



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMERICA LATINA

EDICION 2016



TEMA: Evaluación Geoquímica y Ambiental de una Zona de Interés Geotérmico (sin explotar) en el Nor-Occidente de Nicaragua.

PRESENTA: Joela Victoria Palacios Aráuz

ASESOR: Ing. Luis Franco  
Ing. Antonio Matus

CIUDAD UNIVERSITARIA, Diciembre 2016

## INDICE

RESUMEN.....	5
INTRODUCCION.....	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	7
OBJETIVOS .....	7
Objetivo General.....	7
Objetivos Específicos.....	7
MARCO TEORICO.....	7
Clasificación de las aguas.....	7
Según iones predominantes .....	7
Según el pH.....	9
Según la Dureza .....	9
Diagramas de Clasificación de las aguas.....	10
Diagrama de Piper.....	10
Diagrama STIFF .....	11
Diagramas Binarios .....	12
Geotermómetros.....	13
Geotermómetros de Sílice. ....	13
Geotermómetros de Cationes. ....	13
METODOLOGIA.....	14
Recopilación de la Información .....	14
Clasificación de las Aguas .....	14
Cálculo de Geotermómetros.....	14
ANÁLISIS DE DATOS.....	14
Mapa de la zona y muestreo .....	14
Geología de la Zona.....	15
Hidrología de la Zona.....	18
Muestras analizadas .....	19
Clasificación de las aguas según el ion dominante .....	21
Fuentes Naturales .....	22
Manifestaciones Termales .....	29
Geotermómetros.....	36
Clasificación de las Aguas según el pH.....	39
Clasificación de las Aguas según la Dureza .....	40
Calidad de las Aguas de Uso Potable.....	40
Parámetros Físicos .....	41
Parámetros Químicos .....	41
Otros Parámetros .....	42
PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46

AGRADECIMIENTOS.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
APÉNDICES.....	48

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 ESQUEMA DEL DIAGRAMA DE PIPER .....	10
FIGURA 2 TIPOS DE AGUA DE ACUERDO A PIPER .....	11
FIGURA 3 TIPOS DE AGUA SEGÚN STIFF .....	12
FIGURA 4 ZONA DE MUESTREO.....	15
FIGURA 5 TECTÓNICA REGIONAL PARA CENTROAMÉRICA .....	16
FIGURA 6 DENSIDAD DE DRENAJE .....	19
FIGURA 7 DIAGRAMA DE PIPER FUENTES NATURALES.....	22
FIGURA 8 DIAGRAMA TERNARIO ANIONES .....	23
FIGURA 9 DIAGRAMA TERNARIO CATIONES .....	23
FIGURA 10 DIAGRAMA TEMPERATURA- SULFATOS (AGUAS SULFATADAS) .....	24
FIGURA 11 DIAGRAMA CALCIO-SULFATOS (AGUAS SULFATADAS).....	25
FIGURA 12 DIAGRAMA BICARBONATOS-CATIONES (FUENTES NATURALES) .....	26
FIGURA 13 DIAGRAMA DE PIPER-MEZCLAS.....	27
FIGURA 14 DIAGRAMA CLORUROS-BORO (FUENTES NATURALES) .....	27
FIGURA 15 DIAGRAMA CLORUROS-ARSÉNICO (FUENTES NATURALES).....	28
FIGURA 16 DIAGRAMA DE PIPER-MANIFESTACIONES TERMALES.....	29
FIGURA 17 DIAGRAMA TERNARIO ANIONES .....	30
FIGURA 18 DIAGRAMA DE PIPER-MEZCLAS.....	31
FIGURA 19 DIAGRAMA CLORUROS-BORO (MANIFESTACIONES TERMALES) .....	32
FIGURA 20 DIAGRAMA 2 CLORUROS-BORO (MANIFESTACIONES TERMALES) .....	33
FIGURA 21 DIAGRAMA CLORUROS-MAGNESIO (MANIFESTACIONES TERMALES).....	33
FIGURA 22 DIAGRAMA 2 CLORUROS-BORO (MANIFESTACIONES TERMALES) .....	34
FIGURA 23 DIAGRAMA CLORUROS-ARSÉNICO (MANIFESTACIONES TERMALES) .....	35
FIGURA 24 DIAGRAMA DE ISOTOPOS (MANIFESTACIONES TERMALES).....	35
FIGURA 25 GEOTERMÓMETRO DE GIGGENBACH .....	36
FIGURA 26 GEOTERMÓMETRO DE SÍLICE.....	37
FIGURA 27 DIAGRAMA STIFF (MUESTRA 101-NI).....	38
FIGURA 28 DIAGRAMA STIFF (MUESTRA 110-NI).....	38
FIGURA 29 DIAGRAMA STIFF (MUESTRA 113-NI).....	38
FIGURA 30 DIAGRAMA STIFF (MUESTRA 105-FN) .....	43
FIGURA 31 DIAGRAMA STIFF (MUESTRA 107-FN) .....	43
FIGURA 32 DIAGRAMA STIFF (MUESTRA 120-FN) .....	43
FIGURA 33 DIAGRAMA CLORUROS-MAGNESIO (FUENTES NATURALES) .....	48
FIGURA 34 DIAGRAMA CLORUROS-TEMPERATURA (FUENTES NATURALES) .....	48
FIGURA 35 DIAGRAMA SODIO-POTASIO (FUENTES NATURALES) .....	49
FIGURA 36 DIAGRAMA SODIO-POTASIO (MANIFESTACIONES TERMALES).....	49
FIGURA 37 DIAGRAMA 18O-CLORUROS (MANIFESTACIONES TERMALES) .....	50

FIGURA 38 DIAGRAMA 18O-MAGNESIO .....	50
FIGURA 39 DIAGRAMA 18O-TEMPERATURA (MANIFESTACIONES TERMALES) .....	51
FIGURA 40 DIAGRAMA RB-CS-LI (MANIFESTACIONES TERMALES) .....	51

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SEGÚN ION PREDOMINANTE .....	8
TABLA 2 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SEGÚN PH .....	9
TABLA 3 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SEGÚN LA DUREZA .....	9
TABLA 4 TIPOS DE GEOTERMÓMETROS .....	13
TABLA 5 TIPO DE FUENTE Y USO .....	20
TABLA 6 FUENTES NATURALES MUESTREADAS .....	20
TABLA 7 MANIFESTACIONES TERMALES MUESTREADAS .....	21
TABLA 8 AGUAS SULFATADAS-FUENTES NATURALES .....	24
TABLA 9 AGUAS CLORURADAS-FUENTES NATURALES .....	25
TABLA 10 AGUAS BICARBONATADAS-FUENTES NATURALES .....	26
TABLA 11 AGUAS DE MEZCLA-FUENTES NATURALES .....	26
TABLA 12 CLASIFICACIÓN SEGÚN ION PREDOMINANTE-MANIFESTACIONES TERMALES .....	31
TABLA 13 GEOTERMÓMETROS CALCULADOS .....	37
TABLA 14 CLASIFICACIÓN SEGÚN PH (FUENTES NATURALES) .....	39
TABLA 15 CLASIFICACIÓN SEGÚN PH (MANIFESTACIONES TERMALES) .....	39
TABLA 16 CLASIFICACIÓN SEGÚN DUREZA (FUENTES NATURALES) .....	40
TABLA 17 PARÁMETROS FÍSICOS (FUENTES NATURALES) .....	41
TABLA 18 PRINCIPALES CATIONES (FUENTES NATURALES) .....	41
TABLA 19 PRINCIPALES ANIONES (FUENTES NATURALES) .....	42
TABLA 20 OTROS PARÁMETROS MONITOREADOS .....	42
TABLA 21 CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES NATURALES .....	44
TABLA 22 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS (MANIFESTACIONES TERMALES) .....	45
TABLA 23 FUENTES DE AGUA POTABLE QUE NO CUMPLE LA NORMATIVA .....	45

## RESUMEN

El área de estudio corresponde a una zona volcánica en el nor-occidente de Nicaragua, en la cual el Gobierno quiere desarrollar un proyecto geotérmico para aprovechar el recurso natural. Esta zona no había sido estudiada de manera holística, por lo que se han realizado diversas campañas para estudio geo-científicos. Una de las campañas consistió en un muestreo hidrogeoquímico de las fuentes naturales y las manifestaciones termales que se tienen identificadas.

Con dichos análisis se procedió a la caracterización de las muestras para definir el tipo de agua y el origen de ellas. Las fuentes naturales se clasificaron de acuerdo a su uso y las que son destinadas para agua potable se compararon los parámetros establecidos por la CAPRE y OMS, con el fin de determinar los contaminantes presentes en las fuentes. También se clasificaron de acuerdo al ion predominante, el pH y la dureza.

Las muestras catalogadas como manifestaciones termales fueron analizadas y clasificadas de acuerdo al ion predominante, luego de tener la clasificación se seleccionaron las muestras más representativas para el cálculo de geotermómetros y poder estimar el potencial del recurso.

Con los resultados obtenidos se obtuvo que la mayoría de las manifestaciones termales tienen influencia meteórica y del agua de mar, por lo que la concentración de iones como el magnesio aumenta. La temperatura estimada es menor a 200°C, lo cual es una temperatura baja para aprovechamiento geotérmico (energía geotérmica).

Es necesario realizar mayores estudios superficiales y ampliar las zonas de muestreo, para así poder caracterizar la mayor área posible antes de realizar alguna campaña de perforación.

## INTRODUCCION

El agua geotérmica contiene una gran variedad y concentración de componentes disueltos que lo convierten en un muy buen prospecto para diferentes aplicaciones de uso directo o indirecto así como de alta o baja temperatura. Muchas veces se tiene interacción de agua geotérmica con fuentes naturales que son destinadas al consumo humano, es por ello que la calidad del agua juega un papel importante en la clasificación del está para diferentes aplicaciones o requerimientos específicos. Los parámetros químicos más simples citados frecuentemente para caracterizar las aguas son los sólidos disueltos totales (TDS) que dan una medida de la cantidad de sales químicas disueltas en el agua y el pH que es una medida de la acidez o alcalinidad de las aguas (Wright, 1991). El sulfato es una especie más importante en las aguas subterráneas que en las aguas superficiales, ya que es indicador cuando el agua está teniendo alguna interacción con fuentes termales.

Otro parámetro importante a tener en cuenta es la concentración de elementos tóxicos en agua. Cuando hay interacción de aguas geotérmicas con aguas naturales, es de esperarse altas concentraciones de Boro y Arsénico, este último es un elemento muy nocivo para la salud de los humanos. Es por ella que caracterizar las fuentes de agua en zonas de interés geotérmico es de gran utilidad porque así se tiene idea de los procesos de mezcla que hay y cuales fuentes no son aptas para el consumo humano.

Nicaragua es un país dotado de un importante potencial geotérmico, el cual está íntimamente ligado a la presencia en su territorio de la cordillera volcánica activa que se extiende a lo largo de la costa del Pacífico. La Cadena Volcánica de Los Maribios consiste de volcanes activos, algunos lagos, estructuras volcánicas y áreas extensivas de actividad hidrotermal, denota una fuente de calor magmática profunda. Los primeros estudios relacionados con el aprovechamiento de la energía geotérmica del país se iniciaron a finales de los años 60, y luego tomaron mayor impulso a partir del año 1973. Así mismo, Nicaragua posee abundantes recursos hídricos. Alrededor del 10% de su territorio se compone de aguas superficiales pero, a largo plazo, este recurso podría estar disminuyendo debido a la deforestación indiscriminada. Además, ha habido una contaminación significativa de estos recursos como resultado de actividades humanas, principalmente actividades industriales hasta el punto en que muchos acuíferos poco profundos han sido afectados; Este es un problema muy importante que debe abordarse.

Una de las metas del Gobierno de Nicaragua es la de explorar el aprovechamiento en mayor medida las fuentes de energía geotérmica, con este fin las entidades pertinentes llevan a cabo investigaciones geo-científicas en áreas de potenciales recursos geotérmicos. El objetivo del presente trabajo es estudiar las características químicas del agua superficial y geotérmica para determinar su calidad fuente de agua potable y el potencial del recurso geotérmico respectivamente. La composición química del agua es muy importante para evaluar su calidad y sus posibles usos, así como para detectar la presencia de contaminantes y determinar el tratamiento adecuado para usos posteriores. En Nicaragua se han realizado estudios para determinar la caracterización geoquímica del agua en diversos campos geotérmicos (CNE, 2001).

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Evaluar geoquímicamente las fuentes de aguas naturales con el fin de determinar los tipos de agua presentes y conocer la influencia que tiene el recurso geotérmico en dichas fuentes. Poder estimar el potencial de la fuente de calor mediante los geotermómetros químicos y definir el tipo de aprovechamiento del recurso geotérmico.

## JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.

Nicaragua, con tanto potencial geotérmico sin ser estudiada, ni explorada, se ha propuesto la meta de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aumentar el porcentaje de generación a través de energías renovables para modificar la matriz energética. Para lograr dicho objetivo es necesario caracterizar las fuentes de aguas superficiales en las zonas donde hay manifestaciones termales y así tener una visión preliminar del tipo de sistema geotérmico que hay y las características tales como temperatura y composición química.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

- Caracterizar geoquímicamente y ambientalmente las aguas de las fuentes naturales y manifestaciones termales de un área de interés geotérmico en el Nor-Occidente de Nicaragua.

### Objetivos Específicos

- Determinar la composición química de los fluidos para obtener información del tipo de agua
- Clasificar las aguas a través de los diagramas de Piper, Ternarios y Stiff.
- Estimar temperaturas del sistema mediante el uso de geotermómetros
- Relacionar la calidad de las fuentes de agua con la normativa para uso del recurso hídrico
- Determinar la influencia que tiene el recurso geotérmico potencial en la calidad de las fuentes de agua.

## MARCO TEORICO

### Clasificación de las aguas

El agua se puede clasificar en diversas categorías, teniendo en cuenta su composición química, en dependencia, del método que se utilice (salinización, SULIN, pH e iones predominantes) y de las propiedades (físicas o químicas) o características de la muestra de agua que se analice (Ramirez & Rodriguez, 2009).

### Según iones predominantes

Otra clasificación de las aguas es atendiendo a los iones predominantes en la muestra. Es una de las clasificaciones más usada en la industria del petróleo para identificar modelos de aguas. En este método como primer paso, se separan los aniones y cationes con sus respectivos valores, como se muestra en el siguiente ejemplo:

Tabla 1 Clasificación de las Aguas según Ion Predominante

Aniones	Cationes
Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ )	Sodio ( $\text{Na}^+$ )
Carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ )	Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )
Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )	Potasio ( $\text{K}^+$ )
Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ )

#### Aguas Cloruradas Sódicas

Aguas circulando en profundidades, las sales disueltas en estas aguas son principalmente cloruro de sodio y cloruro de potasio, sin embargo en aguas más concentradas pueden existir apreciables concentraciones de calcio. Las aguas también contienen alto contenido de sílice y usualmente concentraciones significativas de sulfato, bicarbonato, fluoruro, amonio, arsénico, litio, rubidio, cesio y ácido bórico. La relación cloruro/sulfato es usualmente alta y el rango de pH va de moderadamente ácido a moderadamente alcalino (pH 5-9). Los gases disueltos principales son dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno. Las aguas a menudo ocurren en áreas con manantiales en ebullición y actividad de geysir y son comunes para muchas áreas geotérmicas en desarrollo tanto en rocas volcánicas y sedimentarias.

#### Aguas ácidas sulfatadas

Aguas ácidas, bajo contenido de cloruro, pueden ser formadas en áreas geotérmicas volcánicas donde el vapor por debajo de los 400° se condensa en las aguas superficiales. El sulfuro de hidrogeno del vapor es subsecuentemente oxidado a sulfato. Las aguas ácido sulfatadas son encontradas en áreas donde el vapor sube desde el agua subterránea de alta temperatura y en áreas volcánicas donde en etapas de enfriamiento de volcánico solo dióxido de carbono y gases de sulfuro permanecen en el vapor que sube a través de la roca. Los constituyentes presentes en las aguas son principalmente lixiviados de las rocas. Debido a su naturaleza generalmente superficial, su significado geoquímico es usualmente menor en investigaciones de trabajo.

#### Aguas Bicarbonatadas Sódicas

Aguas ricas en bicarbonatos son originadas ya sea por la disolución de  $\text{CO}_2$  o por la condensación de vapor geotérmico en aguas subterráneas libre de oxígeno relativamente profundas. Debido a la ausencia de oxígeno se evita la oxidación de  $\text{H}_2\text{S}$ , la acidez de estas soluciones es debida a la disociación de  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . A pesar de ser un ácido débil convierte los feldspatos y arcillas, generando soluciones acuosas neutrales, las cuales son ricas típicamente en sodio y bicarbonato, particularmente a temperatura media-alta. De hecho:

- La baja solubilidad de la calcita previene que las soluciones acuosas aumenten su contenido en calcio.
- Potasio y magnesio se fijan en arcillas y cloritas, respectivamente;
- Concentración de sulfato está limitada por la baja solubilidad de la anhidrita.

Las aguas bicarbonatadas sódicas se encuentran generalmente en la "zona de condensación de los sistemas de "vapor dominante" y en las zonas marginales en sistemas de líquido-dominante. Sin embargo, aguas de bicarbonato de sodio también están presentes en los yacimientos geotérmicos profundos alojados en rocas metamórficas y / o sedimentarias (por ejemplo Kizildere, Turquía).

### Aguas ácidas sulfatadas-cloruradas

Estas aguas pueden formarse por muchos procesos, tales como:

- Mezcla de aguas cloruradas y sulfatadas a diferentes profundidades.
- Condensación cerca de la superficie de gases volcánicos en aguas meteóricas.
- Condensación de vapor magmático en las profundidades.
- Paso de fluidos clorurados a través de secuencias sulfato- soportes (ej. Evaporitas) o litologías que contengan sulfuro nativo.

Estas aguas tienen pH típicos de 2-5, con cloruro y sulfato en proporciones iguales aproximadamente. Las aguas formadas por los procesos (c) y (d) pueden ser identificadas por altas concentraciones de Cl, SO<sub>4</sub> y alto fluoruro.

Según el pH

El pH de una muestra de agua proporciona otra clasificación de la misma, este no es más que la concentración de iones de hidrogeno (H<sup>+</sup>) presente en la muestra.

Tabla 2 Clasificación de las Aguas según pH

<b>Clasificación</b>	<b>Nivel de pH</b>
Fuertemente ácida	<3.5
Ácida	3.5<X<5.5
Débilmente ácida	5.5<X<6.8
Neutra	6.8<X<7.2
Débilmente neutra	7.2<X<8.5
Básica	>8.5

Según la Dureza

La dureza del aguase define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, expresadas como CaCO<sub>3</sub> en mg/L. El rango de dureza varía entre 0 y cientos de mg/L, dependiendo de la fuente de agua y el tratamiento a que haya sido sometida.

Existen dos tipos de dureza:

- Dureza temporal: está determinada por el contenido de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. Puede ser eliminada por ebullición del agua y posterior eliminación de precipitados por filtración.
- Dureza permanente: está determinada por todas las sales de calcio y magnesio excepto carbonatos y bicarbonatos. No puede ser eliminada por ebullición.

Así que la dureza total equivale a la suma de la dureza temporal más la dureza permanente, según esa dureza las aguas se clasifican en:

Tabla 3 Clasificación de las Aguas según la Dureza

<b>Dureza como mg/L CaCO<sub>3</sub></b>	<b>Clasificación</b>
0-75	Agua Blanda
75-150	Agua Poco Dura
150-300 (límite para agua potable)	Agua Dura
>300	Agua Muy Dura

## Diagramas de Clasificación de las aguas

La clasificación de las aguas es esencial para una correcta utilización de las técnicas geoquímicas, existen diferentes tipos de diagramas empleados en la clasificación, a continuación se detalla algunos de ellos:

### Diagrama de Piper

El diagrama de Piper está formado por dos triángulos equiláteros donde se representan los cationes y aniones mayoritarios y un rombo en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes, este diagrama permite representar muchos análisis sin dar origen a confusiones. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (Custodio 1965).

Las concentraciones de los iones dadas en meq/l se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ ) y tres cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ). A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. En la siguiente figura se muestra el esquema del diagrama Piper:

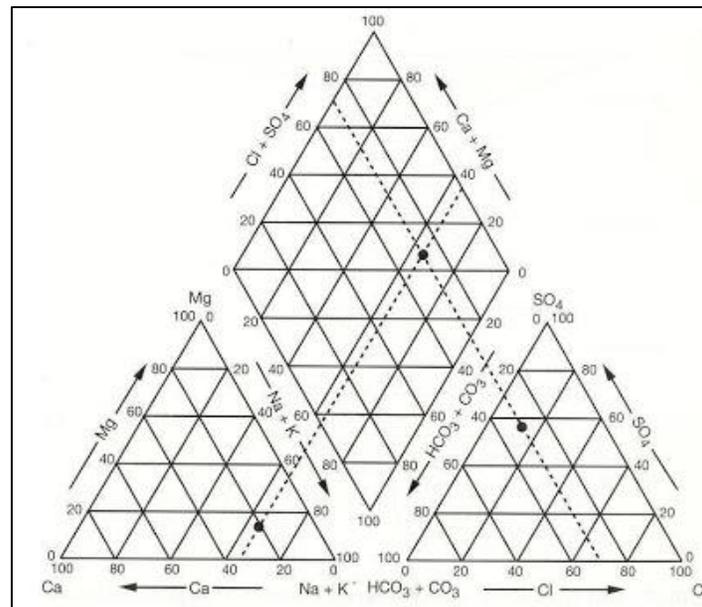


Figura 1 Esquema del Diagrama de PIPER

Este diagrama es muy utilizado porque ayuda a:

- Visualizar la evolución geoquímica de las aguas subterráneas.
- Detectar procesos como intercambio catiónico.
- Detectar mezclas entre dos tipos de agua.
- Detectar procesos de dilución o precipitación de especies iónicas.
- Junto con la cartografía y localización de los puntos de muestreo permite validar o lanzar hipótesis de la localización de la zona de recarga de los acuíferos.

A continuación se presentan casos tipos de agua, su clasificación y los procesos o rocas relacionadas con las mismas.

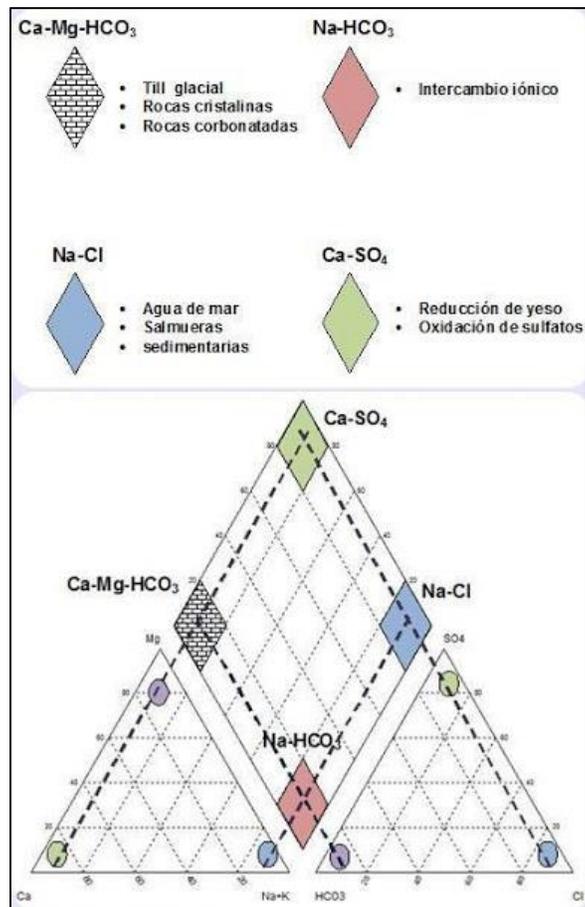


Figura 2 Tipos de Agua de acuerdo a PIPER

### Diagrama STIFF

Este diagrama está compuesto por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na<sup>+</sup> se confronta con el Cl<sup>-</sup>, el Ca<sup>+2</sup> con el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y el Mg<sup>+2</sup> con el SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> (a veces también se pueden mostrar otros dos iones, como el Fe<sup>+2</sup> contra el NO<sub>3</sub>). Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/l.

Dos características sobresalen en este tipo de diagrama: por un lado permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica), en la figura siguiente se muestran algunas apreciaciones de este diagrama que caracterizan varios tipos de aguas.

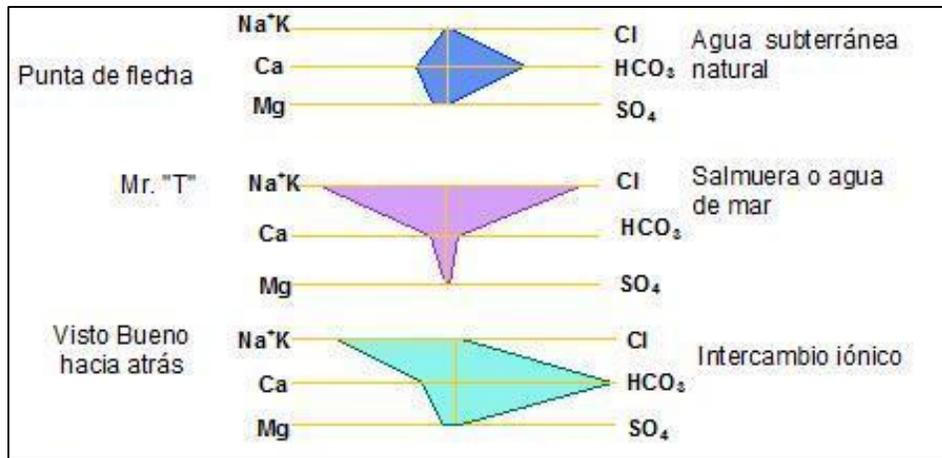


Figura 3 Tipos de Agua según STIFF

### Diagrama Triangulares

#### Diagrama CI-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>

El diagrama ternario CI-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> es una de los esquemas de clasificación de las aguas naturales (Giggenbach, 1991). La posición de un punto de datos en el diagrama triangular se obtiene evaluando primero con la suma S de las concentraciones Ci (en mg / kg) de los tres componentes implicados:

$$S = C_{Cl} + C_{SO_4} + C_{HCO_3}$$

A partir de la suma (S), se obtienen los porcentajes de Cl y HCO<sub>3</sub>, entonces  $D = \% HCO_3 + 0.5 \% Cl$  es calculado. El % Cl y D se representan como ejes Y y X, respectivamente.

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 geo-indicadores comprenden las aguas neutrales con bajo sulfato, alto cloruro "aguas geotérmicas" a lo largo del eje de Cl-HCO<sub>3</sub>, cerca de la esquina del Cl, nombradas aguas maduras.

El Diagrama CI-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> puede ser utilizado para clasificar aguas geotérmicas especialmente y para eliminar aguas no adecuadas para técnicas geoquímicas.

### Diagramas Binarios

Representan la variación de cualquier parámetro con el tiempo en un punto determinado. Permiten visualizar la variación de varios parámetros con respecto a otro. Por ejemplo, el Ca, Na, K, Mg, HCO<sub>3</sub>, B, SO<sub>4</sub> comparados con el Cl. Estos gráficos en conjunto permiten visualizar los efectos de interacción agua roca, mezcla de diferentes tipos de agua (agua dulce - agua de mar).

## Geotermómetros

Los Geotermómetros o termómetros geoquímicos se utilizan para estimar la temperatura del subsuelo de los yacimientos geotérmicos. Hay principalmente tres categorías: geotermómetros soluto, de gas y de isótopos. Los Geotermómetros de soluto pueden ser ampliamente clasificados en dos grupos: (1) los que se basan en variaciones dependientes de temperaturas y en la solubilidad de los minerales individuales, y (2) los que se basan en reacciones de intercambio iónico dependientes de la temperatura que fijan proporciones de ciertos constituyentes disueltos (Fournier, 1991).

Tabla 4 Tipos de Geotermómetros

Geotermómetro	Abreviación	Ecuación	Restricciones
a. Cuarzo sin pérdida de vapor	TQC	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1309}{5.19 - \text{Log SiO}_2} - 273.15$	t = 0 -250 °C
b. Cuarzo con máxima pérdida de vapor	TQA	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1522}{5.75 - \text{Log SiO}_2} - 273.15$	t = 0 -250 °C
c. Calcedonia	TCH	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1032}{4.69 - \text{Log SiO}_2} - 273.15$	t = 0 -250 °C
d. Sílice amorfa	TAM	$t^{\circ}\text{C} = \frac{731}{4.52 - \text{Log SiO}_2} - 273.15$	t = 0 -250 °C
e. Na/K (Fournier, 1979)	TNAK-F	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1217}{\log(\text{Na}/\text{K}) + 1.483} - 273.15$	t >250 °C
f. Na/K (Truesdell, 1976)	TNAK-WE	$t^{\circ}\text{C} = \frac{855.6}{\log(\text{Na}/\text{K}) + 0.8573} - 273.15$	t >250 °C
g. Na-K-Ca (Fournier and Truesdell 1973)	TNAKCa	$t^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{\log(\text{Na}/\text{K}) + \beta \left[ \log \left( \sqrt{\text{Ca}/\text{Na}} \right) + 2.06 \right] + 2.47} - 273.15$	t >250 °C

### Geotermómetros de Sílice.

El geotermómetro de cuarzo trabaja mejor para aguas en el rango de temperatura superficial de 120-150 °C. Con temperaturas más altas al inicio, es probable que la sílice se precipite durante el ascenso. Con temperaturas más bajas otras especies de sílice tales como la calcedonia, cristobalita o sílice amorfa pueden controlar la disolución de la sílice (Arnórsson, 1975).

### Geotermómetros de Cationes.

Se basan en la dependencia de la temperatura en el intercambio de iones o de partición de los álcalis entre las soluciones y las fases sólidas. Las proporciones de constituyentes disueltos cambian con el cambio de la temperatura de equilibrio.

## METODOLOGIA

### Recopilación de la Información

Se recopiló la información referente a los trabajos de investigación realizados en campo, los análisis de laboratorio de las muestras. A pesar que la información fue proporcionada, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos al momento de realizar el muestreo:

La mejor estrategia para la toma de muestras de aguas consiste en recoger un número razonable de muestras de las fuentes de agua, distribuidas por toda el área de estudio. De ser posible el levantamiento hidrogeoquímico debe llevarse a cabo al final de la estación seca, para obtener muestras de agua menos afectados por la mezcla con el agua de superficie (lluvia). Se debe garantizar la calidad del muestreo ya que malas técnicas de muestreo conllevan a datos erróneos, por lo tanto es importante que todos los equipos y materiales de muestreo se hayan verificado varios días antes de realizar la campaña de muestreo.

### Clasificación de las Aguas

Existen diversos gráficos que se utilizan para la clasificación de las aguas, en el presente informe se realizará la evaluación mediante los siguientes diagramas principalmente:

- Diagrama de PIPER
- Diagrama Stiff
- Diagrama Ternario Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>

### Cálculo de Geotermómetros

La aplicación de los geotermómetros químicos es uno de los más importantes métodos para la exploración y desarrollo de los recursos geotérmicos. Son útiles para predecir temperaturas de superficies y en el reservorio durante la explotación. En este informe se utilizaron geotermómetros químicos, sílice y cationes principales.

## ANÁLISIS DE DATOS.

### Mapa de la zona y muestreo

En la siguiente figura se presenta un esquema de la zona con las fuentes que fueron muestreadas, por razones de confidencialidad no se puede detallar más datos en el mapa.

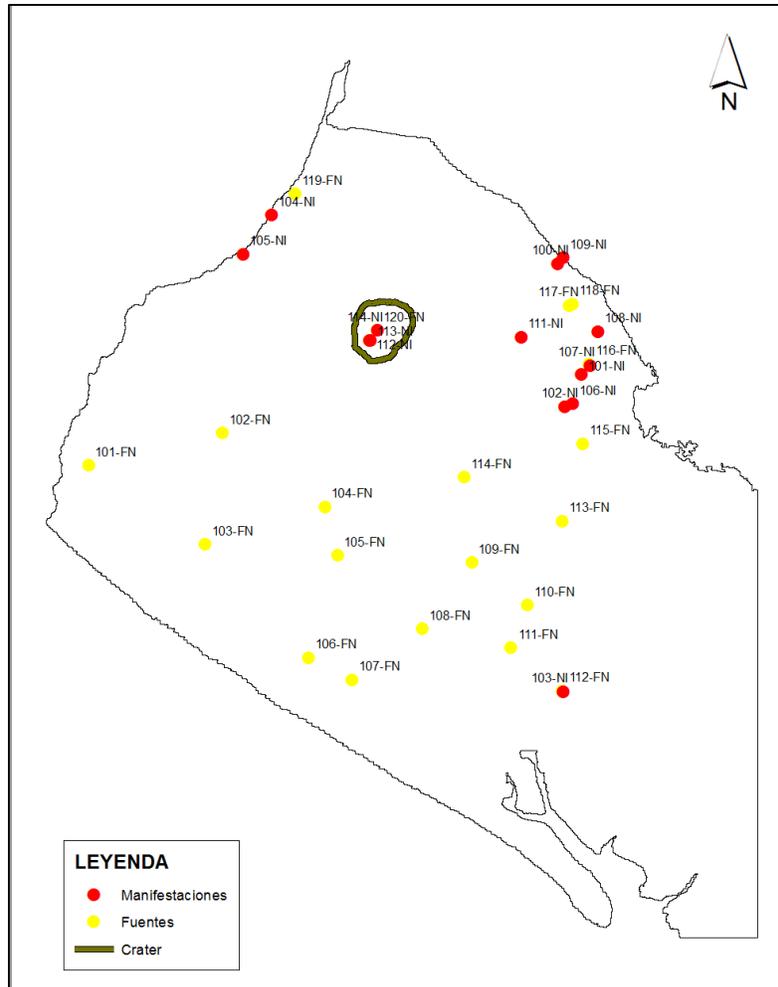


Figura 4 Puntos de monitoreo en zona de estudio

### Geología de la Zona

Nicaragua se encuentra geológicamente hablando, a lo largo del borde occidental de la placa continental del Caribe, la cual está rodeada al Oeste y Suroeste por las placas oceánicas de Cocos y de Nazca, y al Sureste, por la placa continental Sudamericana. La historia geológica y tectónica de Nicaragua ha estado estrechamente relacionada con la evolución geodinámica del margen continental del pacífico, el cual actualmente está caracterizado por la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe a una velocidad de 73-90 mm año<sup>-1</sup> (Dixon 1993; DeMets 2001). El Área de estudio se sitúa en el Nor-Occidente de Nicaragua, por motivos de confidencialidad no se puede detallar el nombre del lugar, ni de los puntos muestreados así como el nombre de la estructura volcánica.

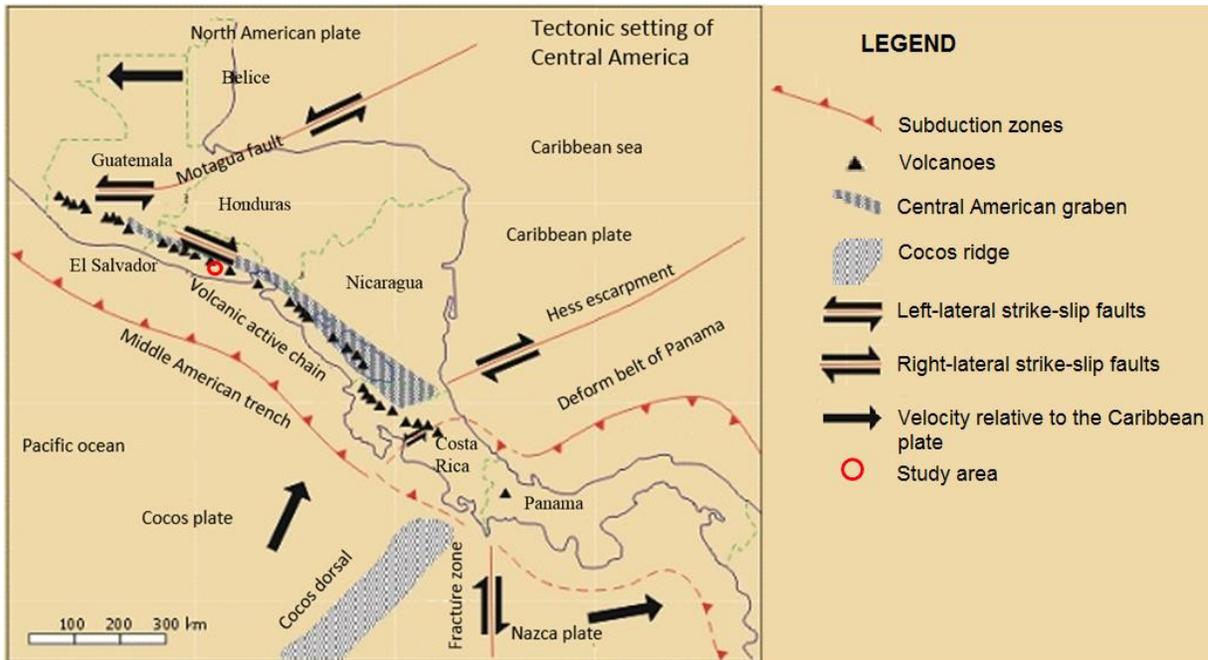


Figura 5 Tectónica Regional para Centroamérica

#### Vulcanismo Cuaternario

El frente volcánico nicaragüense se encuentra compuesto por aproximadamente 40 volcanes con actividad Cuaternaria, los cuales han rellenado la Depresión de Nicaragua y son parte del Frente Volcánico Activo (FVAC). Según de Vries B (1993), los volcanes Cuaternarios presentan diferencias geoquímicas y petrológicas en función del tipo de edificio volcánico, siendo posible agruparlos dentro de tres tipos: volcanes escudos, estratovolcanes y complejos ignimbríticos.

#### Basamento del Área (Grupo Coyol)

Está compuesto principalmente por basaltos ricos en olivinos, lavas andesítica e ignimbritas de composición andesítica y dacítica. Estas rocas son atribuidas al Grupo Coyol (Oligoceno Tardío-Plioceno Temprano). Estas lavas presentan abundante meteorización evidenciado por la presencia de minerales oxidados y dendritas de manganeso en las zonas superficiales. En general las rocas corresponden a lavas basáltico-andesíticas, densas y de grano fino, con cristales de plagioclasa y piroxenos.

Por otro lado una secuencia de ignimbritas de color grisáceo con una potencia de hasta 3 m aflora discordantemente bajo depósitos laháricos rojizos, la zona basal de estas rocas no está expuesta en esta área. De acuerdo a Hradecký et al. (2001), estas rocas formarían parte de las zonas superiores del Grupo Coyol, sin embargo no se descarta que estas rocas puedan ser parte de productos volcánicos asociados a la formación del volcán.

Una parte de las manifestaciones termales reportadas, emanan desde las rocas asociadas al Grupo Coyol, esto debido al intenso fallamiento y fracturamiento al que está expuesta esta área. Es importante tener en cuenta que las rocas asociadas al Grupo Coyol podrían almacenar un posible reservorio del sistema hidrotermal que alimenta las manifestaciones termales en esta zona.

### Depósitos Pre-Volcánicos

Se refiere a las lavas y flujos piroclásticos que forman los depósitos asociados al volcanismo que antecede a la estructura del volcán. Dentro de estos depósitos resaltan los diques máficos, los conos escoriáceos, la estructura tipo Maar y las secuencias piroclásticas expuestas en los farallones.

### Diques

Aflora un potente dique de composición andesítica-basáltica que alcanza un espesor de hasta 1.5 m y puede ser trazado por más de 3km según datos morfológicos. La roca tiene un grano mediano, color gris oscuro y posee fenocristales pequeños de plagioclasa.

### Volcán de la Ladera Este

Es una estructura volcánica, profundamente erosionada que aflora en la ladera Este del volcán, se le interpreta como restos de un volcán de edad probablemente Pleistoceno dado los contactos litológicos de sus productos, sin embargo no existen dataciones radiométricas disponibles para estas rocas. Las lavas documentadas ubicadas cerca del borde Sur de este cuerpo volcánico, presentan grano grueso, textura porfídica con fenocristales de plagioclasa de tamaño variable entre 1 y 3 mm, y xenolitos de rocas de color gris claro; mientras que en el lado Norte de este macizo, los autores documentan abundantes flujos piroclásticos bien soldados con abundantes clastos de composición basáltica que afloran en las secuencias más profundas.

### Cresta Montosa

Es evidente la existencia de un alto topográfico arqueado justo al Oeste del cráter principal del volcán. Esta muralla representaría el borde de colapso del volcán que antecede a la actual estructura volcánica, de manera tal que las lavas y flujos piroclásticos que construyen el actual volcán habrían rellenado gran parte del paleo-cráter representado por la cresta Montosa. Esta cresta se curva tanto en sus márgenes Sur y Norte, llegando a desaparecer en sus extremos hacia el Este.

### Centros Parásitos

- El Maar, es una estructura concéntrica menor, ubicada en la falda Noreste del volcán. Su diámetro alcanza los 2km. De acuerdo a las observaciones de terreno esta estructura se compone de material juvenil rico en líticos y de posible composición basáltica a andesítica.
- Los Cerros Chachos corresponden a dos cerros cónicos localizados a 4 km al Sur del volcán. Estos cerros se componen por secuencias de lavas basálticas escoriáceas muy densas y duras, y se encuentran parcialmente cubiertas por depósitos escoriáceos de la última erupción.

### Rocas Volcánicas asociadas al Volcán reciente

Luego de la actividad volcánica relacionada con la formación de la Cresta Montosa, el volcán del lado Este y los centros parásitos, un periodo de eventos más explosivos parece haber ocurrido. La actividad volcánica explosiva dentro del área ha estado dominada por la

actividad del propio cráter principal, pudiéndose apreciar las diferentes facies volcánicas proximales (lavas y auto brechas) y distales (flujos piroclásticos, depósitos de caída y lahares) asociados a este volcán.

#### -Cráter Volcánico reciente

Es un estratovolcán andesítico. Su cráter elíptico, con ejes mayores y menores de 2 y 2,4 km de diámetro respectivamente, tiene cerca de 700 m de profundidad y contiene una laguna de color esmeralda a una altitud de 170 m.s.n.m. Las paredes expuestas del cráter indican que la parte central del volcán está compuesta principalmente por una alternancia de flujos de lava, capas de escoria y posiblemente depósitos piroclásticos. Los flujos parecen bastantes regulares y pareciera que no existen diques o cuerpo intrusivos que corten estas secuencias. Entre la porción Sur y Oeste de las paredes del cráter, se aprecian las zonas con mayor alteración hidrotermal, lo que coincide tanto con la existencia de manifestaciones termales activas en el borde Sur de la laguna cratérica, como con las zonas visiblemente más afectadas por remociones y fracturamiento.

#### -Secuencia Volcánicas Distales

Contrastando con lo expuesto en la parte central del volcán, los márgenes distales de volcán, expuestos a lo largo de los farellones costeros al Oeste de la península, muestran cerca de 80m de intercalaciones de flujos piroclásticos, escorias, pómez, tobas y evidencias de paleosuelos.

#### -Secuencia Volcánica Medias

La gran mayoría de las rocas que cubren el área de interés, corresponden a las secuencias volcánicas medias y distales (ej. flujos piroclásticos, escorias, pómez, tobas) asociadas a la última erupción.

### Hidrología de la Zona

De acuerdo a los datos presentados en el estudio de caracterización hidrogeoquímica se sabe que la hidrología del área de estudio está compuesta por una laguna en el cráter, acuíferos colgantes discontinuos en las laderas del volcán y un acuífero más extenso, aunque probablemente un tanto discontinuo, que se extiende por debajo del nivel del mar.

La laguna del cráter contiene una mezcla de agua meteórica y geotermal y no está conectado con otras partes del sistema de agua subterránea de poca profundidad. Existe, sin embargo, un influjo geotermal hacia la laguna que ha sido observado dentro del cráter.

El acuífero regional (o más extenso) puede estar estructuralmente controlado con el flujo de agua subterránea por un buzamiento desde el Noroeste hacia el área de descarga de humedales en el Sureste, llevando agua fría como caliente.

La recarga del acuífero es probablemente más significativa de lo que indican estudios previos, dado que la evapotranspiración real es considerablemente menor que la evapotranspiración potencial debido a los altos déficits de humedad de suelos durante la estación seca. La salida de agua subterránea en el Sureste del área es más extensa de lo que se había reconocido previamente, con flujos considerables que persisten a lo largo de la estación seca.

Aguas frías y calientes descargan en la misma área al borde y dentro de una extensa área de humedales. Por lo que es de esperarse que haya mezcla entre el agua marina y el agua natural. El siguiente mapa muestra un esquema de la red de drenajes, se observa que donde están la mayoría de las manifestaciones termales hay mayor densidad de drenaje por lo que se infiere que hay mezcla con el agua meteórica.

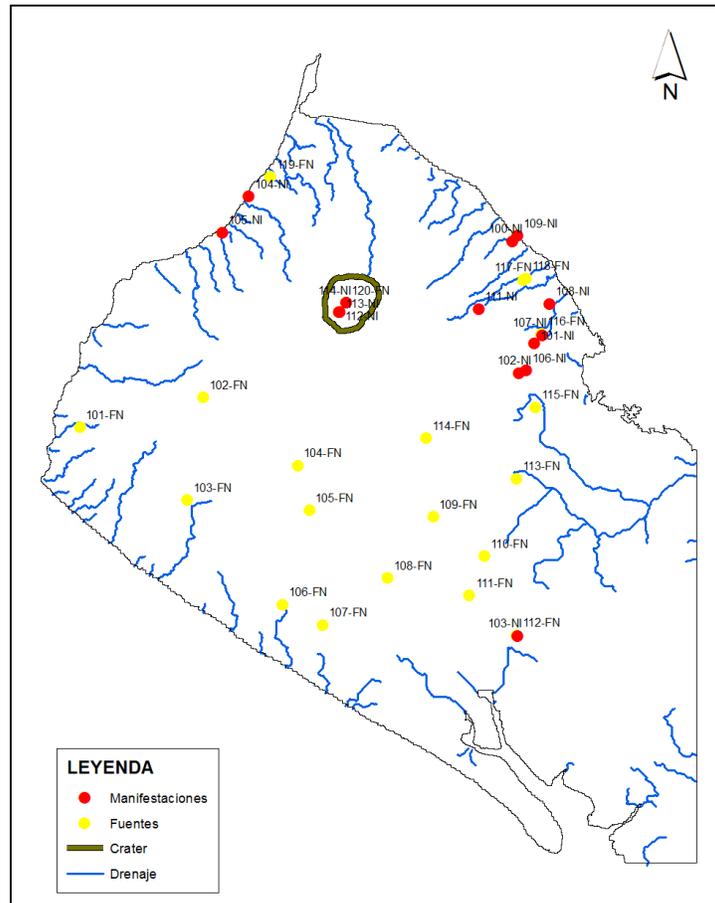


Figura 6 Densidad de Drenaje

Si se llevara a cabo un proyecto geotérmico en la zona que se tiene identificada como de potencial geotérmico (al este del cráter del volcán), es necesario que se tenga en cuenta los riesgos por inundaciones y deslizamientos al momento de definir los puntos para perforar.

#### Muestras analizadas

Las muestras analizadas corresponden a diversas fuentes de agua en la zona de interés geotérmico, veinte (20) muestras son de fuentes de abastecimiento para agua potable o de uso agrícola (muestras con código FN). Mientras quince (15) muestras corresponden a las manifestaciones termales que se tienen detectadas en la zona (Muestras con código NI), en el caso de las manifestaciones también se tomó muestra del agua de mar para tener de referencia.

Se clasificaron de acuerdo al tipo de fuente y uso, de igual manera se estableció dos rangos de temperatura (mayor a 28°C y menor a 28°C) teniendo como referencia la temperatura media anual de la zona. De acuerdo a la página oficial del INETER, la temperatura media anual para la zona de occidente en Nicaragua es de 27.6°C. Para

Tabla 5 Tipo de Fuente y Uso

	Fuentes mayores a 28°C	Fuentes Menores a 28°C
▲ PP-AP>28°	Pozo Perforado para Agua Potable (PP-AP>28)	Pozo Perforado para Agua Potable (PP-AP<28)
■ PP-UA>28°		
+ MA>28°	Pozo Perforado para Uso Agrícola (PP-UA>28)	Pozo Perforado para Uso Agrícola (PP-UA<28)
● PE-AP<28°		
⊗ PE-UA<28°	Pozo Excavado para Agua Potable (PE-AP>28)	Pozo Excavado para Agua Potable (PE-AP<28)
✕ MA<28°		
● Agua_de_Mar	Pozo Excavado para Uso Agrícola (PE-UA>28)	Pozo Excavado para Uso Agrícola (PE-UA<28)
⊙ PE-AP>28°		
✱ PE-UA>28°	Manantiales (MA>28)	Manantiales (MA<28)
▼ PP-AP<28°		
□ PP-UA<28°		

En las siguientes tablas se presentan las muestras que fueron analizadas y los valores de temperatura y pH al momento de la recolección. También se muestra el tipo de fuente y uso (para algunos casos) que se les da. La muestra 120-FN fue tomada de la laguna existente en el cráter del volcán.

Tabla 6 Fuentes Naturales muestreadas

Muestra	Tipo y Uso	T°C	pH	Muestra	Tipo y Uso	T°C	pH
101-FN	PP-AP>28°C	28.96	7.46	111-FN	MA>28°C	31.06	8.01
102-FN	PP-AP>28°C	28.03	7.66	112-FN	MA>28°C	30.57	8.14
103-FN	PP-AP<28°C	27.97	7.66	113-FN	PP-AP>28°C	31.64	8.15
104-FN	PP-UA<28°C	27.47	7.98	114-FN	PP-AP>28°C	32.52	8.27
105-FN	PP-AP<28°C	27.42	7.73	115-FN	MA>28°C	36.11	8.01
106-FN	MA>28°C	28.59	7.35	116-FN	MA>28°C	35.81	8.11
107-FN	PP-AP>28°C	30.94	7	117-FN	PP-AP>28°C	37.53	7.3
108-FN	PE-UA<28°C	27.73	8.15	118-FN	PP-AP>28°C	38.66	8.25
109-FN	PE-UA>28°C	32.12	7.45	119-FN	PE-UA>28°C	38.55	7.8
110-FN	PP-UA>28°C	29.96	6.61	120-FN	MA>28°C	28.98	7.85

Se puede observar que la mayoría (16 muestras) de las fuentes naturales tienen temperaturas mayores a 28 ° C, lo cual es congruente con el área dado que está cerca del mar y con poca elevación por lo tanto las temperaturas suelen ser altas. La muestra 120-FN corresponde a una laguna presente en el cráter de la estructura volcánica y se tomó como referencia para las comparaciones. De las 19 muestras restantes, 9 son utilizadas para abastecimiento de agua potable (por medio de pozos) y 5 son utilizadas para la agricultura (mediante pozos). Las 5 muestras restantes son manantiales y afloramientos de agua que pueden tener cualquier uso por la población.

Tabla 7 Manifestaciones Termaltes muestreadas

Muestra	Tipo y Uso	T°C	pH	Muestra	Tipo y Uso	T°C	pH
100-NI	MA>28°C	32.20	7.73	108-NI	MA>28°C	39.00	7.94
101-NI	MA>28°C	42.20	7.93	109-NI	Agua de Mar	27.70	8.07
102-NI	MA>28°C	36.30	7.73	110-NI	MA>28°C	72.00	7.81
103-NI	MA>28°C	29.00	7.77	111-NI	MA>28°C	36.00	7.42
104-NI	MA>28°C	30.00	7.73	112-NI	Laguna	79.30	7.59
105-NI	Agua de Mar	29.00	8.10	113-NI	Laguna	34.90	7.83
106-NI	MA>28°C	36.40	7.67	114-NI	Laguna	29.00	8.01
107-NI	MA>28°C	36.30	7.80				

Con respecto a las muestras que fueron analizadas como manifestaciones termaltes, en su totalidad son manantiales o afloramientos mayores a 28°C, se tomaron dos muestras de agua de mar para tener como referencia. Estas muestras están ubicadas al costado este del edificio volcánico, ya que es donde hay mayor actividad termal.

#### Clasificación de las aguas según el ion dominante

El total de muestras analizadas es treinta y cinco (35), de las cuales veinte (20) corresponden a Fuentes Naturales y quince (15) Manifestaciones Termaltes. A continuación se presenta la clasificación de las aguas de acuerdo al Diagrama de PIPER y los diagramas ternarios de cationes y aniones.

Fuentes Naturales  
Diagrama de Piper

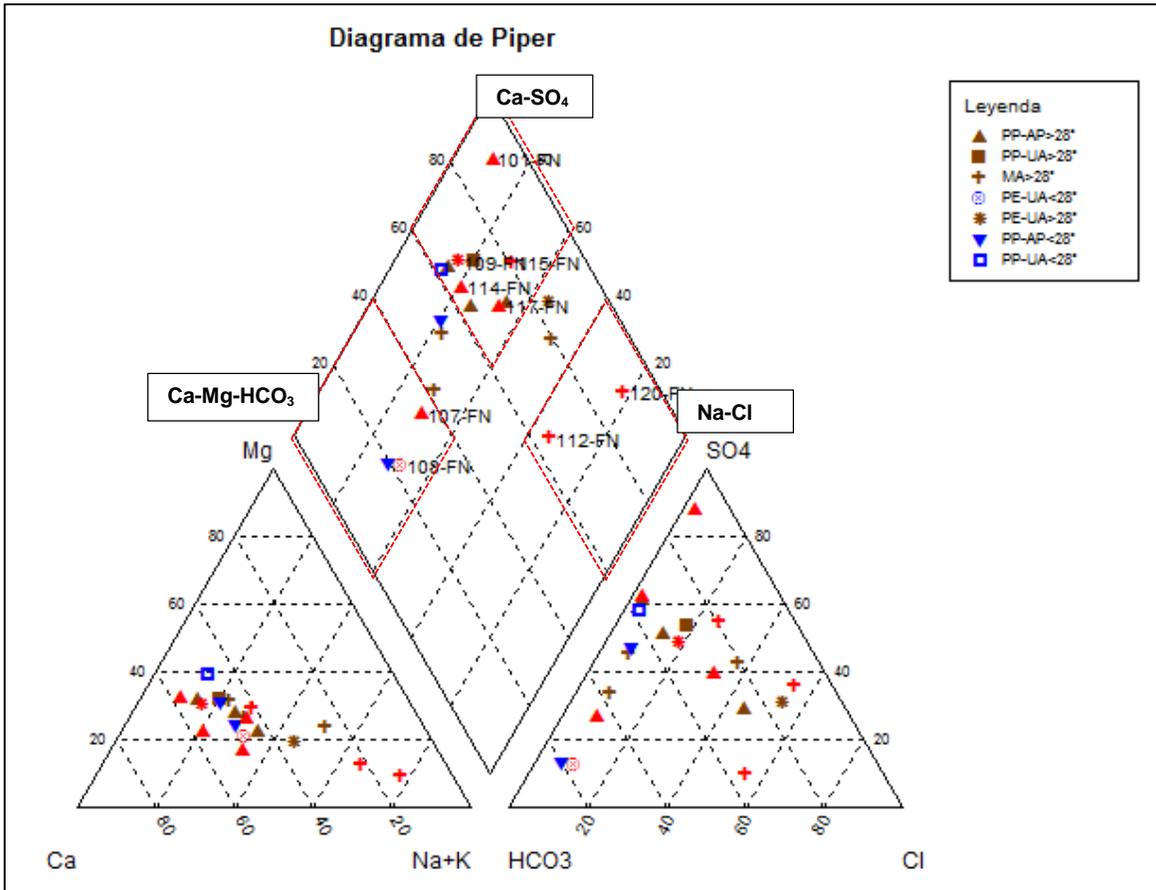


Figura 7 Diagrama de Piper Fuentes Naturales

Se observa que las mayorías de las aguas están dentro de la clasificación de Sulfatadas Cálcidas, lo cual es característico de una zona donde hay actividad geotérmica ya que las formaciones geológicas o las manifestaciones termales aportan el ion sulfato a las aguas.

Están presentes dos muestras clasificadas como Cloruradas Sódicas, pero corresponden a la muestra de la laguna cratérica (120-FN) y de un afloramiento muy cerca del mar lo cual justifica el alto contenido de Cloruros. También hay presencia de Aguas Bicarbonatadas, lo cual es agua superficial y fresca producto de la recarga meteórica que se da en la zona.

## Diagrama Ternario

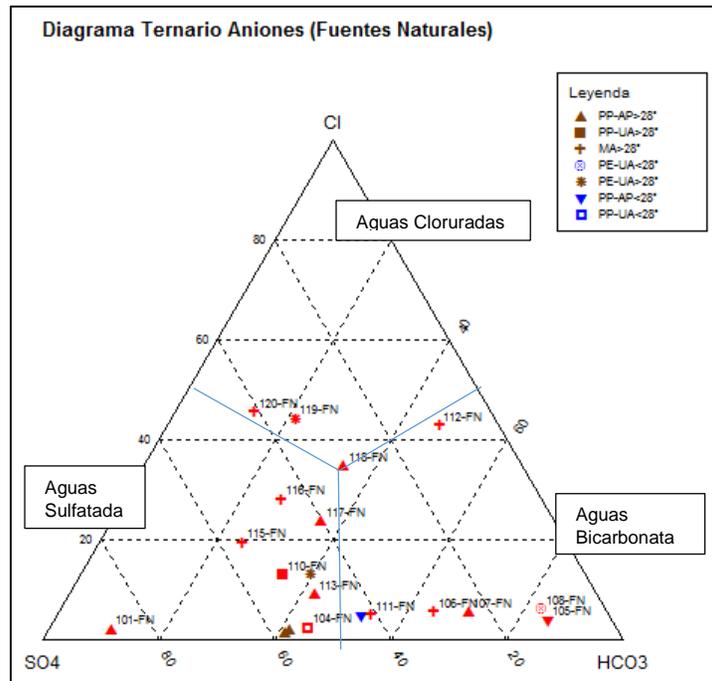


Figura 8 Diagrama Ternario Aniones

En el diagrama ternario de aniones se observa que la mayoría de las aguas son del orden sulfatadas, lo que concuerda con el diagrama de Piper antes mostrado. El segundo tipo de agua es de orden bicarbonatadas. Y al igual que en el diagrama Piper solo dos muestras están como cloruradas.

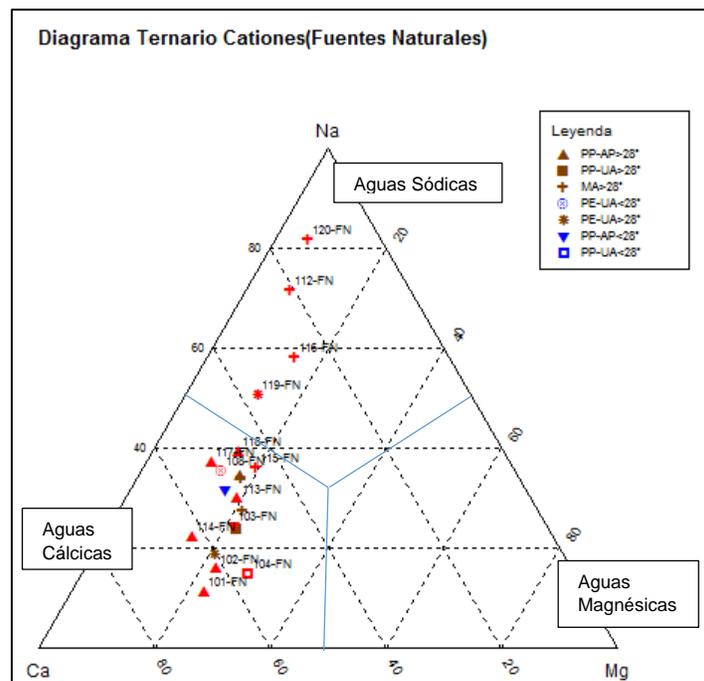


Figura 9 Diagrama Ternario Cationes

En el diagrama ternario de cationes se observa que el catión predominante es el Calcio, por lo que la mayoría de las aguas son del orden cálcicas, en menor presencia está el catión sodio y no hay presencia de aguas del orden magnésicas.

### Clasificación

#### Ca-SO<sub>4</sub> (Sulfatadas Cálcicas)

Las características de estas aguas son muy variables y dependen del origen del ion sulfato (que puede ser por oxidación de sulfatos o reducción de minerales como yeso o anhidrita), se puede generalizar que son aguas superficiales y algo frías, sin olor característico y con sabor amargo.

Tabla 8 Aguas Sulfatadas-Fuentes Naturales

101-FN	102-FN	104-FN	109-FN	110-FN	113-FN	114-FN	115-FN	117-FN	118-FN
PP-AP>28°	PP-AP>28°	PP-UA<28°	PE-UA>28°	PP-UA>28°	PP-AP>28°	PP-AP>28°	MA>28°	PP-AP>28°	PP-AP>28°

En la figura 10 se puede observar que las muestras (117-FN y 118-FN) que poseen mayor temperatura tiene el contenido de SO<sub>4</sub> más bajo, la muestra con mayor concentración de SO<sub>4</sub> (casi 800 mg/l) tiene una temperatura aproximada de 29°C lo que podría indicar que ese contenido de sulfato puede ser porque el agua transita en una zona donde existe anhidrita en la roca o pasa por una fumarola y luego se enfría conductivamente. La muestra 115-FN tiene mayor contenido de SO<sub>4</sub> y con una temperatura de 36°C podría indicar que ese contenido de SO<sub>4</sub> es por la cercanía a alguna manifestación termal.

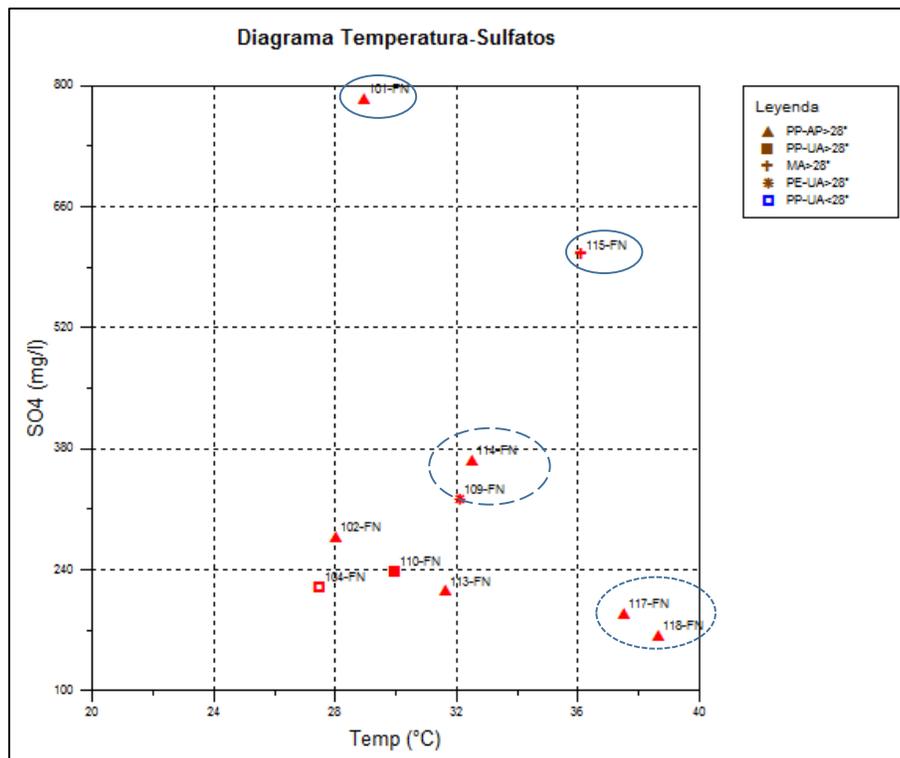


Figura 10 Diagrama Temperatura- Sulfatos (Aguas Sulfatadas)

En la figura 11, se observa que la relación entre el Ca y SO<sub>4</sub> está casi proporcional para todas las muestras lo que incrementa la asunción de que el contenido de SO<sub>4</sub> es por la geología de la zona. Exceptuando las muestras 115-FN y 101-FN que poseen un alto contenido de SO<sub>4</sub> en relación al contenido de Ca, indican que la el origen del sulfato no es netamente geológico y que podría estar influenciado por manifestaciones termales.

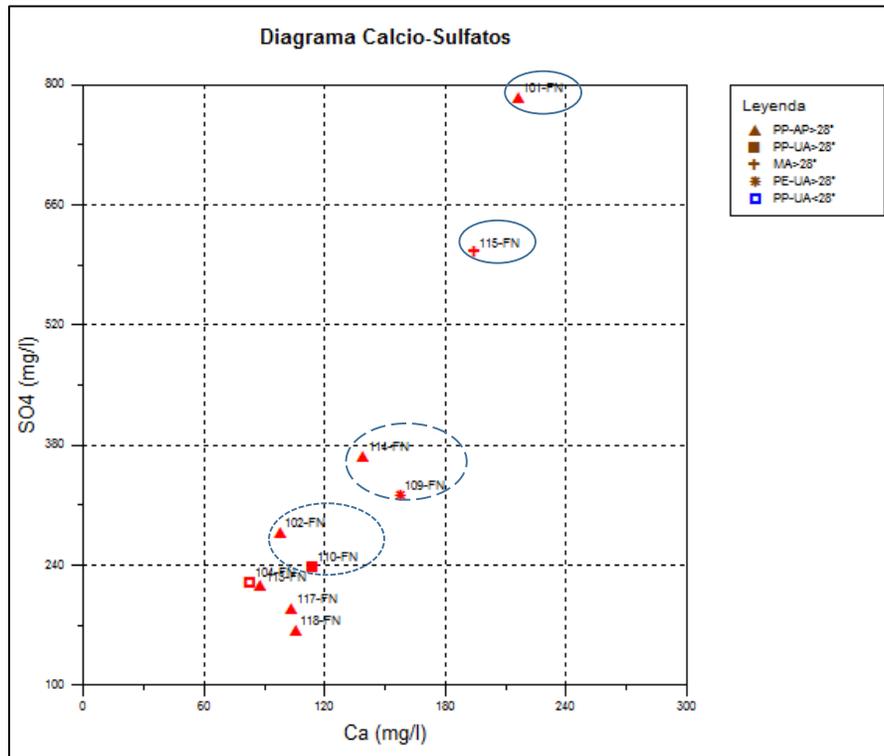


Figura 11 Diagrama Calcio-Sulfatos (Aguas Sulfatadas)

#### Na-Cl (Clorurada Sódica)

Estas aguas también son llamadas cloruro-alcálicas o neutro-cloruradas, su origen se debe a influencia marino o presencia de fluidos geotérmicos a profundidad. El ion predominante es el Cl<sup>-</sup>, los cationes que suelen estar presentes son Na y K. En este caso, la muestra 112-FN tiene influencia marina por su proximidad al mar y la muestra 120-FN podría tener presencia de fluidos geotérmicos al ser agua de la laguna cratérica.

Tabla 9 Aguas Cloruradas-Fuentes Naturales

112-FN	120-FN
PP-AP>28°	PP-AP>28°

#### Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> (Bicarbonatada Cálcica Magnésica)

Suelen ser aguas superficiales, generalmente frías y pueden tener gran variedad de cationes y aniones, pero predominando el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, en el caso de estas muestras los cationes predominantes son el Ca y Mg. Estas aguas suelen tener gran influencia de la recarga meteórica. En la Figura 12 se muestra la relación entre el HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y los cationes predominantes.

Tabla 10 Aguas Bicarbonatadas-Fuentes Naturales

105-FN	106-FN	107-FN	108-FN
PP- AP>28°	PP- AP>28°	PP- UA<28°	PE- UA>28°

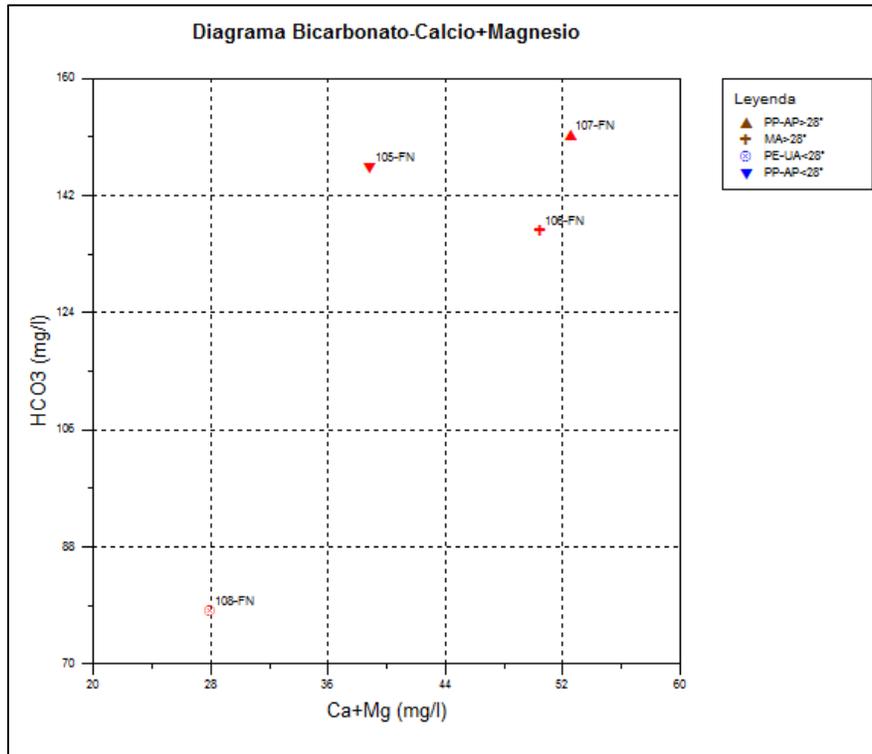


Figura 12 Diagrama Bicarbonatos-Cationes (Fuentes Naturales)

### Mezclas

Se encontró que cuatro de las muestras analizadas como fuentes naturales se encuentra en el rango de composición intermedia, es decir que tienen ninguna clasificación dominante y no pertenecen a ninguno de los grupos previamente definidos. En la figura 13 se muestra el diagrama de Piper con la ubicación de las muestras clasificadas como mezclas.

Tabla 11 Aguas de Mezcla-Fuentes Naturales

103-FN	111-FN	116-FN	119-FN
PP- UA<28°	MA>28°C	MA>28°C	PE- UA>28°

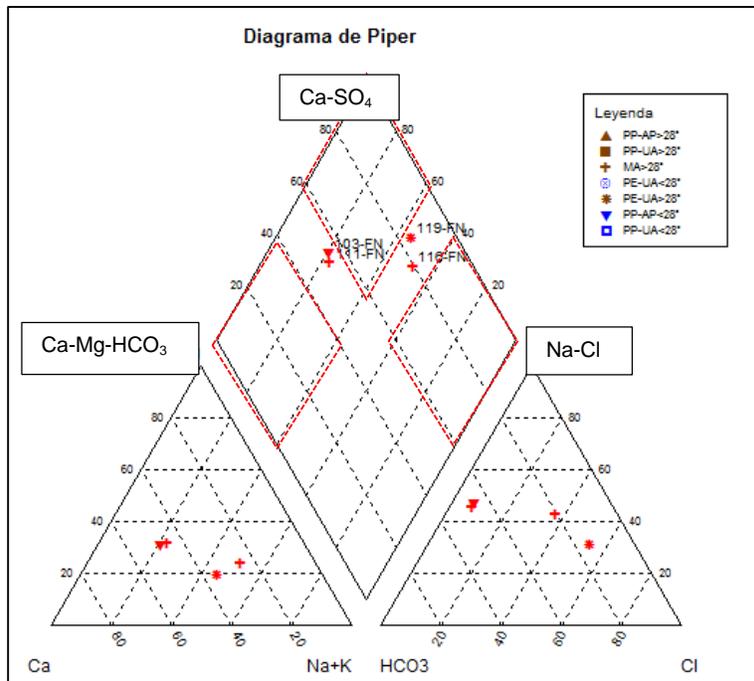


Figura 13 Diagrama de Piper-Mezclas

#### Relación Cloruros – Boro

Esta relación es de gran utilidad porque ayuda a identificar si las fuentes de agua tienen alguna relación con procesos termales. Es común tener altas concentración de boro y cloruros en fuentes que tienen mezcla con agua geotérmica.

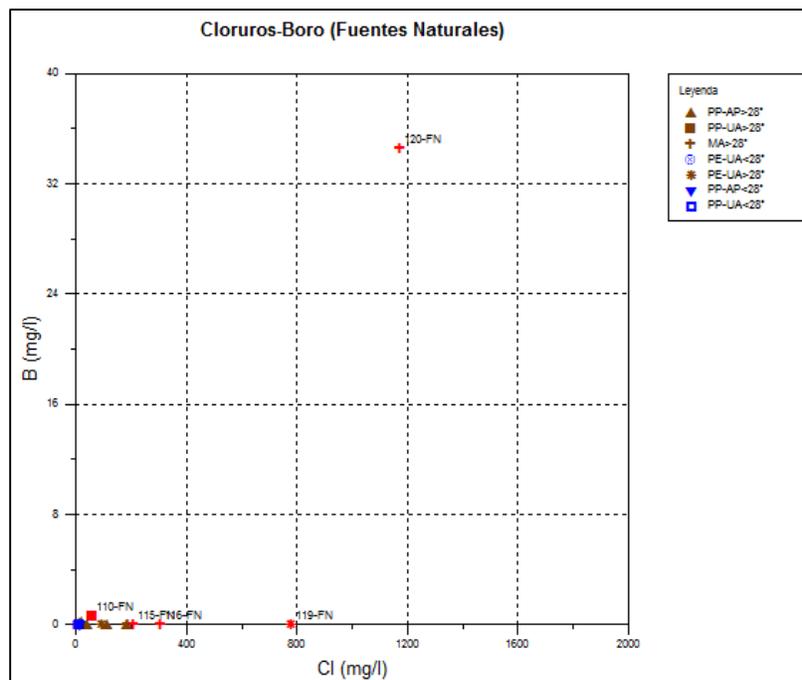


Figura 14 Diagrama Cloruros-Boro (Fuentes Naturales)

En la figura se observa que la mayoría de las muestras tienen concentraciones de Boro muy bajas, lo cual podría indicar que estas aguas no están teniendo interacción o influencia de aguas geotérmicas. Cabe señalar que según la OMS el valor guía para Boro en aguas de consumo humano es 0.5 mg/L.

#### Diagrama Cloruros-Arsénico

El arsénico es un metaloide que se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre con una concentración media de 2 mg/Kg. Está presente en cantidades ínfimas en todo tipo de rocas, suelos, agua y aire (IPCS, 2001). El arsénico se encuentra frecuentemente en aguas naturales a las que llega por la erosión de rocas superficiales y volcánicas. Por lo común las aguas superficiales tienen bajos contenidos.

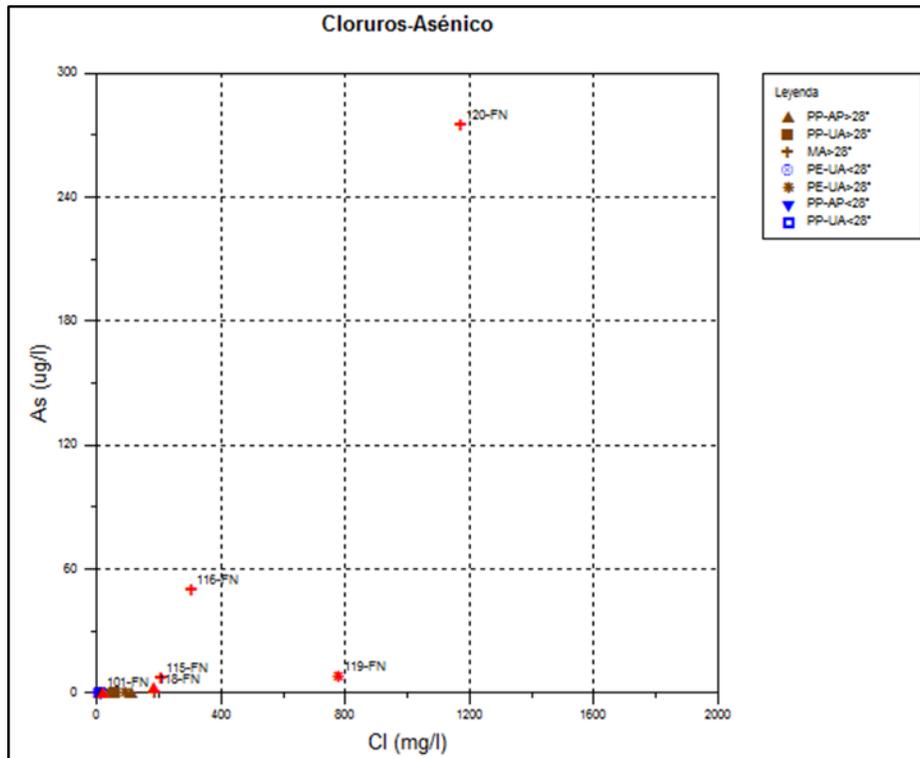


Figura 15 Diagrama Cloruros-Arsénico (Fuentes Naturales)

En la figura se puede observar que la muestra correspondiente a la laguna cratérica (120-FN) posee la mayor concentración de Arsénico y Cloruros, lo cual es de esperarse por el origen volcánico de dicho cuerpo de agua. El resto de las muestras poseen una concentración mucho menos, casi en el límite de cero para arsénico y no mayor a 400mg/L de Cloruros; estas concentraciones son características de aguas superficiales. A pesar que la muestra 116-FN tiene la mayor concentración de arsénico, no es una cantidad considerable ya que se trata de un manantial o afloramiento, por lo que el arsénico puede ser por la interacción agua-roca además esta fuente de agua no es utilizada para consumo humano por lo que dicha concentración no representa un peligro para la salud humana.

## Manifestaciones Termales

### Diagrama de Piper

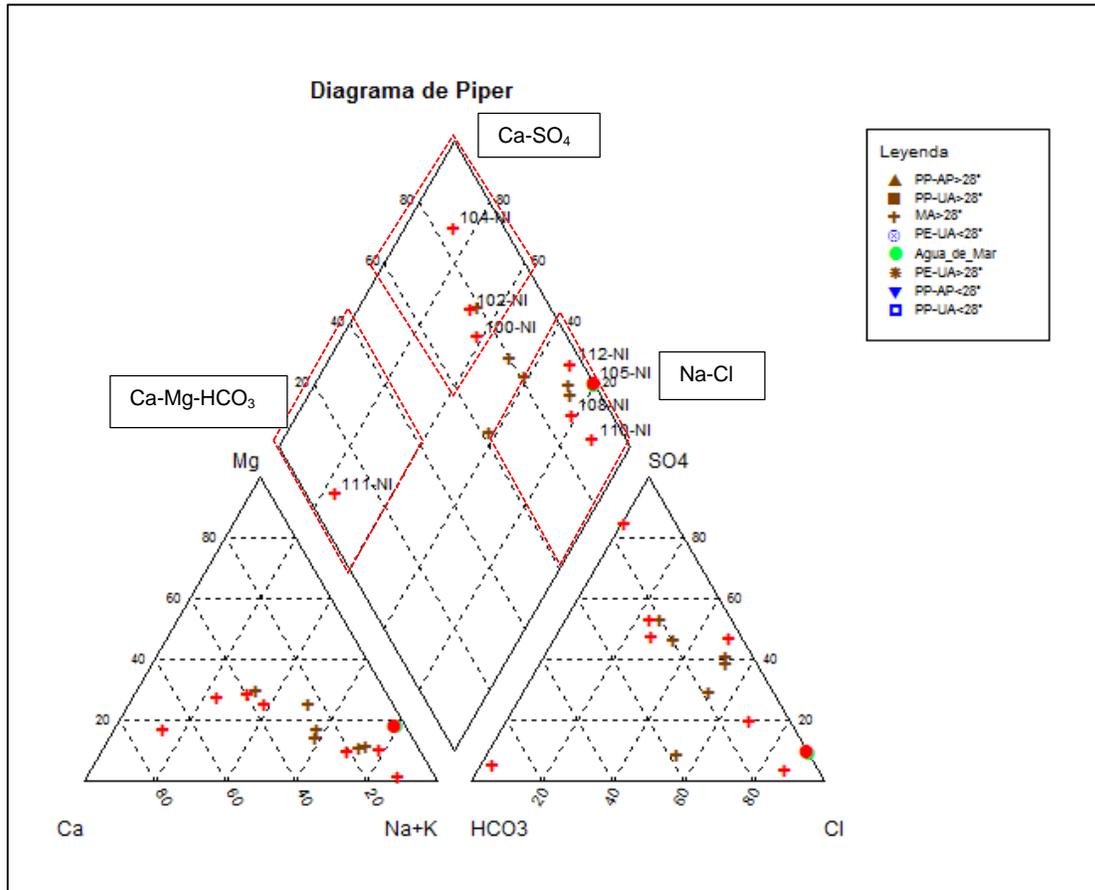
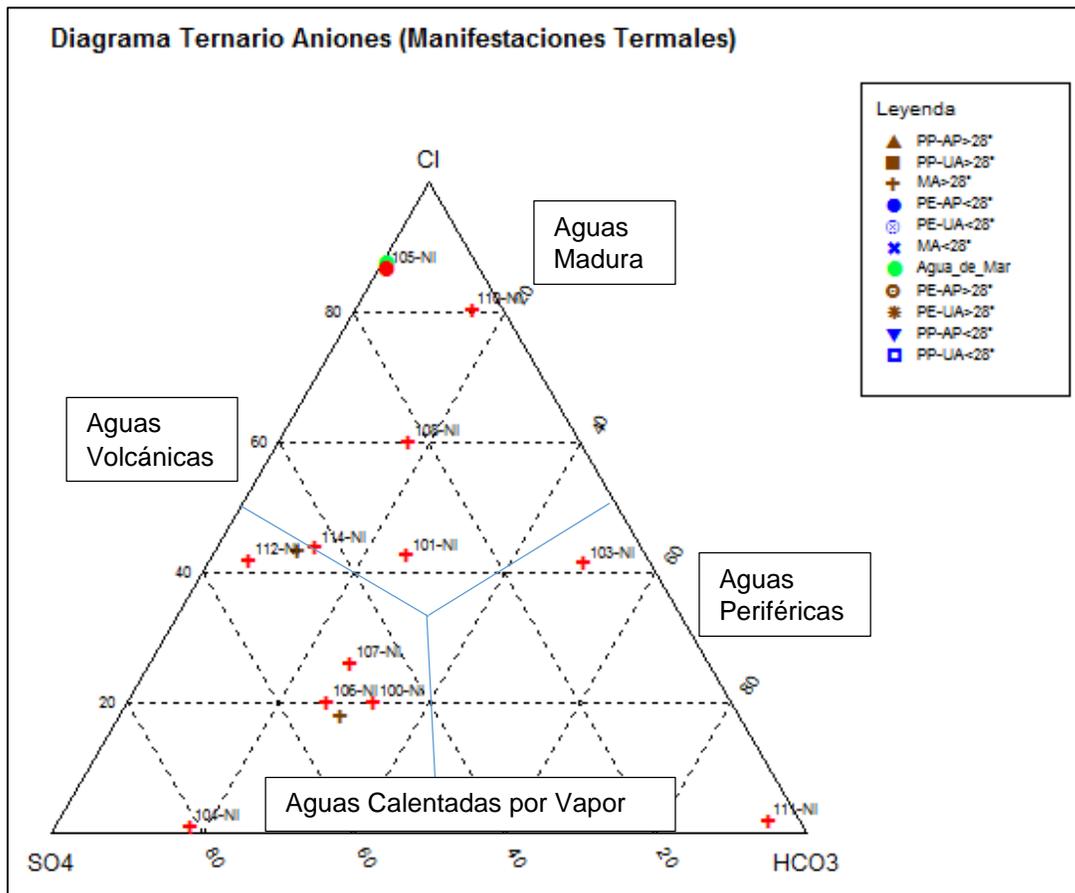


Figura 16 Diagrama de Piper-Manifestaciones Termales

Se observa en el diagrama de Piper que la mayoría de las muestras están dentro de la clasificación Cloruradas-Sódicas, pero cabe mencionar que dos (105-Ni, 109-NI) de esas muestras son de agua marina (se tomaron como referencia) y tres (112-NI, 113-NI, 114-NI) son de la laguna que se encuentra dentro del edificio volcánico.

Otra de la clasificación predominante es la Sulfatada-Cálcica, todas las muestras corresponden a manifestaciones termales superficiales que están presentes en el lado este de la zona de interés.

## Diagramas Ternarios



En el diagrama ternario de aniones se observa que la distribución de las aguas está entre las sulfatadas y las cloruradas. Las aguas que se encuentran más próximas al vértice de los cloruros corresponden a las muestras de mar y una manifestación, estas aguas suelen ser aguas maduras.

Por otro lado vemos que la mayoría de las muestras están entre las mezclas de aguas volcánicas y aguas calentadas por vapor. Lo cual es de esperarse ya que tres muestras son de una laguna en el cráter y las otras son manantiales o lodos calientes. Existen dos muestras que están dentro del rango de aguas periféricas, es decir que son aguas superficiales frías producto de la recarga meteórica.

### Clasificación

En la siguiente tabla se muestra la clasificación según el ion predominante de las muestras de agua analizadas como manifestaciones termales.

Tabla 12 Clasificación según ion predominante-Manifestaciones Termales

Sulfatadas Cálcidas Ca-SO <sub>4</sub>						
	100-NI	102-NI	104-NI	106-NI		
	MA>28°C	MA>28°C	MA>28°C	MA>28°C		
Cloruradas Sódicas Na-Cl						
105-NI	108-NI	109-NI	110-NI	112-NI	113-NI	114-NI
Agua de Mar	MA>28°C	Agua de Mar	MA>28°C	MA>28°C	MA>28°C	MA>28°C
Bicarbonatadas Cálcidas Magnésicas Ca-Mg-HCO <sub>3</sub>						
			111-NI			
			MA>28°C			
Mezclas						
	101-NI	103-NI	107-NI			
	MA>28°C	MA>28°C	MA>28°C			

En la siguiente figura se muestra el diagrama de Piper para las muestras clasificadas como mezclas, se puede observar que a pesar de que son clasificadas como mezcla tienen una tendencia a las aguas Cloruradas Sódicas, lo que podría indicar que estas muestras tienen incidencia de agua marina.

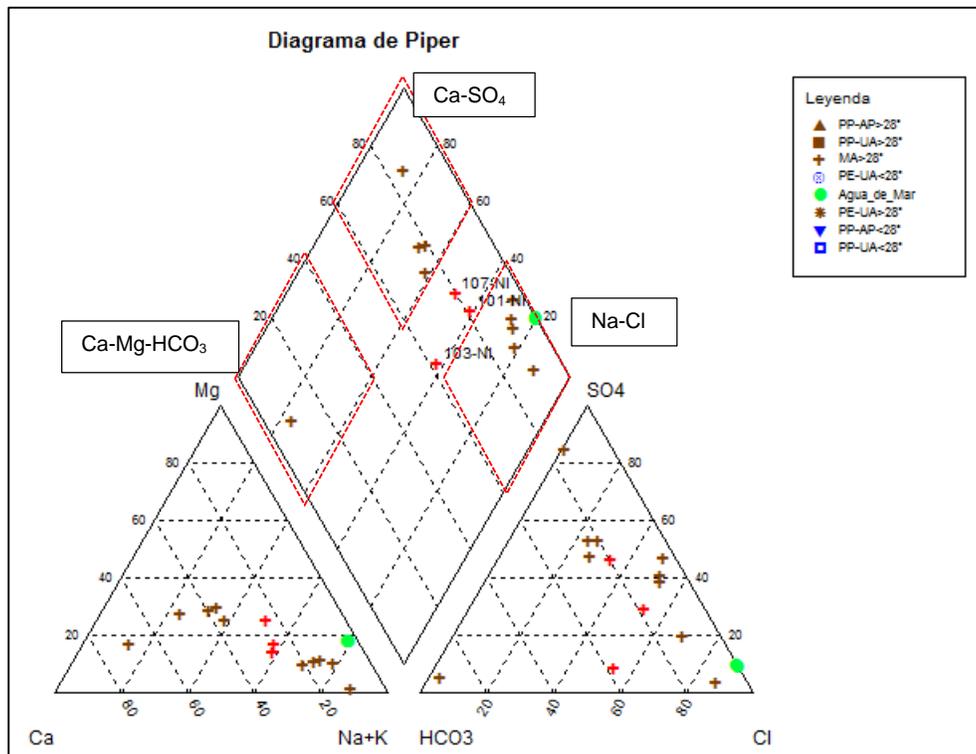


Figura 18 Diagrama de Piper-Mezclas

## Diagrama Cloruros-Boro

El boro en aguas subterráneas se encuentra normalmente a muy bajas concentraciones, aportes naturales ligados al agua de mar, a salmueras, ciertos fluidos geotermales o ambientes evaporíticos puede elevar apreciablemente su concentración hasta superar la concentración media del agua de mar.

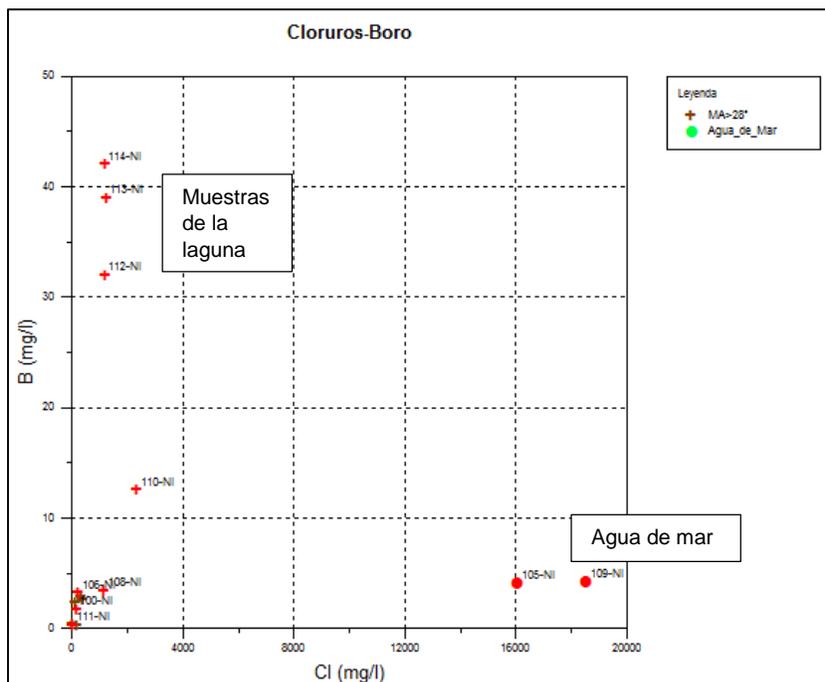


Figura 19 Diagrama Cloruros-Boro (Manifiestaciones Termales)

En la figura anterior se puede apreciar que las muestras de agua de mar tienen concentraciones menores a 5 mg/L de boro y mayores de 16000 mg/L de cloruros. Las muestras con alto boro pertenecen a la laguna cratérica. Estos altos valores detectados pueden deberse a la alteración meteórica de rocas volcánicas y a la actividad hidrotermal (Risacher, 1984) o estar relacionadas con el lixiviado meteórico y/o hidrotermal de rocas ricas en boro (Murria, 1996).

En la siguiente figura se puede apreciar la relación Cloruros-Boro sin las muestras de agua de mar, en este caso la mayoría de las muestras presentan una concentración de boro menor a 5 mg/L, teniendo en cuenta que la concentración de boro en las fuentes naturales que sirven de abastecimiento es casi nula, tener estos valores puede significar que hay alguna relación con fluido geotérmico.

La muestra 110-NI podría ser considerada como una muestra representativa de mezcla con fluido geotérmico; sin embargo se corrobora que esta muestra está ubicada a más de 20 km de las demás muestras y del sitio de interés.

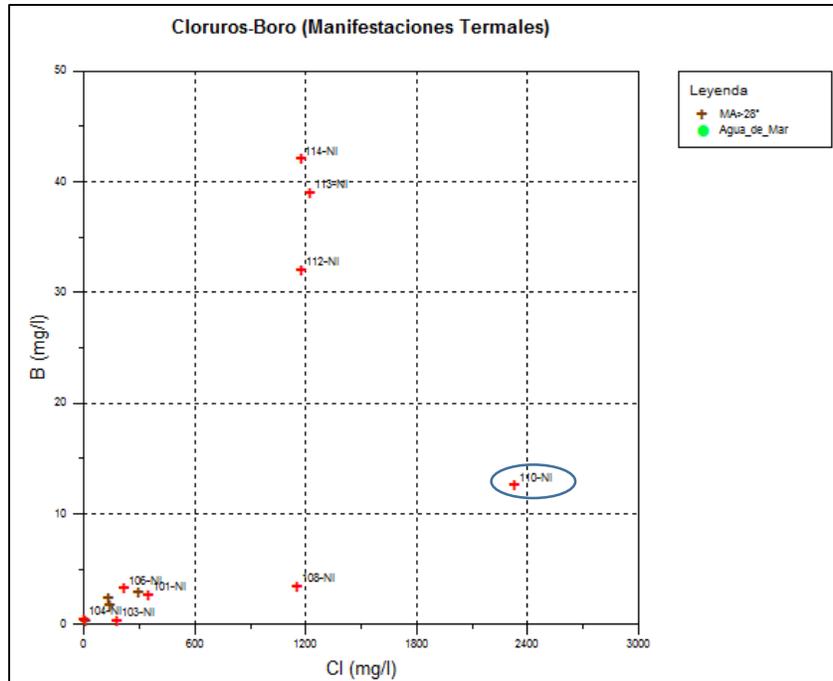


Figura 20 Diagrama 2 Cloruros-Boro (Manifestaciones Termales)

#### Diagrama Cloruro-Magnesio

Esta relación es de gran utilidad porque facilita seleccionar las muestras que tienen influencia del agua de mar, ya que las aguas que son de mezcla con agua geotérmica tienden a tener concentraciones muy reducidas de Magnesio a pesar de tener altas concentraciones de Cloruros.

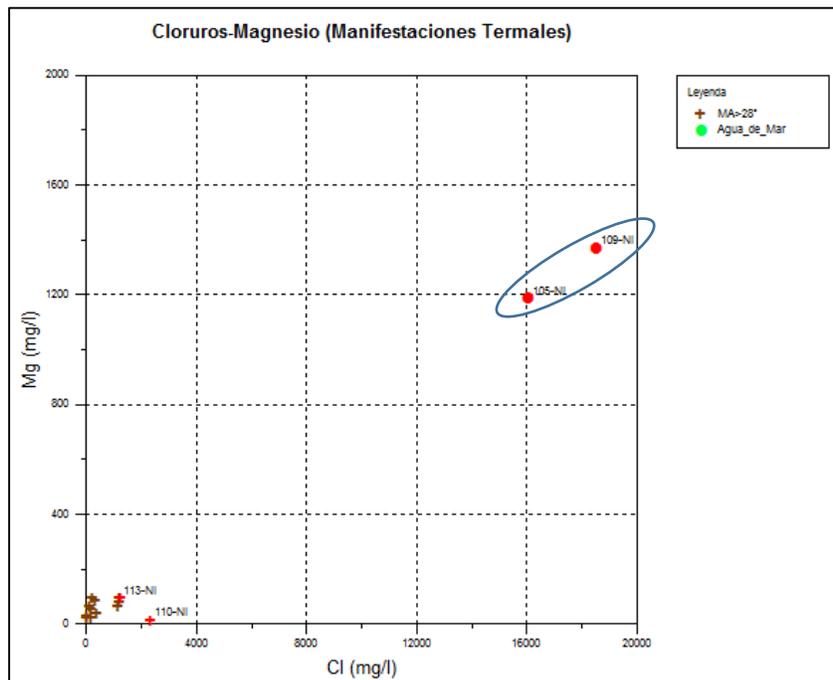


Figura 21 Diagrama Cloruros-Magnesio (Manifestaciones Termales)

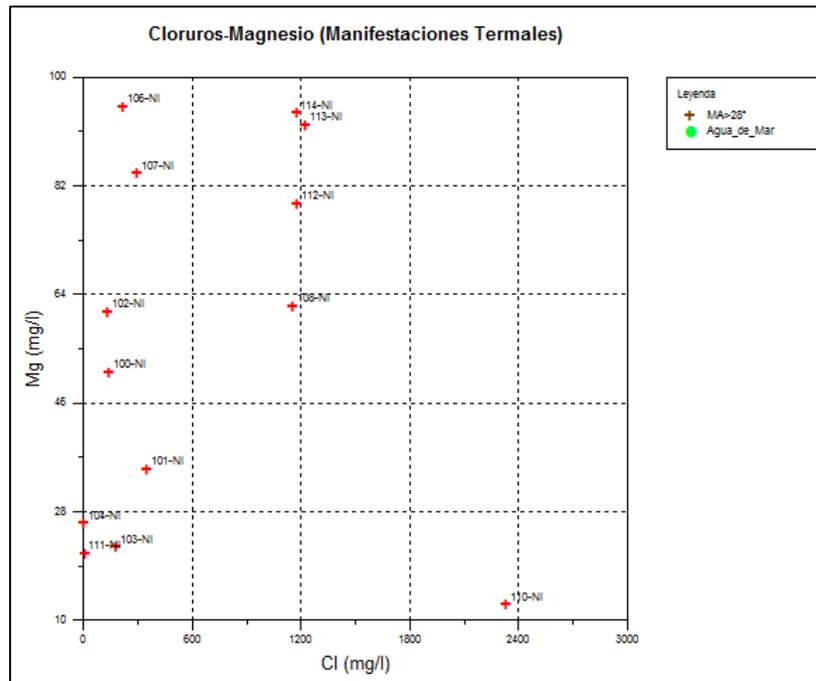


Figura 22 Diagrama 2 Cloruros-Boro (Manifestaciones Termales)

En la figura 22 se puede observar que en las muestras de agua de mar tienen altas concentraciones de Cloruros y Magnesio. En las siguiente figura se observa de mejor manera que las muestras de la laguna cratérica tienen altas concentraciones de Magnesio (aunque mucho menor que el agua de mar) a pesar de estar en el cráter del volcán. La única muestra que cumple con el comportamiento de un agua geotérmica es la 110-Ni, pero como se mencionó anteriormente está ubicada a gran distancia de las demás.

#### Diagrama Cloruros-Arsénico

Como se mencionó con anterioridad, el Arsénico es un elemento que puede encontrarse de forma natural en las fuentes de agua; sin embargo para las aguas superficiales los contenidos son bajos. Siendo la actividad volcánica la fuente natural más importante de arsénico (IPCS, 2001) es común que las manifestaciones termales que tienen mezcla con recurso geotérmico posean concentraciones muy elevadas.

En la figura 23 se puede observar que el agua de mar posee muy baja concentración de arsénico y aunque las muestras de la laguna cratérica tienen mayores concentraciones de Arsénico, no son consideradas tan relevantes ya que no sobrepasan 1mg/L. Nuevamente la muestra 110-Ni tiene un comportamiento que podría indicar mezcla con aguas geotérmicas.

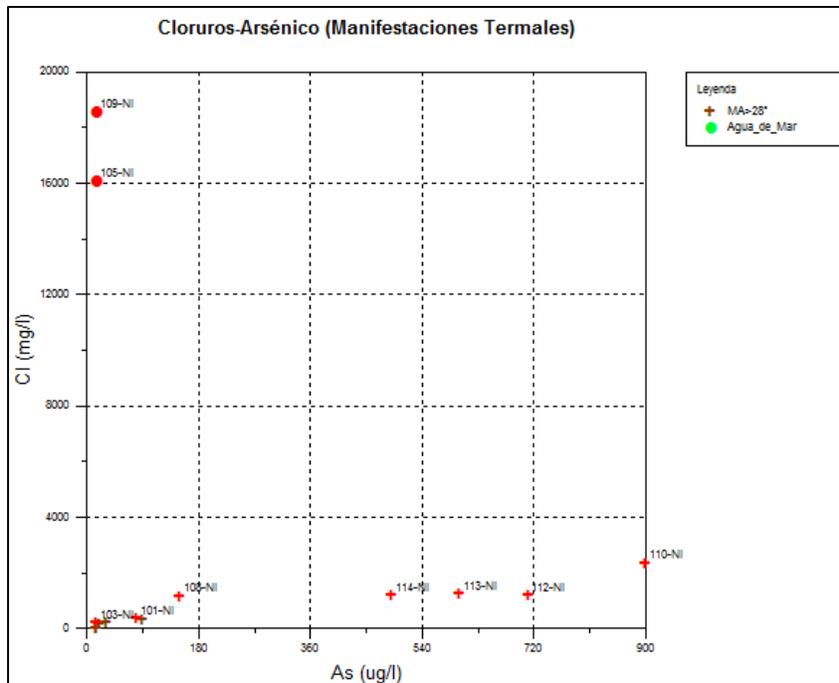


Figura 23 Diagrama Cloruros-Arsénico (Manifestaciones Termales)

### Isotopos

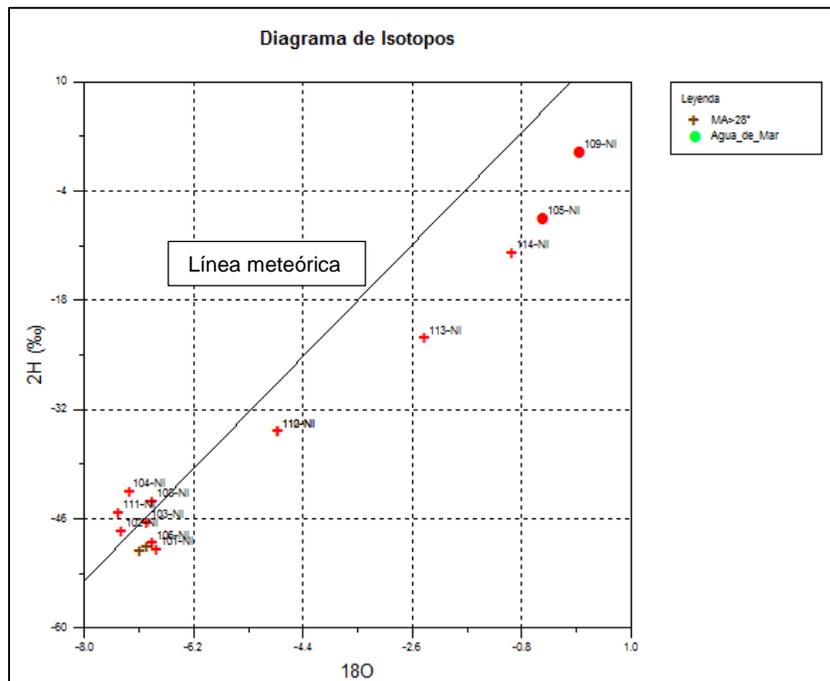


Figura 24 Diagrama de Isotopos (Manifestaciones Termales)

En la figura 24 se puede observar la relación entre el  $\text{O}_{18}$  y el  $\text{H}_2$  con la línea meteórica mundial, mientras más alejadas estén las muestras de la línea meteórica mayor probabilidad hay de que sean aguas de origen geotérmico. En este caso las muestras

analizadas tienen una tendencia al agua de mar, lo que podría indicar que hay inclusión salina en la zona y por eso el alto contenido de cloruros y magnesio en las muestras.

### Geotermómetros

Para el cálculo de geotermómetros se omiten las muestras correspondientes al agua de mar y la laguna cráterica. En la siguiente figura se muestra el geotermómetro de Giggenbach para las muestras recolectadas.

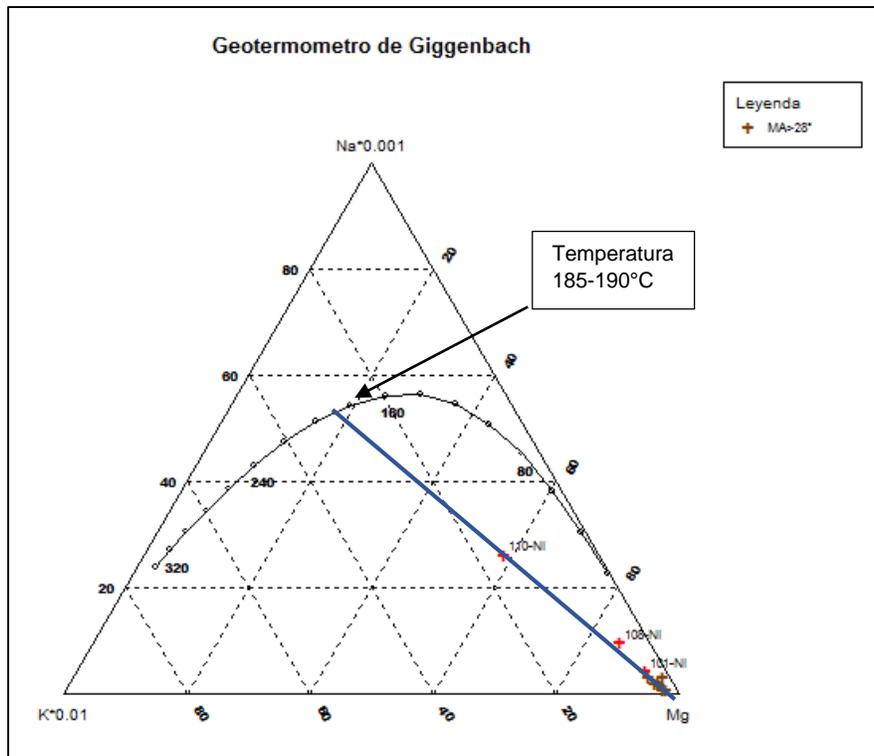


Figura 25 Geotermómetro de Giggenbach

Se observa que la tendencia de las muestras es una temperatura de aproximadamente 180-190°C, lo cual se considera un recurso de baja temperatura que no sería el apropiado para exploración geotérmica.

En la figura siguiente se muestra el geotermómetro de Sílice, para el cual la temperatura estimada del reservorio es cercana a 200°C. Dicha temperatura es congruente con la calculada mediante Giggenbach y de igual manera es una temperatura muy baja para considerar el recurso factible para generación geotérmica.

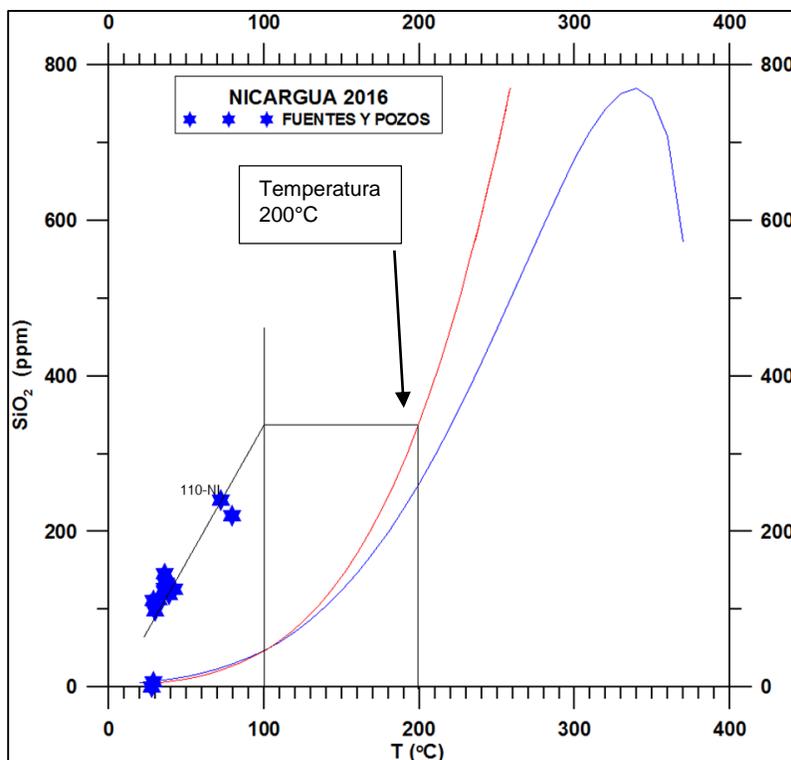


Figura 26 Geotermómetro de Sílice

En la siguiente tabla se muestra el cálculo de diversos geotermómetros para las muestras más representativas. Cabe señalar que a pesar de ser 15 muestras como manifestaciones se excluyeron las de agua de mar y de la laguna cratérica, quedando 10 muestras de las cuales se seleccionaron las que presentaban las características de mezcla con agua geotérmica.

Tabla 13 Geotermómetros Calculados

Muestra	Na	K	Ca	SiO <sub>2</sub>	Geotm. Cationicos (Na/K)				Geotm. Silice		Geotm. Na - K - Ca	B	Cl	As	Mg
					Gigg 1988	Trues 1976	Tonani 1980	Arnor 1983	Four 1977	Four SI 1977					
101-NI	263	23	113	126	221.82	173.59	180.00	181.70	150.53	143.88	166.26	2.6	350	0.08	35
110-NI	1577	93	170	241	193.39	136.94	141.41	146.68	193.02	178.75	172.96	12.5	2333	0.9	12.5

Las muestras con altos contenidos de Magnesio y bajo Cloruros, Boro y Arsénico fueron excluidas también, quedando dos muestras (110-NI y 101-NI) para el cálculo de los geotermómetros. Con el cálculo de estos geotermómetros se confirma que la temperatura del recurso es bajo, por lo que es necesario mayor exploración de la zona y ampliar las zonas de muestreo para mejorar la información.

A continuación se muestran los diagramas Stiff para las dos muestras utilizadas para el cálculo de Geotermómetros y uno de las muestras de la Laguna Cratérica.

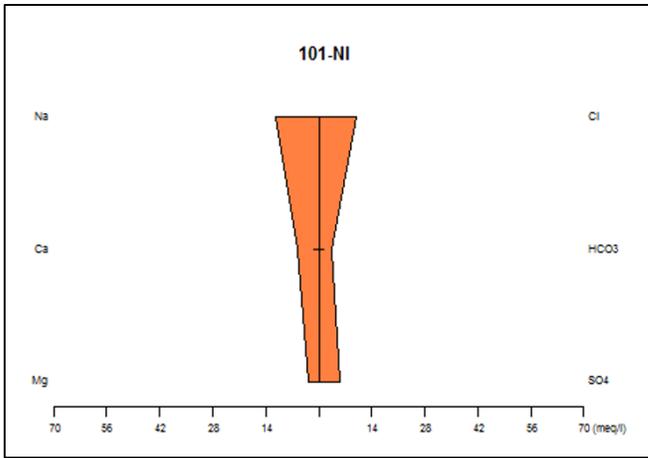


Figura 27 Diagrama Stiff (muestra 101-NI)

La muestra 101-NI es ligeramente Clorurada-Sódica, mientras que la muestra 110-NI es claramente del tipo Clorurada-Sódica. Lo indica que hay presencia de Salmuera o influencia de agua de mar.

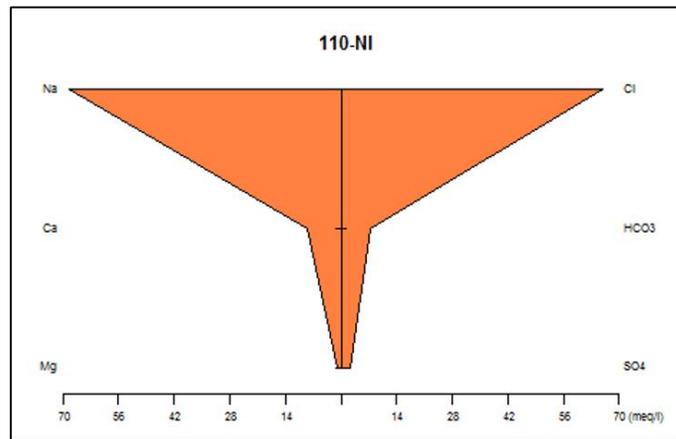


Figura 28 Diagrama Stiff (muestra 110-NI)

La muestra 120-FN, perteneciente a la laguna cratérica es Clorurada Sódica, con influencia de Sulfatos. Lo cual indica que hay influencia geotérmica pero la evaporación aumenta las concentraciones de sales.

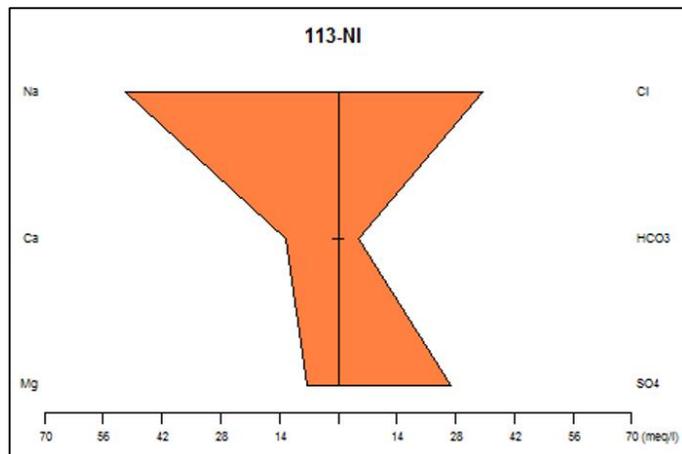


Figura 29 Diagrama Stiff (muestra 113-NI)

## Clasificación de las Aguas según el pH

De acuerdo a los resultados de los análisis, las muestras se encuentran dentro del rango de Neutra a Débilmente Neutra. Manteniendo los valores entre 6.6 y 8.3, lo cual está dentro del rango de la Norma CAPRE para consumo humano.

### Fuentes Naturales

Tabla 14 Clasificación según pH (Fuentes Naturales)

Muestra	Tipo y Uso	pH	Clasificación	Muestra	Tipo y Uso	pH	Clasificación
101-FN	PP-AP>28°C	7.46	Débilmente neutra	111-FN	MA>28°C	8.01	Débilmente neutra
102-FN	PP-AP>28°C	7.66	Débilmente neutra	112-FN	MA>28°C	8.14	Débilmente neutra
103-FN	PP-AP<28°C	7.66	Débilmente neutra	113-FN	PP-AP>28°C	8.15	Débilmente neutra
104-FN	PP-UA<28°C	7.98	Débilmente neutra	114-FN	PP-AP>28°C	8.27	Débilmente neutra
105-FN	PP-AP<28°C	7.73	Débilmente neutra	115-FN	MA>28°C	8.01	Débilmente neutra
106-FN	MA>28°C	7.35	Débilmente neutra	116-FN	MA>28°C	8.11	Débilmente neutra
107-FN	PP-AP>28°C	7	Neutra	117-FN	PP-AP>28°C	7.3	Débilmente neutra
108-FN	PE-UA<28°C	8.15	Débilmente neutra	118-FN	PP-AP>28°C	8.25	Débilmente neutra
109-FN	PE-UA>28°C	7.45	Débilmente neutra	119-FN	PE-UA>28°C	7.8	Débilmente neutra
110-FN	PP-UA>28°C	6.61	Débilmente ácida	120-FN	MA>28°C	7.85	Débilmente neutra

### Manifestaciones Termales

Tabla 15 Clasificación según pH (Manifestaciones Termales)

Muestra	Tipo y Uso	pH	Clasificación	Muestra	Tipo y Uso	pH	Clasificación
100-NI	MA>28°C	7.73	Débilmente neutra	108-NI	MA>28°C	7.94	Débilmente neutra
101-NI	MA>28°C	7.93	Débilmente neutra	109-NI	Agua de Mar	8.07	Débilmente neutra
102-NI	MA>28°C	7.73	Débilmente neutra	110-NI	MA>28°C	7.81	Débilmente neutra
103-NI	MA>28°C	7.77	Débilmente neutra	111-NI	MA>28°C	7.42	Débilmente neutra
104-NI	MA>28°C	7.73	Débilmente neutra	112-NI	MA>28°C	7.59	Débilmente neutra

105-NI	Agua de Mar	8.10	Débilmente neutra	113-NI	MA>28°C	7.83	Débilmente neutra
106-NI	MA>28°C	7.67	Débilmente neutra	114-NI	MA>28°C	8.01	Débilmente neutra
107-NI	MA>28°C	7.80	Débilmente neutra				

### Clasificación de las Aguas según la Dureza

La clasificación según dureza sólo fue posible realizarla para las muestras identificadas como fuentes naturales y que son utilizadas para agua potable y agricultura.

### Fuentes Naturales

Tabla 16 Clasificación según Dureza (Fuentes Naturales)

Muestra	Tipo y Uso	Dureza	Clasificación	Muestra	Tipo y Uso	Dureza	Clasificación
101-FN	PP-AP>28°C	848	Agua muy dura	111-FN	MA>28°C	240	Agua dura
102-FN	PP-AP>28°C	392	Agua muy dura	112-FN	MA>28°C	153	Agua dura
103-FN	PP-AP<28°C	248	Agua dura	113-FN	PP-AP>28°C	359	Agua muy dura
104-FN	PP-UA<28°C	378	Agua muy dura	114-FN	PP-AP>28°C	488	Agua muy dura
105-FN	PP-AP<28°C	112	Agua poco dura	115-FN	MA>28°C	838	Agua muy dura
106-FN	MA>28°C	170	Agua dura	116-FN	MA>28°C	594	Agua muy dura
107-FN	PP-AP>28°C	154	Agua dura	117-FN	PP-AP>28°C	351	Agua muy dura
108-FN	PE-UA<28°C	80	Agua poco dura	118-FN	PP-AP>28°C	404	Agua muy dura
109-FN	PE-UA>28°C	620	Agua muy dura	119-FN	PE-UA>28°C	1134	Agua muy dura
110-FN	PP-UA>28°C	476	Agua muy dura	120-FN	MA>28°C	718	Agua muy dura

### Calidad de las Aguas de Uso Potable

Para evaluar la calidad de las fuentes de agua, se seleccionaron solo las fuentes naturales que son utilizadas para abastecimiento de agua potable. Los valores guía que se utilizaron fueron los estipulados por la Norma CAPRE y la Organización Mundial de la Salud.

## Parámetros Físicos

Tabla 17 Parámetros Físicos (Fuentes Naturales)

Muestra	Temperatura	pH	Conductividad	Sólidos Totales Disueltos	Turbidez	
	°C		us/cm	mg/L	NTU	
101-FN	28.96	7.46	1501	1294.24	0.3	
102-FN	28.03	7.66	810	645.01	0.4	
103-FN	27.97	7.66	534	438.68	0.3	
105-FN	27.42	7.73	255	210.43	1.3	
107-FN	30.94	7	369	331.68	0.5	
113-FN	31.64	8.15	812	594.62	0.4	
114-FN	32.52	8.27	1105	791.07	1.7	
117-FN	37.53	7.3	1027	662.94	0.4	
118-FN	38.66	8.25	1282	746.21	0.5	
Valor Guía	CAPRE	18-30	6.5-8.5	400	1000	5
	OMS		6.5-8	600	2500	

## Parámetros Químicos

### Cationes

Tabla 18 Principales Cationes (Fuentes Naturales)

Muestra	Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio	
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
101-FN	216.43	74.84	37.7	8.55	
102-FN	97.8	35.96	25.5	8.15	
103-FN	60.12	23.81	27.2	4.19	
105-FN	29.666	9.23	18.1	3.3	
107-FN	38.48	14.09	27.7	3.49	
113-FN	88.3	33.72	52.4	9.83	
114-FN	139.48	34.02	50.1	15.51	
117-FN	103.84	22.31	75.4	8.75	
118-FN	105.81	34.02	90.9	11.55	
Valor Guía	CAPRE	100	50	200	10
	OMS			200	

## Aniones

Tabla 19 Principales Aniones (Fuentes Naturales)

Muestra	Cloruros	Sulfatos	Bicarbonatos	Fluoruros	Nitratos
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
101-FN	20.07	785.45	95.18	0	21.79
102-FN	10.82	277.36	202.56	0	11.23
103-FN	15.35	133.14	164	0	8.41
105-FN	6.93	18.83	146.43	0	9.14
107-FN	11.92	51.02	151.31	0.39	4.1
113-FN	40.59	215.17	187.94	0.39	18.1
114-FN	10.4	366.19	261.17	0	3.98
117-FN	112.71	189.53	170.86	0	16.38
118-FN	184.98	163.09	183.06	0	17.04
Valor Guía	CAPRE	250	250	0.7-1.5	45
	OMS	250	250	1.5	50

## Otros Parámetros

Tabla 20 Otros Parámetros Monitoreados

Muestra	Nitritos	Dureza	Hierro Total	Arsénico	Sílice	Boro
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
101-FN	0.003	848	0	0	82.61	
102-FN	0	392	0.04	0	78.59	
103-FN	0	248	0	0	85.82	
105-FN	0.003	112	0	0	92.45	
107-FN	0.003	154	0	0	106.09	
113-FN	0.007	359	0.05	0	93.45	
114-FN	0	488	0	0	91.85	
117-FN	0	351	0	0	106.91	
118-FN	0	404	0.03	0.002	104.38	
Valor Guía	CAPRE	1	400	0.3	0.01	
	OMS	3			0.01	0.5

A continuación se presentan los diagramas de Stiff para las muestras 105-FN y 107-FN que son las muestras que cumplen con los parámetros de las Normas CAPRE y la OMS para consumo de agua potable para el ser humano. Además se presenta el diagrama Stiff para la muestra 120-FN que es de la laguna cráterica.

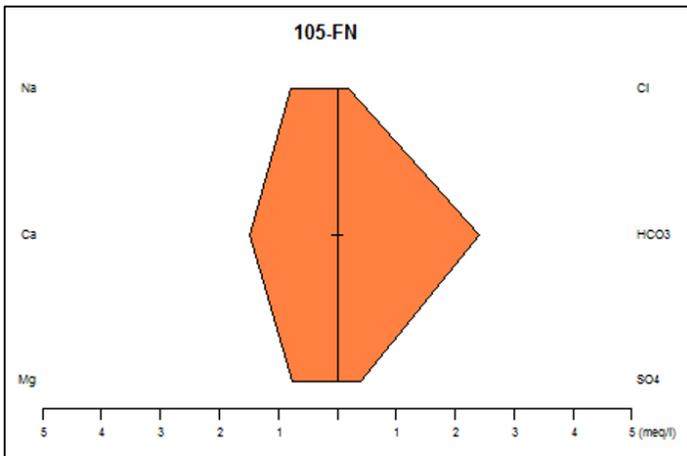


Figura 30 Diagrama Stiff (Muestra 105-FN)

De acuerdo al diagrama Stiff, las muestra 105-FN y 107-FN son del tipo bicarbonatada. Este diagrama es característico de las aguas subterráneas naturales.

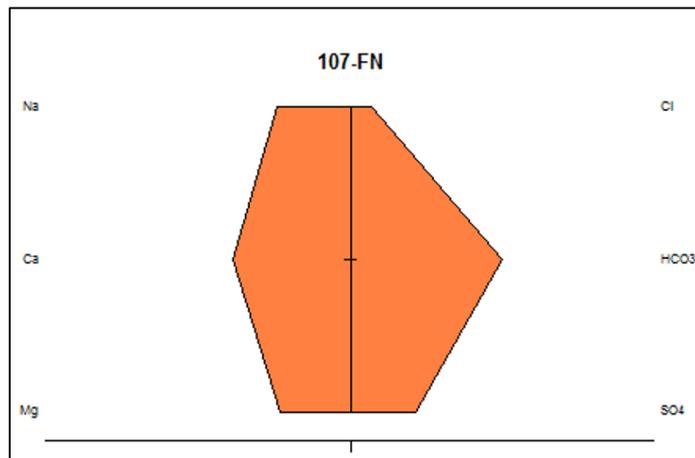


Figura 31 Diagrama Stiff (Muestra 107-FN)

La muestra 120-FN, perteneciente a la laguna cratéica es Clorurada Sódica, con influencia de Sulfatos. Lo cual indica que hay influencia geotérmica pero la evaporación aumenta las concentraciones de sales.

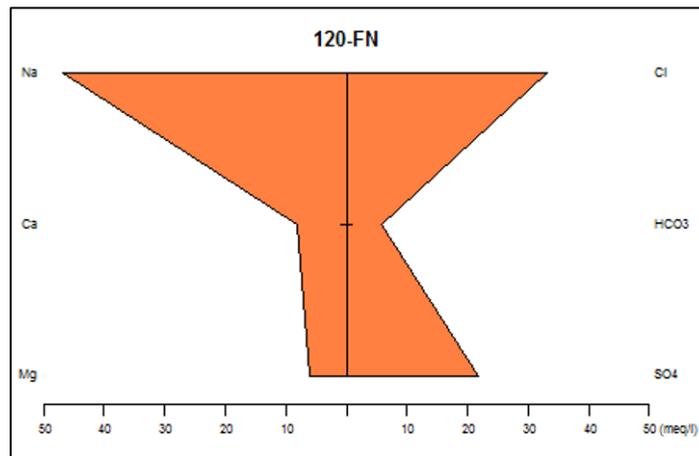


Figura 32 Diagrama Stiff (Muestra 120-FN)

Temperatura: En cuatro de las fuentes que son utilizadas para agua potable la temperatura excede los 30°C, dado que la zona posee temperaturas y se encuentra cerca de un edificio volcánico y la proximidad al mar, altas de cierta manera es de esperar estos valores altos de temperatura.

Conductividad: La conductividad es el parámetro que menos se cumplió, factores como las altas temperaturas y la proximidad al mar influyen en que el contenido de sales disueltas sea mayor y por ende la conductividad aumenta.

Calcio, Magnesio y Potasio: Como se mencionó anteriormente, las fuentes de agua están próximas al mar y esto puede influir en que el contenido de estos cationes sea ligeramente más alto que el valor guía estipulado por la CAPRE y la OMS.

Sulfatos: Al ser una zona volcánica con algunas manifestaciones termales, la presencia de sulfatos puede deberse a una ligera interacción entre agua-roca o fluidos que son calentados por fluido geotérmico.

#### PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.

En las siguientes tablas se muestra el resumen de la clasificación de las muestras analizadas, tanto fuentes naturales como manifestaciones termales.

Tabla 21 Clasificación de las Fuentes Naturales

Muestra	Clasificación		
	Según Ión Predominante	Según pH	Según Dureza
101-FN	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra	Agua muy dura
102-FN	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra	Agua muy dura
103-FN	Mezclas	Débilmente neutra	Agua dura
104-FN	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra	Agua muy dura
105-FN	Bicarbonatada Ca-Mg	Débilmente neutra	Agua poco dura
106-FN	Bicarbonatada Ca-Mg	Débilmente neutra	Agua dura
107-FN	Bicarbonatada Ca-Mg	Neutra	Agua dura
108-FN	Bicarbonatada Ca-Mg	Débilmente neutra	Agua poco dura
109-FN	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra	Agua muy dura
110-FN	Sulfatada Cálcica	Débilmente ácida	Agua muy dura
111-FN	Mezclas	Débilmente neutra	Agua dura
112-FN	Clorurada Sódica	Débilmente neutra	Agua dura
113-FN	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra	Agua muy dura
114-FN	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra	Agua muy dura
115-FN	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra	Agua muy dura
116-FN	Mezclas	Débilmente neutra	Agua muy dura

117-FN	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra	Agua muy dura
118-FN	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra	Agua muy dura
119-FN	Mezclas	Débilmente neutra	Agua muy dura
120-FN	Clorurada Sódica	Débilmente neutra	Agua muy dura

Tabla 22 Clasificación de las Aguas (Manifestaciones Termale)

Muestra	Clasificación	
	Según Ión Predominante	Según pH
100-NI	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra
101-NI	Mezclas	Débilmente neutra
102-NI	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra
103-NI	Mezclas	Débilmente neutra
104-NI	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra
105-NI	Clorurada Sódica	Débilmente neutra
106-NI	Sulfatada Cálcica	Débilmente neutra
107-NI	Mezclas	Débilmente neutra
108-NI	Clorurada Sódica	Débilmente neutra
109-NI	Clorurada Sódica	Débilmente neutra
110-NI	Clorurada Sódica	Débilmente neutra
111-NI	Bicarbonatadas Ca-Mg	Débilmente neutra
112-NI	Clorurada Sódica	Débilmente neutra
113-NI	Clorurada Sódica	Débilmente neutra
114-NI	Clorurada Sódica	Débilmente neutra

En la siguiente tabla se observan las muestras que no cumplen con los parámetros de la Normativa CAPRE y la OMS.

Tabla 23 Fuentes de Agua Potable que no cumple la Normativa

	101-FN	101-FN	103-FN	113-FN	114-FN	117-FN	118-FN
<b>Temperatura</b>				X	X	X	X
<b>Conductividad</b>	X	X	X	X	X	X	X
<b>STD</b>	X						
<b>Calcio</b>	X				X	X	X
<b>Magnesio</b>	X						
<b>Potasio</b>					X		X
<b>Sulfatos</b>	X	X			X		
<b>Dureza</b>	X				X		X

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

De acuerdo con los Diagramas de Piper y Ternarios un 50% de las muestras de Fuentes Naturales son Sulfatadas y un 20% son Bicarbonatadas. Lo que indica procesos de mezclas entre agua meteórica y agua subterránea que posiblemente tenga interacción con alguna fumarola que se es enfría.

Las muestras que son utilizadas para abastecimiento de agua potable presentan temperaturas mayores a 30°C y conductividad que supera los 600 us/cm lo cual supera lo estipulado por la CAPRE y OMS. En menor medida algunas muestras sobrepasan los valores de Sodio, Potasio, Calcio y Sulfatos. Nos indican que el agua posee elementos disueltos que se encuentran en mayor proporción a lo recomendado como es principalmente el Ca en muestras 101-FN, 114-FN, 117-FN y 118FN que se encuentran arriba de la normativa CAPRE, es necesario que estas fuentes pasen por un proceso de enfriamiento y filtración que ayude a potabilizar el agua y mejorar su calidad.

En las Manifestaciones Termales se presenta un 46.6% de Aguas Cloruradas y un 26.6% de Aguas Sulfatadas. Presentan altas concentraciones de Magnesio que oscilan entre 21-98mg/L y muy bajas concentraciones de Boro (0.3-12.5 mg/L) y Arsénico (0.015-0.9 mg/L) lo que indica que las muestras están siendo influenciadas por el agua de mar. Lo cual era de esperarse ya que la zona se encuentra muy cerca al mar.

De acuerdo a los geotermómetros, el recurso geotérmico es de baja entalpía con un temperatura del reservorio entre 180-200°C por lo cual no sería factible iniciar etapa de perforación de pozos con diámetro comercial. Para confirmar de una manera más precisa la calidad del recurso geotérmico es necesario realizar más estudios superficiales de geociencias y pozos de gradiente térmico así como ampliar la zona de estudio, así como aumentar la frecuencia de muestra para tener muestras más representativas.

## AGRADECIMIENTOS.

- A las instituciones Universidad de las Naciones Unidas, Universidad Nacional de El Salvador, Fondo Nórdico para el Desarrollo y LaGeo, por brindarme la oportunidad de participar en este Diplomado.
- A los profesores que han transmitido su experiencia técnica y profesional, en especial a mis tutores Ing. Antonio Matus e Ing. Luis Franco.
- A mi empleador, Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL), por la oportunidad y el apoyo culminar este Diplomado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- American Society for testing materials. Annual book of standards 1994. Determinación de dureza de agua. Método ASTM 1126-92
- APHA, AWWA, WPCF. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ed. Díaz de Santos, S.A. Madrid, España.
- Arnorsson, S. and Andresdottir, A. (1995). *Process controlling the distribution of boron and chlorine in natural waters in Iceland*. Geochim. Cosmochim.
- CNE, 2001: Nicaragua geothermal master plan. National Energy Commission of Nicaragua (CNE) and Geothermex.
- Custodio, E. Llamas, M. (2001). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- Fernandez-Turiel, J. Galindo, G. Gimero, D. (2005). *El arsénico en las aguas termales del sur de la cuenca del Río Salí Tucumán Argentina*. Argentina.
- IPCS. (2001) *Arsenic and Arsenic Compounds*. Geneva, World Health Organization, International Programme Chemical safety (Environmental Health Criteria 224).
- Lorca, X. (2005). *Análisis de (As, Ca, F, Fe, Mn y Mg) en aguas minerales y termales de la novena y décima regiones de Chile*. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Murray, K.S. (1996) Hydrology and Geochemistry of Thermal Waters in the Upper Napa Valley, California. *Ground Water*, 34 (6), 1115-1124
- Ramírez, M. Rodríguez, A. (2009) *Sistema para la Identificación de Aguas en Pozos Petroleros (SIAPP)*. Universidad de las Ciencias Informáticas. Ciudad de La Habana.
- Risacher, F. (1984). Origine des concentrations extremes en bore et lithium dans Saumeres de L'Altiplano Bolivien. C.R. Acad. Sci. Paris.
- WHO, 2003: Guidelines for safe recreational-water environments. Vol. 1, coastal and freshwaters. World Health Organization, Geneva.
- WHO, 2008: Guidelines for drinking-water quality. Vol. 1, recommendations (3rd ed.). World Health Organisation, Geneva.
- Wright, P.M., 1991: Geochemistry. Chapter 4 in: Direct use engineering and design guidebook. University of Utah Research Institute, Salt Lake City, UT. GHC Bulletin, 8-12.

# APÉNDICES

## Fuentes Naturales.

### Diagrama Cloruro-Magnesio

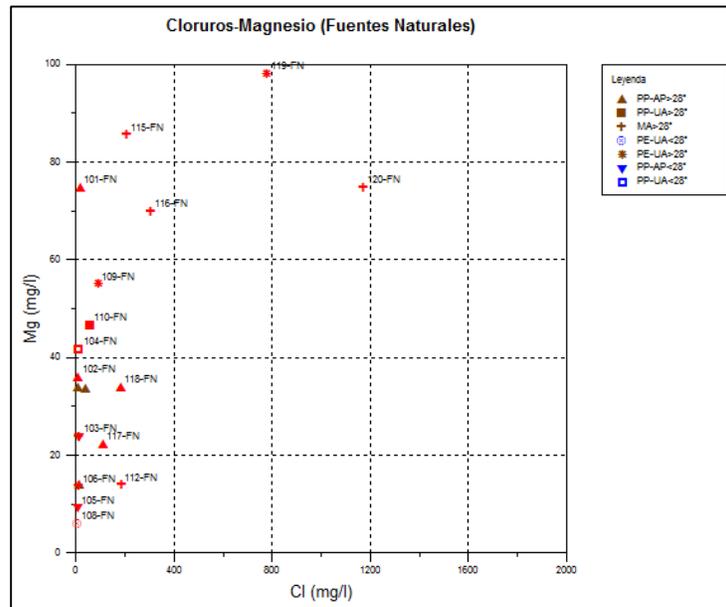


Figura 33 Diagrama Cloruros-Magnesio (Fuentes Naturales)

### Diagrama Cloruros-Temperatura

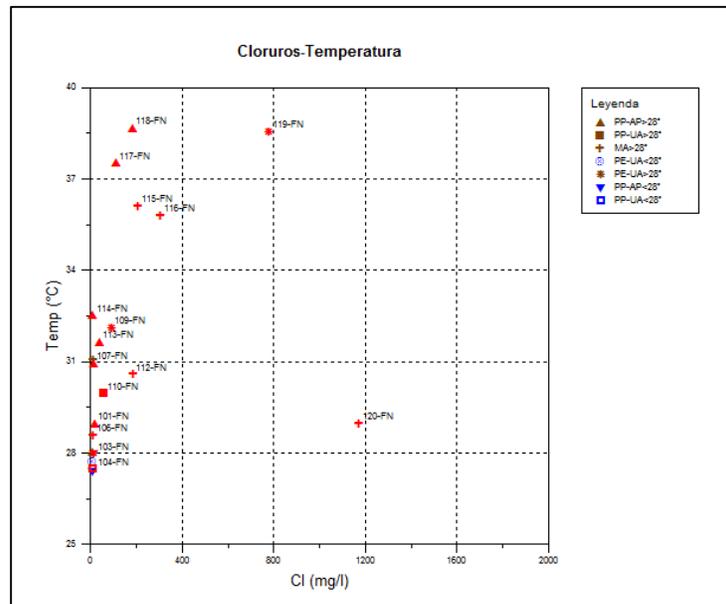


Figura 34 Diagrama Cloruros-Temperatura (Fuentes Naturales)

## Diagrama Potasio-Sodio

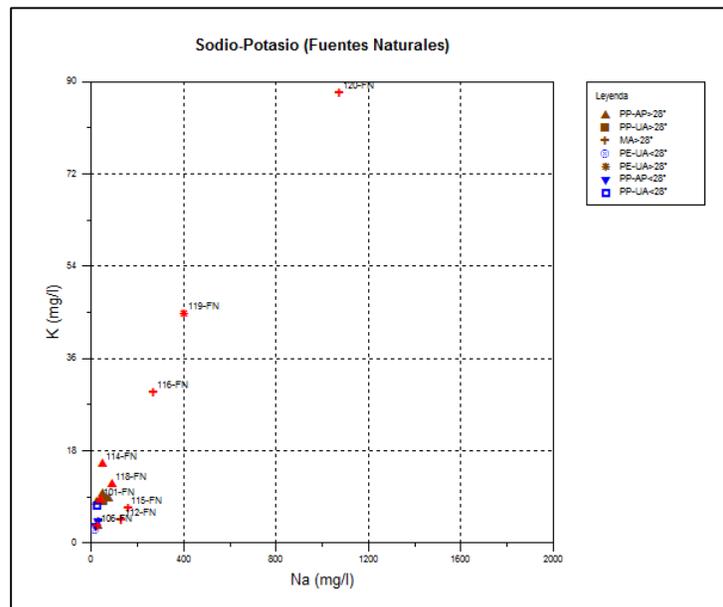


Figura 35 Diagrama Sodio-Potasio (Fuentes Naturales)

## Manifestaciones Termales

## Diagrama Potasio-Sodio

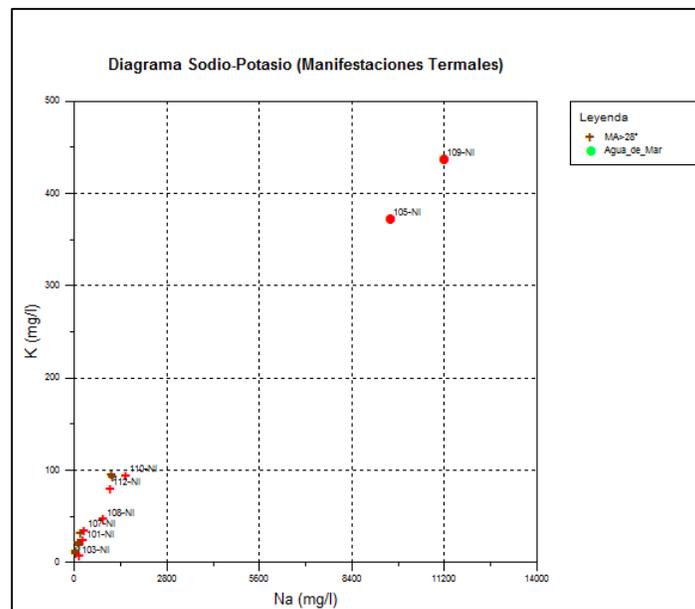


Figura 36 Diagrama Sodio-Potasio (Manifestaciones Termales)

## 18O-Cloruros

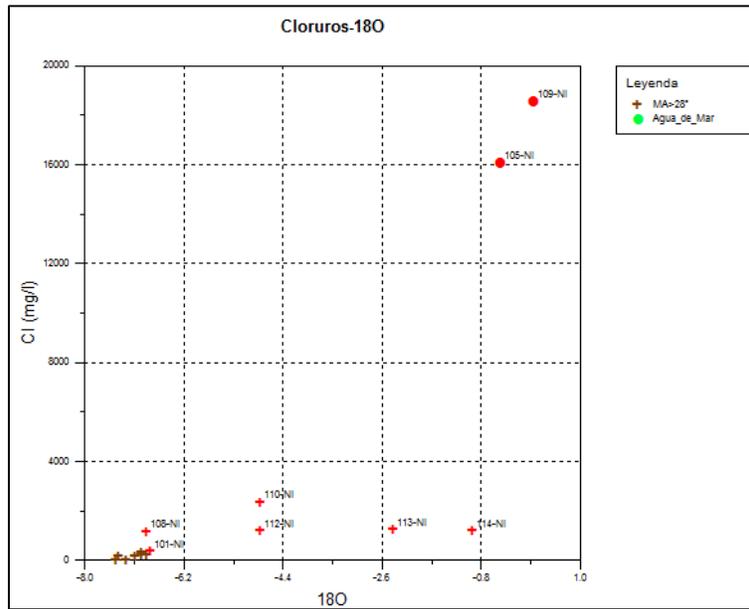


Figura 37 Diagrama 18O-Cloruros (Manifestaciones Termales)

## 18O-Magnesio

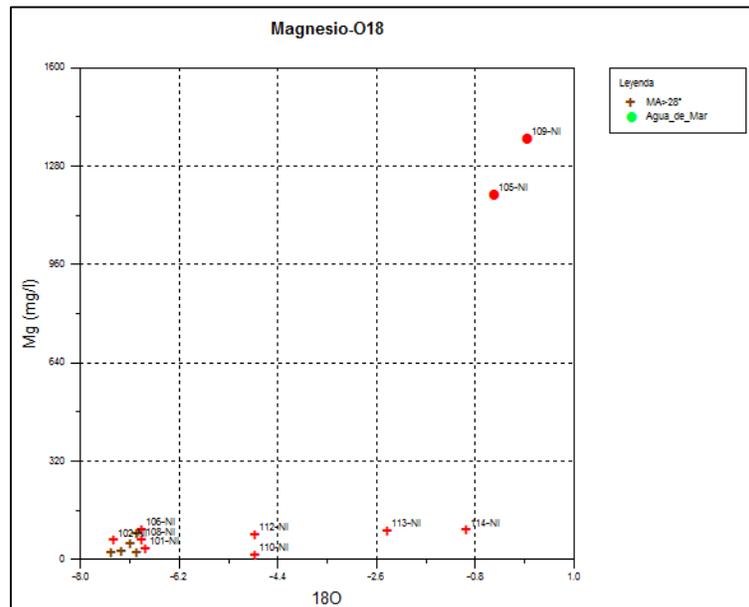


Figura 38 Diagrama 18O-Magnesio

## 18O-Temperatura

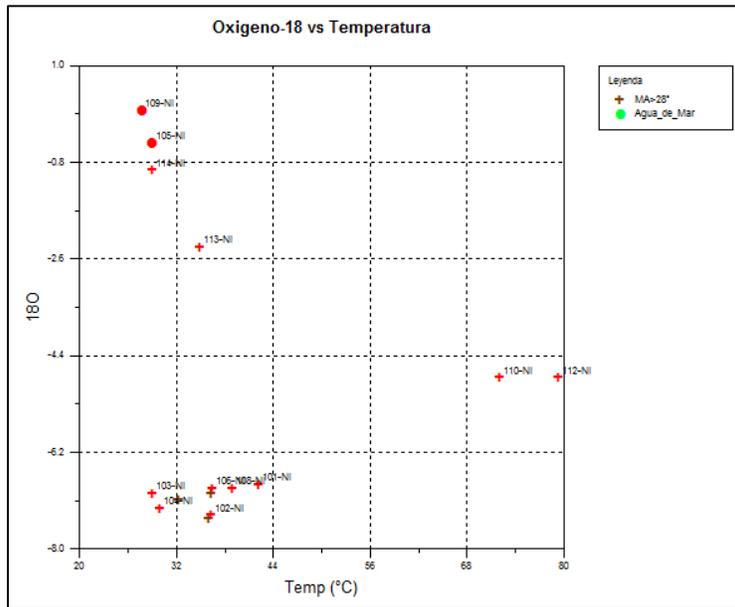


Figura 39 Diagrama 18O-Temperatura (Manifestaciones Termales)

## Diagrama Rb-Cs-Li

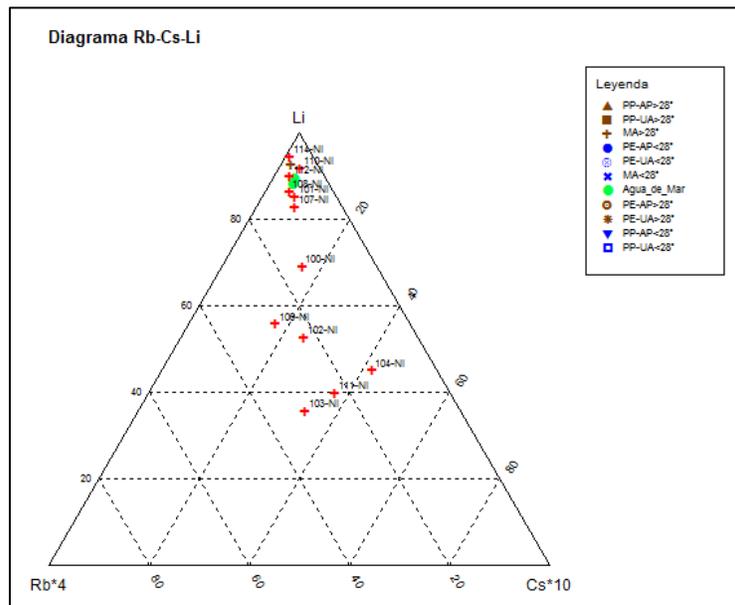


Figura 40 Diagrama Rb-Cs-Li (Manifestaciones Termales)