímica de las aguas termales en el área de la concesión geotérmica Licancura III, I región de Tarapacá, Chile.
- Ministerio de Energía y Minas. 2009. Perspectivas geotérmicas de la laguna de apoyo y el volcán Mombacho.
- Pacheco Acosta Manuel y Viera Revelo Lorena. Metodología geoquímica aplicada a fluidos geotermiales. Octubre 2015.
- Powell, T. (2000). A review of Exploration Gas Geothermometry. Universidad de Stanford, California.
- Reye Linares C. 2013. Geoquímica preliminar de los prospectos geotérmicos de San Francisco Libre y Santa Bárbara, Nicaragua.
- <http://www.cndc.org.ni/>
- <http://www.energialimpiaparatos.com/2016/08/23/tierra-de-volcanes-contexto/>

18. Anexos

Isótopos			
Rg.	Sitio	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
043	San José de Mombacho (Lago)	0.67	5.9
058	Manantial La Plazuela II. El SPA	-5.47	-38.9
059	Manantial Hacienda La Plazuela	-5.97	-40.7
061	Mecatepe, Manantial Hidrotermal	-6.62	-41.9
067	Nacimiento Rio Brujo	-6.74	-41.9
072	La Calera Manantial Agua Caliente	-6.62	-43.7

Fuente: Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL)

➤ Fotos de las Areas de Estudio

