



Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG)

Diplomado de especialización en geotermia-2014

Universidad de El Salvador

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Unidad de Postgrados



Perfil de proyecto de Graduación

Tema: Hidrogeoquímica Preliminar del Sistema Geotérmico de Cerro Juan Sapo, Nicaragua.

Presentado Por: Marcos Antonio Delgado Sirias – Lic. Química.

Tutor: Ing. Antonio Matus

Ciudad Universitaria, 03 de Noviembre de 2014

1.Resumen.....	4
2.Introducción	6
3.Planteamiento del problema	8
4.Justificación de Estudio	8
5.Objetivos.....	8
5.1Objetivo General	8
5.2Objetivos Específicos	8
6.Marco Teórico.....	9
6.1Tipos de Sistemas Geotérmicos.....	9
6.2Clasificación de las aguas.....	11
6.3Diagrama de Piper:.....	12
6.4Diagramas Triangulares	13
6.5Diagramas Binarios.....	14
6.6Geotermómetros	14
6.7Diagramas de STIFF	15
6.8Descripción del Área de Estudio Cerro Juan Sapo.....	16
7.Metodología	19
7.1Recopilación de Información.....	19
7.2Descripción de los métodos analíticos utilizados.....	20
7.3Evaluación de la calidad de los resultados.....	21
8.Análisis de Datos	21
8.2Clasificación de las aguas, Diagrama de Piper.....	21
8.4Cálculos de Geotermómetros	26
8.5Recarga y Descarga del Sistema Geotérmico	28
9.Conclusiones	32
10.Recomendaciones	32
11.Agradecimientos	33
12.Bibliografía.....	34
13.Anexos.....	35

Ilustración 1, Mapa Geológico de Nicaragua y área de investigación Cerro Juan Sapo	7
Ilustración 2, Esquema de Tipos de aguas.(Henry R.W. Introduction to geochemistry of active and fossil.	12
Ilustración 3,4 Diagrama de Piper y Diagrama Ternario	23
Ilustración 4, Diagrama Cl + SO ₄ vs HCO ₃	24
Ilustración 5, Diagrama de Na vs K	25
Ilustración 6, Diagrama de Giggenbach	26
Ilustración 7, Diagramas de STIFF. Área Cerro Juan Sapo	29
Ilustración 8, Diagrama de Isocontorno de Temperatura.....	30
Ilustración 9, Diagrama de Modelo Conceptual Geoquimico	31
Tabla 1, Geotermómetros utilizados	15
Tabla 2, Cálculos obtenidos por Geotermometría	27
Tabla 3, Componentes Químicos del área Cerro Juan Sapo.....	35
Tabla 4, Clasificación de Recursos Geotérmicos.....	35

1. Resumen

Este proyecto de investigación se centra en el estudio hidrogeoquímico del Área de estudio Cerro Juan Sapo, con el fin de estudiar prospectos que ayuden al desarrollo geotérmico en Nicaragua y tener una base para futuros estudios así como la actualización del plan maestro geotérmico.

Esta área se localiza al NE del complejo volcánico San Cristóbal entre los Municipios del Sauce y el municipio Achuapa ubicado en la zona norte del Departamento de León, Su extensión territorial es de 416.24 km² está ocupado por 20 comarcas y el casco urbano, la cabecera departamental (León) ubicada a 110 km de Managua.

Achuapa limita al norte con el municipio de San Juan de Limay, al sur con El Sauce, Al este con Estelí, Al Oeste con Villanueva, municipio del Departamento de Chinandega.

Geológicamente la zona de estudio pertenece a la Provincia de las Montañas del Interior representadas por la cordillera volcánica y parte de la depresión de Nicaragua.

La topografía de la región está caracterizada por colinas de mediana elevación, montañas altas, valles anchos y profundos, los cuales están formados por la acción erosiva de los ríos.

Las rocas existentes en el área corresponden a material volcánico que se extienden desde el terciario al cuaternario (basaltos), en los lechos de los ríos se observó material aluvial cuaternario, que en algunos casos cubrían la litología de la zona, se encontraron rocas metamórficas de origen sedimentario como las cuarcitas, que se supone quedaron expuestas en superficie por eventos estructurales (fallamiento).

Dentro de las unidades litológicas encontradas en el área, están las rocas basálticas, se presentan fuertemente alteradas en la mayoría de los lugares visitados, exceptuando en las cercanías del cerro Juan Sapo donde se encontró roca fresca con características de dique.

Se realizaron diferentes técnicas para la caracterización hidrológica de la zona como: clasificación, estimaciones de temperatura, identificación de la recarga y descarga del sistema y finalmente con la recopilación e interpretación de los resultados de las técnicas aplicadas se elaboró un modelo conceptual geoquímico, en donde se tomó en cuenta estudios realizados en zonas cercanas al Cerro Juan Sapo, la geología Local y la química de los fluidos.

Por medio del diagrama de Piper se pudo observar la clasificación de los tipos de agua que se muestrearon en el área de estudio Cerro Juan Sapo. Para la clasificación se tomó en cuenta los iones de mayor concentración SO_4^- , Cl^- , HCO_3^- , Na^+ , Ca^+ que representan los cuerpos de aguas muestreado (Manantiales, Pozos perforados, Pozos escavados), las aguas de área Cerro Juan Sapo son aguas sulfatas lo que nos da un indicio que son aguas calentadas por vapor producto de la mezcla de fluidos ascendentes con aguas superficiales, también se puede mencionar que existen en esta zona aguas cloruradas

producto de mezcla, condensaciones y enfriamiento que están yendo a descargar a la zona sur del área del estudio.

Se utilizó el diagrama de Langelier para identificar si las aguas que se tomaron en la zona pertenecen al mismo sistema, se pudo apreciar a través de diagrama que las aguas presentaban una tendencia por tanto efectivamente pertenecían al sistema de interés.

Se realizaron estimaciones de temperatura por medio del diagrama de Giggenbach y geotermómetros de cationes en donde se puede mencionar que las temperaturas estimadas coinciden con valores entre 150-155°C, se puede apreciar también que la mayoría de los aguas son aguas inmaduras en donde se encuentran algunas de ellas tendiendo a aguas parcialmente equilibradas principalmente las aguas de la zona de aguas calientes.

El diagrama de Piper nos ayudó a corroborar la información geológica y los estudios posible recarga de esta zona se pudo evidenciar de una forma esquemática la circulación de los fluidos a través de la fallas regionales de la zona de estudio.

Para futuros estudios y una mejor comprensión del sistema de Cerro Juan Sapo se recomienda y realizar estudios de geofísica como gravimetría, estudios magnéticos y gases difusos para delimitar mejor el área de estudio.

2.Introducción

Nicaragua posee un gran potencial geotérmico asociado a la cordillera de los maribios y a la zona de subducción en la costa pacífica, La Cadena Volcánica de Los Maribios consiste de volcanes activos, algunos lagos, estructuras volcánicas y áreas extensivas de actividad hidrotermal, denota alteraciones del gradiente térmico normal en algunas zonas que pueden ser utilizada para la generación de energía eléctrica.

La explotación comercial de los recursos geotérmicos inició en el año 1983, con la entrada en operación de la planta geotérmica de Momotombo, la cual tiene actualmente una capacidad instalada de 77 MW. Un segundo campo geotérmico, San Jacinto-Tizate, fue descubierto en el año 1993 y evaluado por medio de la perforación y prueba de varios pozos profundos. Actualmente este proyecto se encuentra en explotación con una capacidad instalada de 72 MW.

Una de las metas del Gobierno de Nicaragua es la de explorar el aprovechamiento en mayor medida de las fuentes de energía geotérmica, Ya que la energía geotérmica ha probado tener un costo efectivo en muchos países donde las condiciones geológicas, hidrológicas y geofísicas son favorables para la formación de sistemas geotérmicos. La geoquímica es una de las ciencias más importantes en la exploración, que nos proporciona valiosa información de las áreas de investigación por medio del quimismo de las aguas, por lo que nos da indicios de un reservorio geotérmico, Una de las maneras de estimar las temperaturas de los reservorios geotérmicos es utilizando geotermómetros, diagramas ternarios, diagrama de especies, etc.

El área de Cerro Juan Sapo se localiza al NE del complejo volcánico San Cristóbal entre los Municipios de El Sauce y Achuapa, ambos del departamento de León; El municipio Achuapa se encuentra ubicado en la zona norte del Departamento de León, Su extensión territorial es de 416.24 km² está ocupado por 20 comarcas y el casco urbano, la cabecera departamental (León) se ubica a 210 km de Managua.

Achuapa limita al norte con el municipio de San Juan de Limay, al sur con El Sauce, Al este con Estelí, Al Oeste con Villanueva, municipio del Departamento de Chinandega, Presenta un clima tropical seco con una temperatura media anual de 26°C con un mínimo de 24.7°C en el mes de noviembre y un máximo de 32.2 °C en el mes de abril. La población total es de 30, 440 habitantes (Censo, 1995).

Extensión del área en estudio

El área en estudio tiene una extensión aproximada de 64 km². Incluye mayormente las zonas rurales de Achuapa y el Sauce pasando por las comarcas, Los Tololos, Aguas calientes, la Flor.

En el presente trabajo se realizara una interpretación de datos geoquímicos del Área de Cerro Juan Sapo proporcionados por el laboratorio del ministerio de energía y minas de Nicaragua, con el propósito de evaluar esta área prospecto y obtener un modelo conceptual preliminar que complemente la información geológica.

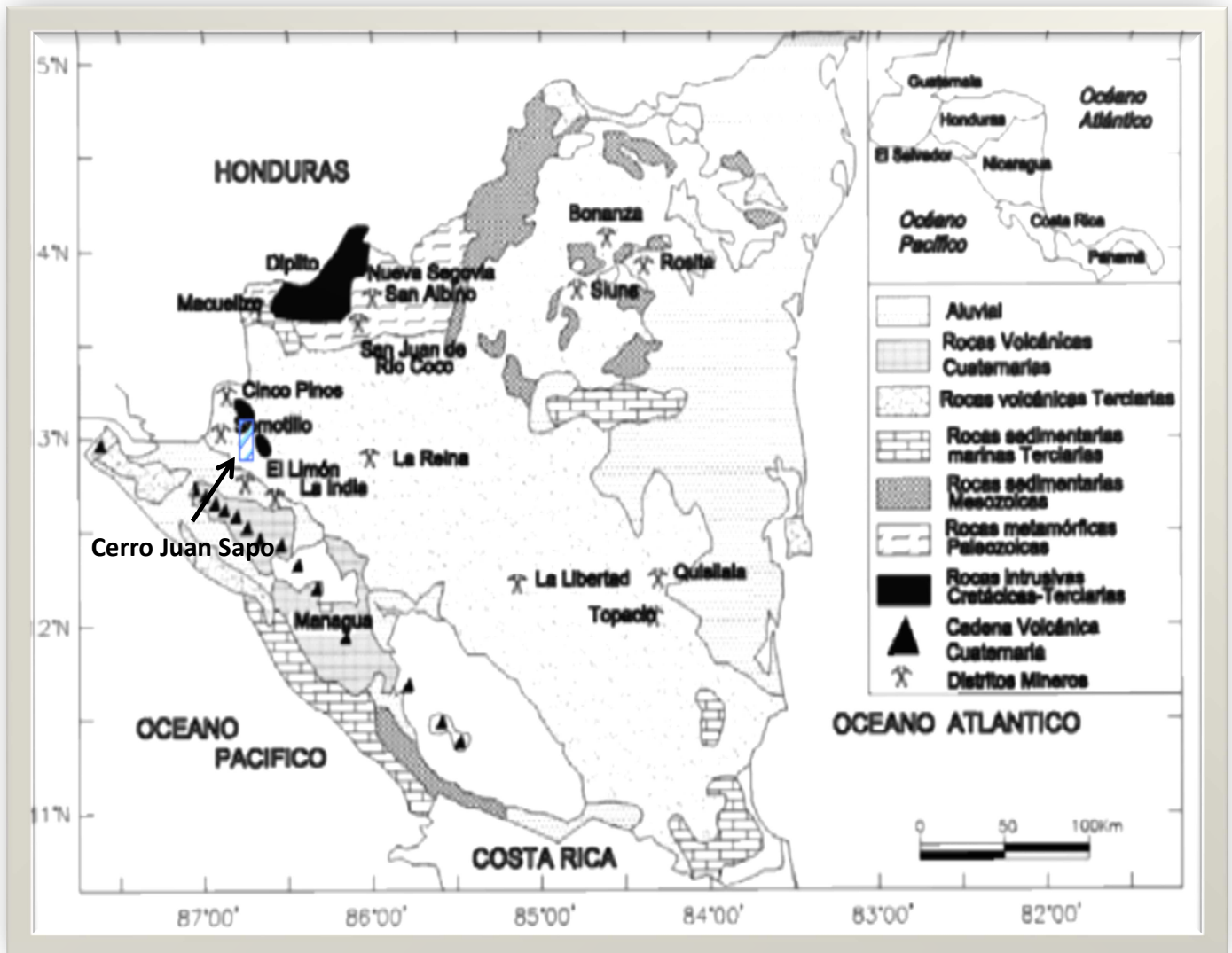


Ilustración 1, Mapa Geológico de Nicaragua y área de investigación Cerro Juan Sapo

3. Planteamiento del problema

El presente trabajo se realizó con el objeto de investigar las características hidrogeoquímicas del Área de Cerro Juan Sapo seleccionada por la Dirección Geotermia del Ministerio de Energía y Minas de Nicaragua para realizar estudios de interés de desarrollo geotérmico, con el propósito de tener información y promover las Energías Renovables

4. Justificación de Estudio

En la actualidad se ha venido desarrollando el uso de las energías renovables en Nicaragua debido a la gran dependencia de los combustibles de origen fósil. Es por ello que siendo un país virtuoso de riquezas naturales se ha creado metas para un cambio de matriz energética en donde la geotermia juega un papel preponderante para estas proyecciones, por lo que la Dirección de Geotermia del Ministerio de Energía y Minas impulsa el estudios de nuevas áreas de interés que servirán como actualización para el plan maestro geotérmico de Nicaragua y el desarrollo a futuro de las áreas.

5. Objetivos

5.1 Objetivo General

Realizar un modelo conceptual geoquímico para el sistema Geotérmico Cerro Juan Sapo.

5.2 Objetivos Específicos

Clasificar la composición química de los fluidos del sistema geotérmico

Estimar la temperatura del Reservorio a través de geotermómetros

Identificar la recarga y descarga del sistema

Realizar un esquema de la probable circulación de los fluidos

.

.

6.Marco Teórico

6.1Tipos de Sistemas Geotérmicos

La energía geotérmica es aquella energía que puede obtenerse mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra; Este calor interno calienta hasta las capas de agua más profundas: al ascender, el agua caliente o el vapor producen manifestaciones, como los géiseres o las fuentes termales y se encuentran en regiones, con un gradiente geotérmico normal (15 a 30 C/km) o levemente superior, especialmente en regiones alrededor de los márgenes de placas donde gradiente es más alto que el valor promedio.

Un sistema geotérmico está constituido por tres elementos principales: Una Fuente de Calor, un reservorio y un fluido el cual es el medio que transfiere el calor.

•La fuente de calor:

- Intrusión magmática a alta temperatura (>600 C) a profundidades someras (5-10 km).
- Corrientes convectivas de fluidos a alta temperatura
- Reacciones exotérmicas dentro de la Corteza
- Fricción entre capas generadas por fallamientos.
- Calor Latente liberado por la cristalización del Magma.
- Calor liberado por el decaimiento radioactivo en el interior de la tierra.

El reservorio es un volumen de rocas calientes permeables del cual los fluidos circulantes extraen calor. Característica deseada **alta porosidad, alta permeabilidad, alta temperatura**. El reservorio está cubierto por rocas impermeables (**Capa Sello**) y está conectado a un área de **recarga** superficial a través de la cual el agua meteórica puede reemplazar los fluidos que se escapan del reservorio a través de fuentes termales o pozos perforados (**Descarga**). El fluido geotermal es agua en la mayoría de los casos de origen meteórico, ya sea en la fase líquida o en la fase vapor, dependiendo de su temperatura y presión. Las aguas contenidas en el reservorio contienen sustancias químicas disueltas y gases tales como CO₂, H₂S, etc. El mecanismo que sustenta los sistemas geotérmicos está controlado por la Convección de fluidos. Otra división de los sistemas geotérmicos se basan en el estado de equilibrio del reservorio (Nicholson, 1993), que considera la circulación de los fluidos del reservorio y el mecanismo de transferencia de calor.

Sistemas dinámicos: El reservorio se recarga continuamente con agua que es calentada y entonces descargada desde el reservorio a la superficie o en formaciones permeables en sub-superficie. El calor es transferido en el sistema por convección y circulación de fluido. Esta categoría incluye sistemas de alta temperatura (>de 150 C) y baja temperatura (< 150 °C).

Sistemas estáticos (también conocidos como sistemas estancados o almacenados) hay una mínima o nula recarga al reservorio y el calor es solo transferido por conducción. Esta categoría incluye sistemas de baja temperatura y sistemas geopresurizados

Los sistemas geopresurizados se encuentran habitualmente en grandes cuencas sedimentarias (por ej.: Golfo de México, USA) a profundidades de 3 a 7 km. Los reservorios geopresurizados consisten en rocas sedimentarias permeables, intercalados en estratos impermeables; el agua presurizada permaneció atrapada desde el momento de la depositación de los sedimentos. La presión del agua caliente es cercana a la presión litoestática, excediendo por mucho la presión hidrostática. Los reservorios geopresurizados también pueden contener cantidades significativas de metano y podrían producir energía térmica e hidráulica (aguas calientes presurizadas) como también gas metano. Estos recursos han sido intensamente investigados pero aún, no han sido industrialmente explotados.

Sistemas de roca caliente seca

Los sistemas de roca caliente seca se caracterizan por estar constituidos por rocas impermeables, con temperaturas entre 150 °C y 300 °C, y por carecer de acuífero. La impermeabilidad del sistema, su baja conductividad térmica y la carencia de un fluido que lo recorra constituyen el escollo principal para su explotación. De hecho, a pesar de representar estos sistemas un porcentaje muy elevado de los recursos geotérmicos mundiales, aún se encuentran en la etapa de investigación.

El criterio más común para clasificar los recursos geotérmicos es el basado en la Entalpía de los fluidos, que actúa como medio de transporte desde rocas calientes en profundidad hasta superficie.

Los recursos geotérmicos se dividen en baja, media y alta entalpía (o temperatura), de acuerdo con criterios basados en la energía contenida en los fluidos y en su posible forma de utilización.

6.2 Clasificación de las aguas

Aguas cloruradas

Son aguas que usualmente se asocian a zonas profundas en donde el contenido de sales disueltas es alto, el mayor componente de estas sales son el cloruro y el sodio.

Tienen las características de contener alto contenido de sílice sulfatos, bicarbonato, fluoruro, amonio, arsénico, litio, rubidio, cesio y ácido bórico.

El rango de pH es moderadamente alcalino (5-9). Los gases disueltos relacionados con estas aguas son el dióxido de carbono y sulfuro de azufre, estas aguas proceden de manantiales en ebullición y son características de aguas geotérmicas son consideradas elementos conservativos.

Aguas Ácidas Sulfatadas

Estas aguas contienen bajo contenido de cloruro, Se asocian a la formación en las áreas geotérmicas de origen volcánico donde el vapor está por debajo de 400°C y luego se condensa al mezclarse con aguas superficiales.

El sulfuro de hidrogeno del vapor es oxidado a sulfato. Estas aguas pueden ser encontradas en áreas donde el vapor sube desde el agua subterránea de altas temperatura y en áreas volcánicas donde en etapas de enfriamiento solo el dióxido de carbono y gases de sulfuro permanecen en el vapor que sube hacia la roca. Los constituyentes que se encuentran en el agua son lixiviados a través de la interacción con la roca.

Aguas Bicarbonatadas Sódicas

Su principal componente son los bicarbonatos son originadas por disolución de CO₂ o por la condensación de vapor geotérmico en acuíferos libre de oxígeno no son de origen profundo por lo general. Debido a la ausencia de oxígeno se evita la oxidación de H₂S, la acidez de estas soluciones es debida a la disociación de H₂CO₃. A pesar de ser un ácido débil convierte los feldespatos y arcillas, generando soluciones acuosas neutras, las cuales son ricas típicamente en sodio y bicarbonato, particularmente a temperaturas alta-media.

La baja solubilidad de la calcita proviene de las soluciones acuosas que aumentan su contenido en calcio.

Potasio y Magnesio se fijan en arcillas y cloritas, respectivamente; La concentración de sulfato está limitada por la baja solubilidad de la anhidrita.

Aguas Sulfato Ácidas Sulfatadas-Cloruradas

Estas asociadas a muchos procesos, como:

1. Mezcla de aguas cloruradas y sulfatadas
2. Condensación de gases volcánicos con aguas superficiales
3. Condensación de vapor magmático
4. Paso de fluidos clorurados a través de secuencias sulfato-soporte (Evaporitas) o litología que contenga sulfuro nativo.
5. pH entre 2-5 unidades y sulfato en proporciones iguales aproximadamente.

Las aguas de los procesos anteriores pueden ser identificadas por altas concentraciones de Cl, SO₄⁻² y alto fluoruro.

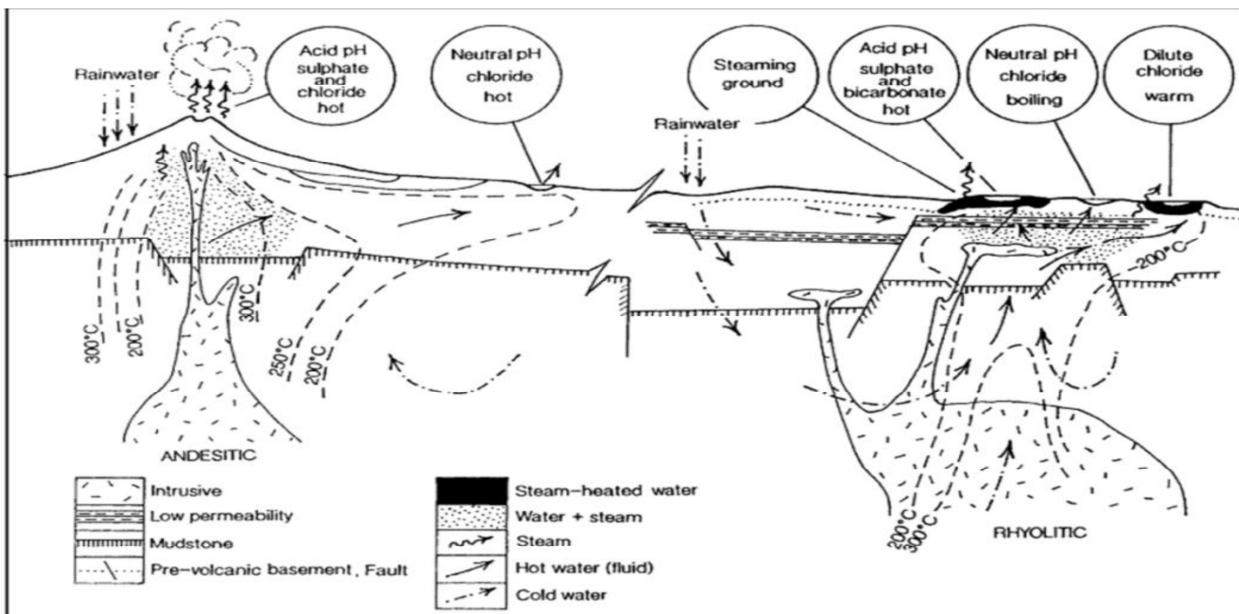


Ilustración 2, Esquema de Tipos de aguas. (Henry R.W. Introduction to geochemistry of active and fossil.

6.3 Diagrama de Piper:

Esta grafica es utilizada para clasificar las aguas de acuerdo a los iones que se encuentran en mayor concentración, permite representar muchos análisis sin dar confusiones, el propósito de este diagrama es agrupar las aguas químicamente en área definidas.

Consta de dos triángulos equiláteros que están conformados por los aniones y cationes, uno de los vértices está compuesto por los cationes (Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺+K⁺); los vértices del otro triangulo representa los aniones (SO₄⁻², Cl⁻ y HCO₃). Los datos se grafican en un rombo central que nos representa la clasificación del agua a partir de las especies que presentan mayor concentración.

Las concentraciones que se grafican tienen que estar dadas en meq/l las cuales se expresan en porcentaje con respecto a la suma de todas las especies.

6.4 Diagramas Triangulares

Diagrama Cl-SO₄-HCO₃

La mayoría de las técnicas geoquímicas pueden ser aplicadas con confianza únicamente a determinados tipos de fluidos con rangos limitados de composición. Cualquier interpretación de las muestras de agua geotérmica, por lo tanto, es mejor llevada a cabo sobre la base de una clasificación inicial. El diagrama ternario Cl - SO₄ - HCO₃ es una de las 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 C_i (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 HCO₃, entonces D = % HCO₃ + 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 geoindicadores comprenden las aguas neutrales con bajo sulfato, alto cloruro "aguas geotérmicas" a lo largo del eje de Cl-HCO₃, 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 CO₂ a más bajas temperaturas, y de los crecientes contenidos de HCO₃ 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.

El Diagrama Cl-SO₄-HCO₃ puede ser utilizado para clasificar aguas geotérmicas especialmente y para eliminar aguas no adecuadas para técnicas geoquímicas (Giggenbach, 1988).

6.5 Diagramas Binarios

Son representaciones gráficas de las fases presentes en un sistema a varias temperaturas, presiones y composiciones.

La información que se obtiene es: Las fases presentes en el sistema a diferentes composiciones y temperaturas bajo condiciones de enfriamiento lento (equilibrio), La temperatura a la cual las diferentes fases comienzan a fundirse y la presencia de fenómenos de alotropía o polimorfismo en estado sólido.

La importancia de estos diagramas radica en que nos hace una representación gráfica de la variación de cualquier parámetro con el tiempo en un punto determinado, por ejemplo, manifiesta las tendencias, variaciones y evolución al compararse con otros parámetros al relacionar las especies de interés.

6.6 Geotermómetros

Los Geotermómetros o termómetros geoquímicos son utilizados para estimar temperaturas del subsuelo o de los reservorios geotérmicos. Existen tres categorías:

Geotermómetros de solutos de gas y de isótopos. A la misma vez los geotermómetros de soluto pueden subdividirse en dos grupos: Los que se basan en variaciones que dependen de la temperatura y en la solubilidad de los minerales y los que están basados en reacciones de intercambio iónico a diferentes temperaturas y que se basan en los diferentes equilibrios entre aguas-roca.

Geotermómetros de sílice.

Están basados en temperaturas dependientes de las variaciones de solubilidad de las especies de sílice. El contenido de sílice de un agua de un manantial caliente o un pozo puede ser correlacionado con la última temperatura de equilibrio. La solubilidad de la sílice es función de la presión, temperatura y salinidad. Sin embargo a temperaturas por debajo de 300 °C, variaciones en las presiones a condiciones hidroestáticas tiene poco efecto en la solubilidad del cuarzo y sílice amorfa (Fournier and Potter, 1982; Fournier and Rowe, 1966).

El geotermómetro de cuarzo trabaja mejor para aguas en el rango de temperatura superficial de 120-150 °C (Arnórsson et al., 1983a; Arnórsson, 2000). Con temperaturas más altas 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 (Fournier and Rowe, 1966; Fournier, 1973; Arnórsson, 1975).

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.

Tabla 1, Geotermómetros utilizados

Geotermómetro	Ecuación	Restricción
Calcedonia, Fournier, 1977	$T = 1032 / (4.69 - \text{LOG}(\text{Si})) - 273.15$	0 – 250 °C
Quartz, Fournier, 1977	$T = 1309 / (5.19 - \text{LOG}(\text{Si})) - 273.15$	25 - 250°C
Na/K, Arnorsson 1983	$T = 933 / (0.993 + \text{LOG}(\text{Na/K})) - 273.1$	25-250°C
Na/K, Fournier 1979	$T = 1217 / (1.438 + \text{LOG}(\text{Na/K})) - 273.15$	
Na/K Giggenbach	$T = 1390 / (1.75 + \text{LOG}(\text{G2/H2})) - 273.1$	
Na/K/Ca	$T = 1647 / (\text{LOG}((\text{Na}/23) / (\text{K}/39.098)) + 0.3 * \text{LOG}((\text{Ca}/40.078)^{0.5} / (\text{Na}/23)) + 2.24) - 273.15$	

6.7 Diagramas de STIFF

Los diagramas de Stiff son un procedimiento gráfico con muchas ventajas; Este sistema presenta una mejor imagen del total de la concentración de sales que todos los otros métodos gráficos así como los efectos de dilución o concentración que han sido reducidos al mínimo y al mismo tiempo mejorar la distinción entre variados tipos de agua.

Esta grafica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na^+ se confronta con el Cl^- , el Ca^{2+} con el HCO_3^- y el Mg^{2+} con el SO_4^- (a veces también se pueden mostrar otros iones dos iones, como el Fe^{2+} contra el NO_3^-). Todos los ejes horizontales están a la misma escala lineal y las concentraciones dadas en meq/l.

Dos características sobresalen en este tipo de diagrama: Por un lado permite visualizar claramente diferentes tipos de aguas en forma simultánea y permite dar una idea de la mineralización (ancho de la gráfica).

6.8 Descripción del Área de Estudio Cerro Juan Sapo

Geología Regional

La interacción entre las Placas Cocos, Nazca y Caribe con las Placas Norte y Suramericana producen un complicado patrón estructural de la corteza terrestre en Centro América.

Varios eventos geotectónicos se superponen desde el Jurásico, la triangular Placa de Cocos limita en el oeste con la parte Este de la Placa Pacífico, hacia el sur con la Placa de Nazca esta parte es conocida como la grieta de Galápagos, en el norte con la Placa Norteamericana y en el Noreste con la Placa Caribe por Centro América en la zona de subducción a lo largo de la Fosa Mesoamericana.

El territorio de Nicaragua representa la parte sur del Bloque Chortis, que limita por la parte noroeste de la falla sinistral Polochic-Motagua (incluyendo la Fosa Caimán) y en la parte sureste por el Escarpe de Hess. La corteza oceánica del mar Caribe fue considerada como remanente de la meseta basáltica oceánica, la cual es una cuña entre las Placas Norte y Sur americanas.

Geología Local

Geológicamente la zona de estudio pertenece a la Provincia de las Montañas del Interior representadas por la Cordillera volcánica y parte de la depresión de Nicaragua.

La topografía de la región está caracterizada por colinas de mediana elevación, montañas altas, valles anchos y profundos, los cuales están formados por la acción erosiva de los ríos.

Las rocas existentes en el área de estudio corresponden a material volcánico que se extienden desde el terciario al cuaternario (basaltos), en los lechos de los ríos se observó material aluvial cuaternario y rocas metamórficas de origen sedimentario como las cuarcitas, que se infiere quedaron expuestas en superficie por eventos tectónicos.

Dentro de las unidades litológicas encontradas en el área, están las rocas basálticas, se presentan fuertemente alteradas en la mayoría de los lugares visitados, exceptuando en las cercanías del cerro Juan Sapo donde se encontró emplazados a manera de dique.

En la comarca Los Tololos, al este de la zona de estudio, las rocas basálticas se encontraron pervasivamente alteradas y convertidas en suelo arcilloso de color blanquecino, En las laderas del cerro Juan Sapo al SE de la zona, se encontró deslizamientos de grandes fragmentos de basaltos, provenientes de las partes superior del cerro, estos fragmentos se encuentran alterados y son de color gris oscuro.

En la misma zona del lado NO del cerro, se encontró una falla regional con dirección N27, la cual se extendía por varios metros del afloramiento y marcaba una diferencia en características físicas de una misma litología, a un costado del plano de falla aflora roca basalto en buenas condiciones, de color gris, con fracturas múltiples, N312, N150, N140 y

con dirección SO, del otro lado del plano se observa una roca alterada el 95%, convertida en arcilla, de color blanquecino; a lo cual se puede inferir que producto del movimiento de la falla en algún tiempo atrás, dio espacio a que se emplazaran magmas básicos en formas de dique, cortando la roca circundante que también es de origen basáltica.

Al NE sobre el río El Grande, se encontró un afloramiento masivo de cuarcitas en el lecho del río, la roca se encontraba fracturada, N200, N353, N130, buzando hacia el sur, este afloramiento estaba delimitado por dos fallas una a cada lado que marcaban el contacto de la cuarcita con los basaltos y el material cuaternario. Se analizó microscópicamente la muestra de roca CJS-P8 la cual está compuesta el 80% por cuarzo y el 20% se encuentran anfíboles (actinolita) y minerales accesorios.

Sobre el mismo río El Grande siguiendo al N, se encontró un afloramiento de basalto fracturado, fuertemente alterado y que presenta un color café rojizo debido al alto porcentaje de óxido de hierro que contiene basalto con alto contenido de oxidación, Estos mismos afloramientos de basaltos se observan a lo largo del lecho del río disminuyendo así la presencia de cuarcita en pocas exposiciones y asociándose a diques afaníticos, melanocráticos de composición básica, fracturado N30, N20, N35 y masivos, cabe destacar que el Cuaternario indiferenciado formado por aluviones antiguos, de diferente composición como suelos arcillosos por la degradación de los diferentes tipos de rocas volcánica se extiende al Oeste y Suroeste de la zona de estudio.

Estructuralmente encontramos lineamientos regionales como el que se presenta al Este de la zona de estudio, en la comarca Los Tololos a orillas del cerro Juan Sapo, la falla encontrada tiene orientaciones N-S, E-W y en la cual se emplazó un dique básico, esa misma situación se notó en dos afloramientos a lo largo del río El Grande donde se encontraron dos diques básicos; Así mismo en la parte Este del río en la zona de estudio se localizaron dos fallas regionales que posiblemente son las causantes de la exposición de la cuarcita en superficie, ya que marcan propiamente los contactos de esta misma, aunque no se pudo observar con mayor detalle debido al material aluvional cuaternario existente en la zona.

Las aguas de la comarca de aguas calientes ubicada al NO del Cerro Juan Sapo presentan características representativa de una zona anómala al observarse termales con temperaturas próximas entre 40-55°C, variaciones que son notorias si tenemos en cuenta que la temperaturas típicas de la zona son de 32°C. La conductividad de estas muestras se encuentra entre 1391-1766 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que nos indica que estas aguas son mezclas en su mayoría de agua superficial.

Esta zona se caracteriza por la predominancia de las aguas sulfatadas, en la tabla de los resultados analíticos (Ver Anexos, Tabla 1), La información analítica reflejo una elevada concentración de sulfato (404-459 mg/L), calcio (58-114 mg/L), Sodio (160-170 mg/L).

La composición analítica de los elementos minoritarios y trazas indican la existencia de concentraciones bajas como el lito, boro, As, Fe, con valores que no sobrepasan 0.05 ppm. Se pueden mencionar también que se encontraron valores de sílice entre 49-72 ppm.

Para la determinación de las temperaturas se utilizaron los geotermómetros de sílice los cuales fueron descartados por presentar las temperaturas más bajas y no eran consistentes al evaluarlos con los geotermómetros de Na-K, Na-K-Ca. Los valores obtenidos oscilaron entre 101-119°C (Sílice No perdida de vapor), 101-118 (Max perdida de vapor), y los valores que se han tomado como referencia para el cálculo de la temperaturas de sistema se encuentran entre 134-197°C.

Para la zona ubicada al SE del cerro (Los Tololos), se caracterizó por la predominancia de las aguas cloruradas encontrándose concentraciones entre 53-355 mg/L, lo que es típico de la zona de descarga de los sistema geotérmico, las temperaturas para zona oscilan entre 28.6-29.1°C, lo que nos indicio de procesos de mezcla y de enfriamiento.

Manifestaciones geotérmicas

Las manifestaciones termales están localizadas en la parte NE del área de estudio, la primera se localiza en el camino al poblado de aguas calientes, sobre una quebrada del mismo nombre que proviene del río principal El Grande, las mediciones de temperaturas arrojaron rangos máximos de 55.4°C con PH de 7.47, conductividad de 1766 μS y un rango de flujo de 0.1 l/s, el agua que fluye en la quebrada es fría, solamente en ese punto exacto es que cambia la temperatura, el agua brota con pequeñas burbujas que ascienden, no tiene ningún olor sulfuroso, los alrededores del punto están llenos de materia orgánica producto de la vegetación, por lo cual se tiende a ver una tonalidad verdosa en el agua.

El segundo punto encontrado con aguas calientes fue un pozo perforado, con temperaturas en el rango máximo de 42.1°C con PH de 7.92 y una conductividad de 1,534 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el pozo se encuentra clausurado.

El tercer punto es otro pozo excavado con temperaturas de 55.8°C con un PH de 8 y una conductividad de 1723 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

El cuarto punto es un pequeño manantial que se encuentra sobre el lecho del río El Grande se midieron temperaturas en el rango máximo de 40°C, no se pudo tomar otros parámetros físicos como PH y conductividad, el aspecto del agua es clara y con alteraciones de azufre que corren en una pequeña escorrentía hacia el río.

En el Quinto punto las manifestaciones geotérmicas se encuentran siempre sobre el río El Grande con temperaturas en el rango máximo de 40.3 °C con un PH de 6.93 y una conductividad de 1,391 μS , con características similares a las anteriores descritas, el quinto punto presento temperaturas máximas en el rango de 51.3-56.7° C con un PH de 7.44 y una conductividad de 1,822, el sexto punto se midieron temperaturas máximas de 42.2°C, un PH de 7.70 y una conductividad de 1,560 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

7. Metodología

7.1 Recopilación de Información

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

Muestreo y análisis de fluidos geotérmicos

Para la toma de muestras de aguas se planificó el muestreo de pozos y manantiales que se encontraban próximo a la zona de estudio en donde la cantidad fue considerada por los puntos calientes y los valores de conductividad y pH tratando de recoger un número razonable de muestras de aguas termales y no termales, distribuidas por toda el área de estudio. El análisis de los siguientes constituyentes: Li, Na, K, Mg, Ca, alcalinidad, SO_4 , Cl, B, SiO_2 y otros componentes adicionales se realizaron con el fines de investigar problemas específicos y para interpretaciones de los resultados.

Para el levantamiento hidrogeoquímico se planificó realizarse en dos estaciones para este trabajo solo se muestreo la estación seca para obtener muestras de agua menos afectados por la mezcla con el agua de superficial o de lluvia y luego hacer una comparación entre las estaciones para observar el comportamiento y la variación de los niveles que sufren las aguas.

Con el propósito de garantizar la calidad del muestreo y no aplicar malas técnicas que den datos erróneos, todos los equipos y materiales de muestreo se verificaron con sus respectivos estándares de calidad varios días antes de realizar la campaña de muestreo.

Trabajo de campo

Con el fin de simplificar la logística, las operaciones de campo deben ser minimizadas. Sin embargo algunas especies son inestables, por lo que deben ser analizadas en el campo o conservadas por medio de tratamientos a la muestra tomada, tales como filtración, acidificación, y dilución.

Para la preservación de las muestras se filtraron las muestras de aniones, Se acidifico y filtro las muestras cationes en campo con el objetivo de prevenir el crecimiento de algas y evitar que se llevase a cabo la separación de constituyentes químicos disueltos, tales como NH_3 y SO_4 , y la obstrucción de instrumentos de laboratorio durante el análisis del agua. La filtración se lleva a cabo habitualmente a través de un Filtro de membrana de 0,45 micras.

La acidificación es necesaria para preservar contenido de cationes de las aguas de alta temperatura, que se convierten en sobresaturada tras el enfriamiento y para prevenir la precipitación de metales traza tanto de las aguas de alta temperatura y baja temperatura.

La acidificación se realiza por la adición de HNO_3 concentrado, Con el fin de evitar la disolución de sólidos en suspensión, no se acidifica el agua no filtrada!

Dado que la precipitación de SiO_2 de aguas sobresaturadas, acompañado por co-precipitación de elementos traza (por ejemplo, Al), se lleva a cabo incluso a pH tan bajo como 1.5, la dilución de muestras es aconsejable para la determinación de sílice.

Basándose en las observaciones anteriores, las siguientes alícuotas de las muestras son generalmente recogidas:

Una alícuota filtrada acidificada para la determinación de cationes.

Una alícuota filtrada para la determinación de aniones.

Una alícuota diluida (1:10) para la determinación de sílice.

El tamaño de la muestra depende del número de componentes a determinar y de los requisitos de laboratorio. Para la toma de la muestra se usan botellas de polietileno de 500 ml, 125ml y 60 ml.

Las mediciones que realizaron en campo son:

Temperatura, que se midió con una termocupla

pH y conductividad eléctrica medida con un multiparamétrico

El pH-metro utilizado en la medición fue un equipo digital portátil equipado con un electrodo combinado;

La conductividad por medio de un conductímetro digital portátil equipado con una celda adecuada (rango 0.1-100,000 S / cm);

Alcalinidad por valoración acidimétrica con HCl 0,02 N y naranja de metilo como indicador.

Para la identificación de las muestras se realizaron etiquetas que contenían el número de muestras asignado por el laboratorio y otros detalles que deben ser escritos en las botellas utilizando rotulador indeleble. Los resultados de los análisis de campo y otros detalles de muestreo tienen que ser escritos en un cuaderno de campo.

La exploración del área de Cerro Juan Sapo se inició con la colección de muestras en el año 2012. Se colectaron un total de 15 muestras, las fuentes consistieron en manantiales, ríos, pozos excavados y perforados. La metodología inicial involucró un reconocimiento de campo para la recolección de las muestras de aguas, a las muestras colectadas se le realizaron los análisis de laboratorio correspondientes.

7.2 Descripción de los métodos analíticos utilizados

Los análisis químicos de cationes y aniones en las muestras de agua, fueron hechos en el laboratorio de Geoquímica Geotérmica del Ministerio de Energía Minas. Para analizar cationes se utilizó la técnica espectrometría de absorción atómica, utilizándose un Espectrofotómetro de Absorción Atómica con Horno de Grafito Marca: Varian Modelo: 240 y 120 (HG) respectivamente. Los cationes analizados fueron: Al, As, Ca^{2+} , Cu^{2+} , Fe, K^+ , Li,

Mg²⁺, Na⁺, Rb, Cs. Para analizar aniones (excepto HCO₃⁻ y CO₃²⁻), se utilizaron los siguientes equipos: Cromatografo de Iones (IC), modelo IC 861Advanced Compact-Methrom (Cl⁻, SO₄²⁻) y Espectrofotómetro UV-VIS Marca: Varian Modelo: Cary 50 (B, SiO₂⁻, SO₄²⁻). Para analizar HCO₃⁻ y CO₃²⁻ se utilizó titulación volumétrica.

7.3 Evaluación de la calidad de los resultados

Para verificar si los análisis químicos de las aguas son los correctos, se utiliza un Balance Iónico (BI) de los componentes disueltos en las aguas. Aunque el BI no es un procedimiento válido para aguas 'no potables' (Murray y Wade, 1996), se utiliza habitualmente en aguas termales para verificar los análisis (e. g. Publications of The United Nation University Geothermal Training Programme, Marini, 2000). El BI se basa en el porcentaje de diferencia, entre las cargas positivas y negativas totales, Como el agua es un medio sin carga eléctrica, los cationes deben compensar a los aniones en la solución. El BI se considera aceptable cuando su valor absoluto es menor al 10%. Se define de la siguiente manera:

8. Análisis de Datos

8.2 Clasificación de las aguas, Diagrama de Piper.

Por medio del diagrama de Piper se puede observar la clasificación de los tipos de agua en el área de estudio Cerro Juan Sapo. Para la clasificación se tomó en cuenta los iones de mayor concentración SO₄⁻, Cl⁻, HCO₃⁻, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ que representan los cuerpos de aguas muestreado (Manantiales, pozos perforados, pozos escavados).

En la figura N° 2, se pueden observar la clasificación de los 3 grupos basados en el diagrama de piper, los cuales consisten en aguas Clorurada, Sulfatadas, Bicarbonatadas, en donde las aguas Sulfatadas pertenecen al primer grupo ubicadas en la comarca de agua caliente encontrándose dos manantiales (M-22, M-32) y un pozo perforado (PE-45) con temperaturas entre 43.3 - 55.8 °C. La información geológica asocia estas temperaturas al ascenso de fluidos a través de fallas regionales ubicadas (NO del río grande). Se encontró también afloramientos masivos de cuarzo en lecho de río en donde la roca presentaba fracturas múltiples (buzando hacia el sur) e incrustaciones de azufre.

Según los valores obtenidos para sulfatos, sodio, calcio estas aguas son producto de calentamiento a ciertas profundidades y que emergen hacia la superficie, esto se puede observar en el diagrama de Piper, ternario y al observar parámetros fisicoquímicos como la conductividad y pH, Los valores de calcio provienen posiblemente del reservorio geotermico y los valores de sodio se deban a interacciones intercambio catiónico por lo que este ion se hace más predominante.

En un segundo grupo encontramos las aguas cloruradas sódicas (PE-10, PE-12, PE-1) son pozos perforados ubicados en la zona de los Tololos en donde las características de estas aguas presentan una disminución en los sulfatos, sodio, potasio y un aumento en el magnesio con respecto a las encontradas en la zona de aguas calientes, Estas aguas son asociadas a los fluidos provenientes del reservorio con altos contenidos de cloruro se mezcla con acuíferos superficiales de la zona produciendo una dilución.

De acuerdo a la información obtenida se puede concluir que las aguas de esta zona son producto de la mezcla de un acuífero superficial con los fluidos que ascienden en la zona de aguas calientes.

En el tercer grupo tenemos las aguas Bicarbonatadas, El ion carbonato es característico de las aguas superficiales, Los pozos (PE-35, PE-38, PE-41, PE-42) no contienen componentes de origen geotérmico, esto se puede corroborar al observar la concentración baja de cloruro y la proporción alta de bicarbonato en la tabla de componentes químicos se pueden apreciar la concentraciones de los iones antes mencionados, Ver Tabla 1, Anexos.

La muestra del pozo PE-2 se encuentra entre las aguas bicarbonatadas y clorurada por lo que sobresale por esa faceta intermedia y nos indica que el producto de una mezcla entre las aguas provenientes el reservorio y acuíferos superficiales, esto se puede notar en la tendencia que tiene esta muestra hacia las aguas cloruradas.

La figura número 3, se utilizó como un complemento del diagrama de Piper para la clasificación de las aguas, e identificar si las aguas colectadas en el muestreo en la zona de estudio son de origen volcánico, calentadas por vapor o de acuíferos superficiales, también se puede observar en el diagrama posibles mezclas como el pozo PE-2 como se mencionó en el acápite anterior al evaluar el diagrama de Piper.

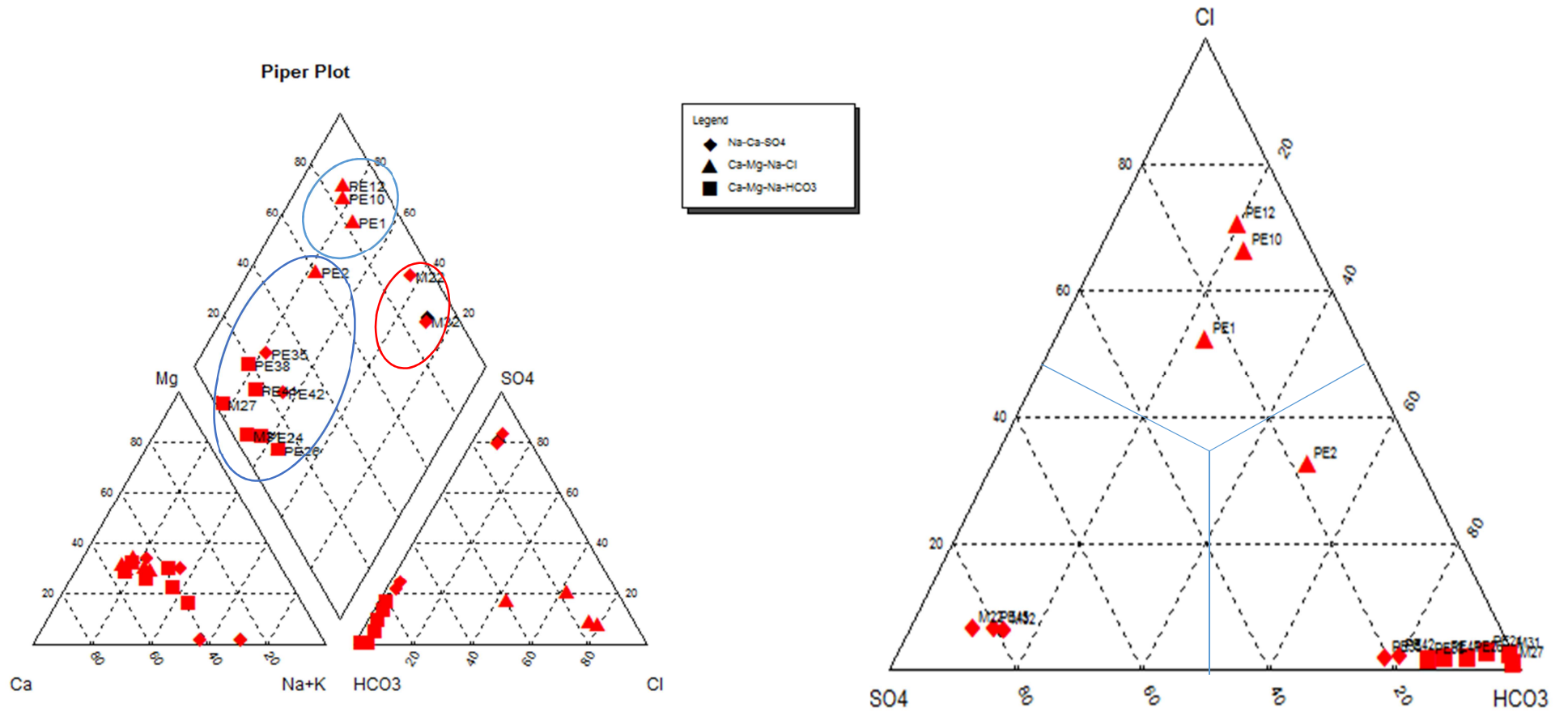


Ilustración 3,4 Diagrama de Piper y Diagrama Ternario

Para obtener una correlación de los iones que predominan en las aguas de Cerro Juan Sapo, Se elaboró un diagrama de Langelier con el propósito de conocer si todas las aguas del monitoreo pertenecen a un mismo sistema.

Figura Número 4.

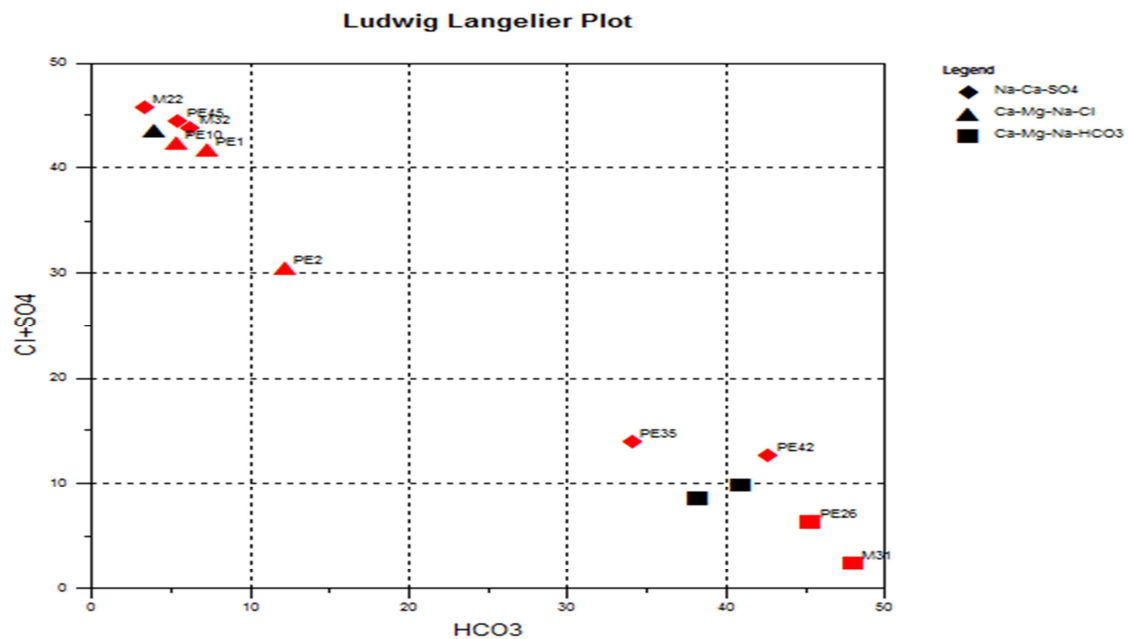


Ilustración 4, Diagrama Cl + SO₄ vs HCO₃

En la figura Número 4, se puede observar que existe una tendencia entre las muestras que se monitorearon en el área definida de Cerro Juan Sapo, Las aguas superficiales se encuentran en el lado inferior derecho, las aguas con contenido geotérmicos se encuentran al lado superior izquierdo. La muestra PE-2 se encuentra entre estas dos, indicando mezcla. Algunas muestras como M-22 y M-32 se encuentran en el mismo sitio de las muestras PE-45, PE-1, PE-10, indicando un origen común.

La figura Numero 5, complementa la información de la relación de las aguas que conforman el sistema geotérmico, este grafico consiste observar la relación Na-K elementos que se vinculan a procesos de mezcla.

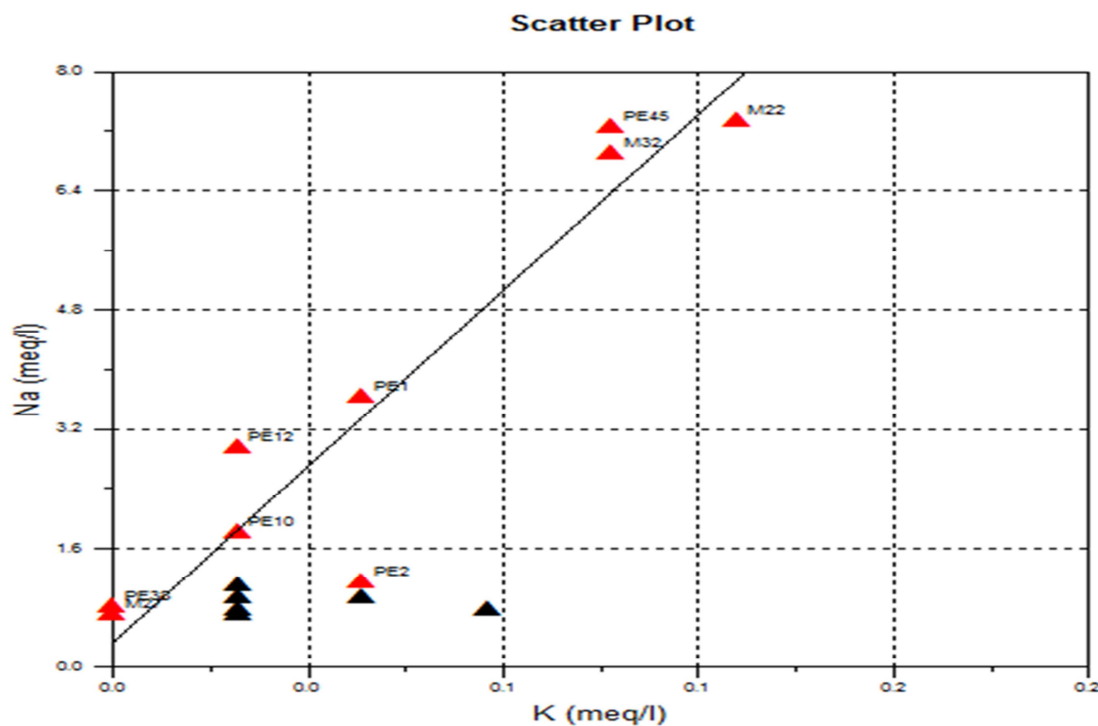


Ilustración 5, Diagrama de Na vs K

Se puede apreciar en la parte inferior del grafico Na-K se encuentran las aguas superficiales dentro de las cuales se puede mencionar que tienen una tendencia hacia las aguas con mayor contenido de sodio y potasio, se puede inferir que estas aguas presentan mayores concentraciones debido a los procesos dilución.

Esto también nos da un indicio al observar la línea de tendencia de que las aguas representadas en el grafico pertenecen al mismo sistema geotérmico.

8.4 Cálculos de Geotermómetros

La Figura 6, muestra la clasificación del equilibrio entre agua- roca, Se puede observar que la mayoría de las muestras caen dentro de la esquina del magnesio, al aplicar el diagrama de Giggenbach se pudo apreciar que la mayoría de las aguas son inmaduras. Esto es característico de las aguas que no han sido influenciados por aguas geotérmicas.

Las muestras M-32, M-22 y PE-45 son las más alejadas de la esquina del magnesio lo que indica que estas aguas están sufriendo procesos de mezclas y dilución. Tal como se puede apreciar en el diagrama de Langelier y en la tabla 1, referida a los componentes químicos de estas aguas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se realizó una proyección estimando una temperatura cercana a los 155 °C, la cual coincide con los valores de los geotermómetros de Na- K-Ca y Na-K que fueron utilizados también para las estimaciones de temperatura del sistema geotérmico. Ver tabla 2.

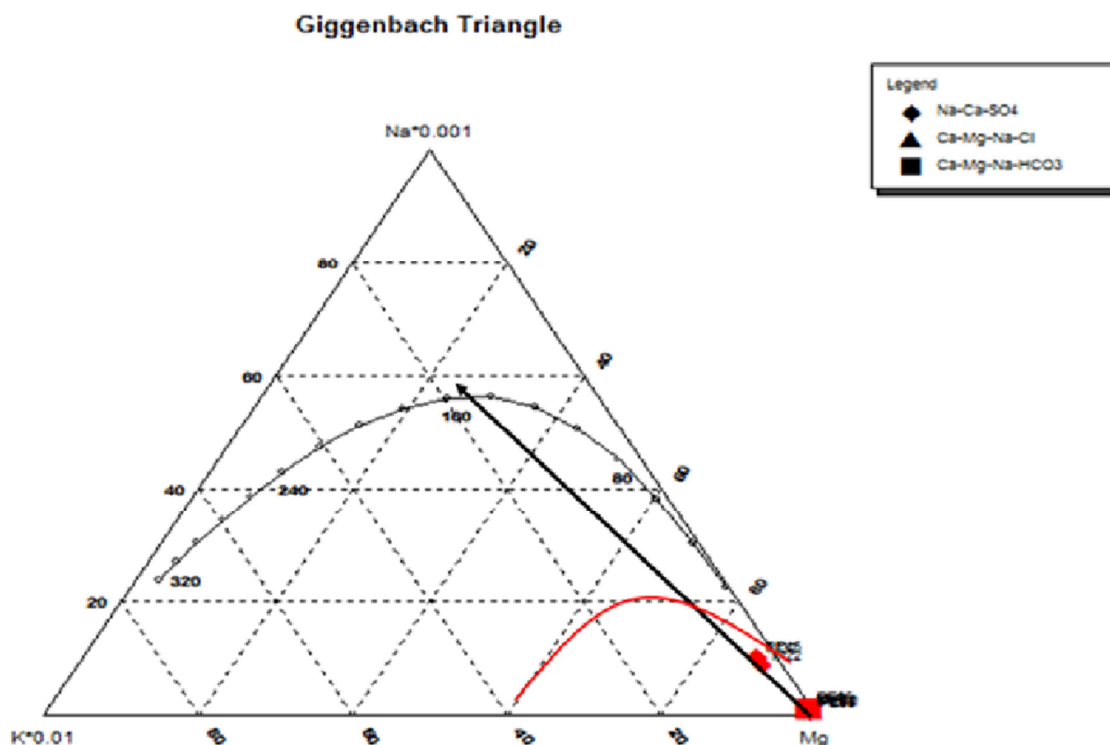


Ilustración 6, Diagrama de Giggenbach

Tabla 2, Cálculos obtenidos por Geotermometría

Origen Muestra	SiO ₂ . No steam loss	SiO ₂ . Max steam loss	Na/K. Fournier. 1979	Na/K, Tonani. 1980	Na/K. Giggenbach. 1988	Na-K-Ca
CJS-PE-2	109.4	109.1	218.1	251	225.2	197.5
CJS-PE-10	117.4	115.9	164.9	167.6	176.7	161.1
CJS-PE-12	116.9	115.6	127.2	114	141.6	134.4
CJS-PE-1	117.7	116.2	134.8	124.4	148.7	146.6
CJS-M-22	101.1	101.9	136.9	127.3	150.7	159.4
CJS-PE-45	115.1	114	129.6	117.2	143.8	157.7
CJS-M-32	119.8	118	137.4	128.1	151.2	163.9

Se realizaron estimaciones de temperatura por medio de los cálculos de los geotermómetros de sílice, Na-K y Na-K-Ca, a las 15 muestras del área de estudio de las cuales se seleccionaron 7 de estas tomando como criterio la clasificación de las aguas según el diagrama de piper y el diagrama ternario y el contenido de cloruro.

Es importante mencionar que para los geotermómetros de sílice, en las muestras seleccionada se encontraban en un rango de temperatura de 101-118°C, Estos valores son más bajos que los obtenidos con los geotermómetros de cationes (134-197°C), indicando posibles procesos asociados a condensación y mezcla de fluidos geotérmicos con aguas superficiales, que emergen a través de fallas locales y acuíferos de la zona este-oeste.

Por tanto el valor obtenido de los geotermómetros de sílice no pueden ser utilizado en las estimaciones de temperatura, ya que la precipitación de la sílice a diferentes temperatura nos brinda muchas incerteza al evaluar la temperatura del reservorio geotérmico. Ver Anexo 1.

Como se puede observar en la tabla 2, los valores de los geotermómetros de cationes presentan temperaturas más altas que los de sílice y variaciones entre los valores obtenidos. Esto se puede asumir a las diferentes condiciones de equilibrio e interacciones con diferentes minerales que ha sufrido el fluido en su ascenso a la superficie (Arnorsson, 2000).

8.5 Recarga y Descarga del Sistema Geotérmico

De acuerdo estudios hidrológicos que se han realizados en la zonas de la Villanueva y el sauce, la zona de Cerro Juan Sapo tiene aportes de diferentes acuíferos dentro de los cuales podemos mencionar el rio grande de Achuapa, El Portillo y Tecomapa, la características geológicas nos presentan en su mayoría depósitos sedimentarios, volcánicos cuaternarios que pertenecen a la formación coyol y y rocas volcánicas de la formación Matagalpa.

Para los manantiales CJS M-37, CJS M-31 muestran que el Ion predominante en estas aguas es el carbonato lo que nos indica que puede asumirse que son de origen superficial. Aunque este tipo de rocas sean impermeables, las aguas circulan a través de fracturas, grietas, diaclasas y planos de falla, creando una permeabilidad secundaria lo que nos indican un flujo de Oeste a Este, Los valores de calcio y magnesio se pueden atribuir al recorrido de las aguas a través de las lavas basálticas, corroborando así los estudios de la recarga que fueron reportados para esta zona.

Los manantiales ubicados en la Comarca de Aguas Caliente CJS M-22, CJS M-32, PE-45, nos indican según la clasificación que se realizó anteriormente con el diagrama de piper y los diagramas de stiff(ver figura Numero 2,3,7), que son aguas que han sido sometidas a procesos de ebullición y mezclas en donde se puede observar que el mayor aporte de iones los tiene el sulfato, calcio y sodio debido interacciones con cuarcita, basaltos y material cuaternario encontrado en esos puntos.

Es importante tener en cuenta los datos geológicos de los procesos hidrotermales en esta zona que son asociados a fallas y fracturas encontrados al NE del rio grande y que se han originado por tectónica de placa y a procesos geológicos relacionados con la zona de depresión de Nicaragua encontrada en la cordillera de los maribios; por lo que se asume que esta zona es el upflow del sistema.

Los pozos monitoreados en la comarca los Tololos, se caracterizan por su alto contenido de cloruro, sodio y calcio esto se puede apreciar en la figura número 7, estos valores se asocian a posibles mezclas de fluidos que han emergido a través de fallas hacia la superficie y se han mezclado con acuíferos someros en donde se han dado procesos de enfriamiento, esto se puede apreciar mejor en el diagrama de isocontorno de temperatura en la figura Numero 8, en donde la mayores temperaturas son encontradas en el área de Aguas Calientes y las menores en el área de los Tololos donde las concentraciones de los cloruros en los pozos son altas lo que se asume a la zona de descarga del sistema.

La geología de esta zona presenta fallas en dirección de norte a sur y de este a oeste en la cual se encontró un dique básico, por lo que se asume que debido a las fallas locales el fluido que llega a descargar al área de los Tololos a traviesa estas fallas dando origen a estas aguas. Concordando así la información brindada por geología y los fluidos del quimismo de la zona.

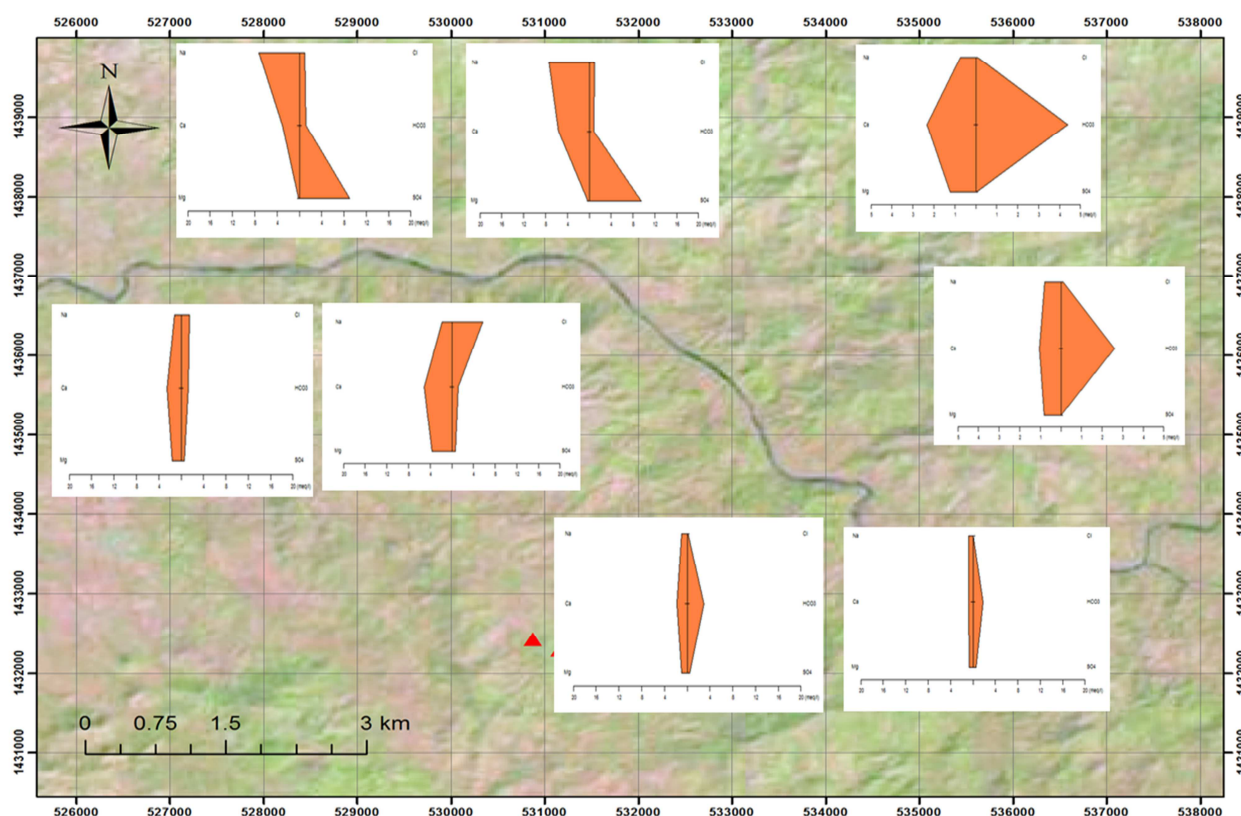


Ilustración 7, Diagramas de STIFF. Área Cerro Juan Sapo

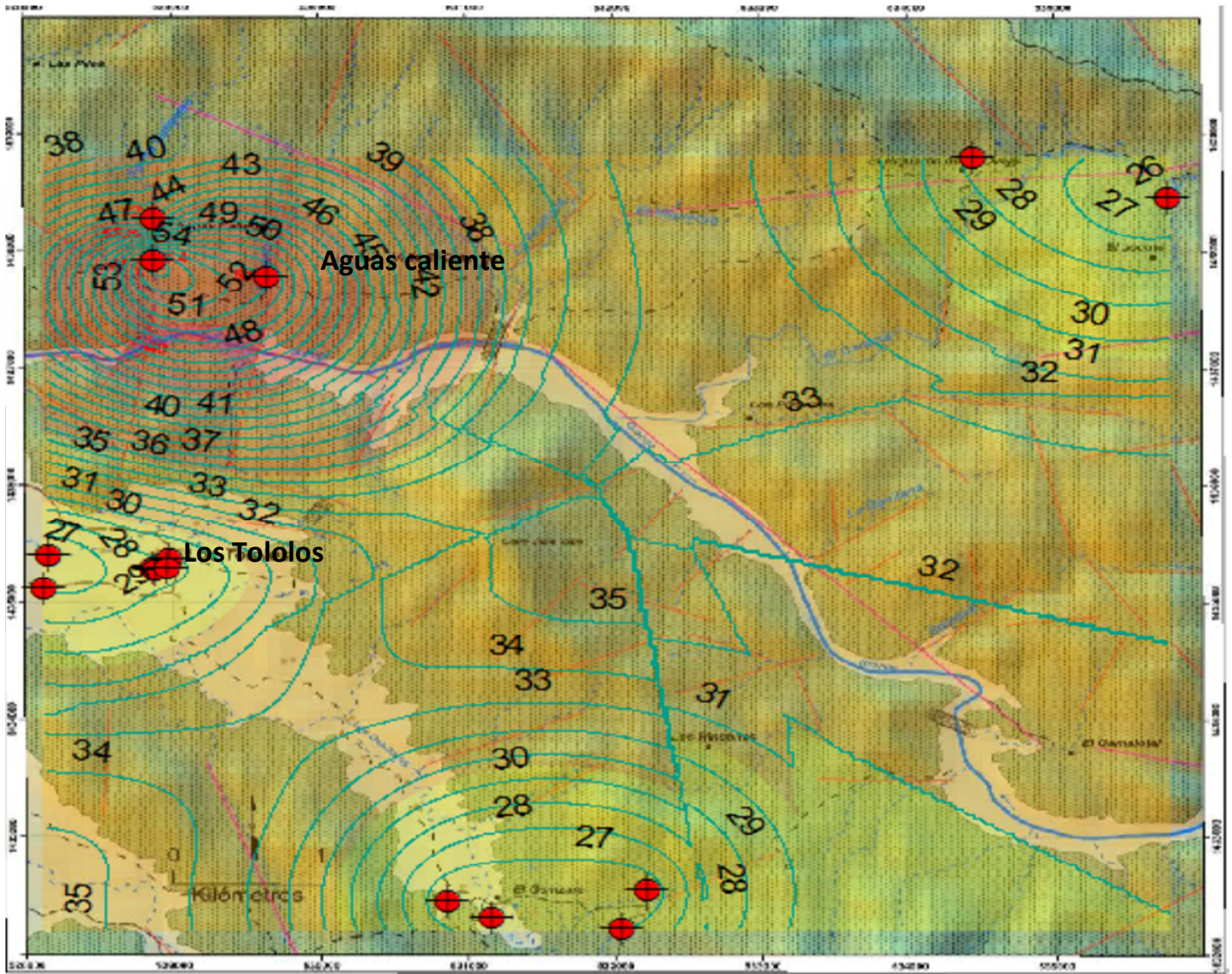


Ilustración 8, Diagrama de Isocontorno de Temperatura

Modelo Conceptual Geoquímico

Fuente de calor: Intrusivo de origen tectónico, Dique.

Recarga: Agua Meteórica.

Circulación de fluidos: Fallamiento local

Temperatura: 134-197°C.

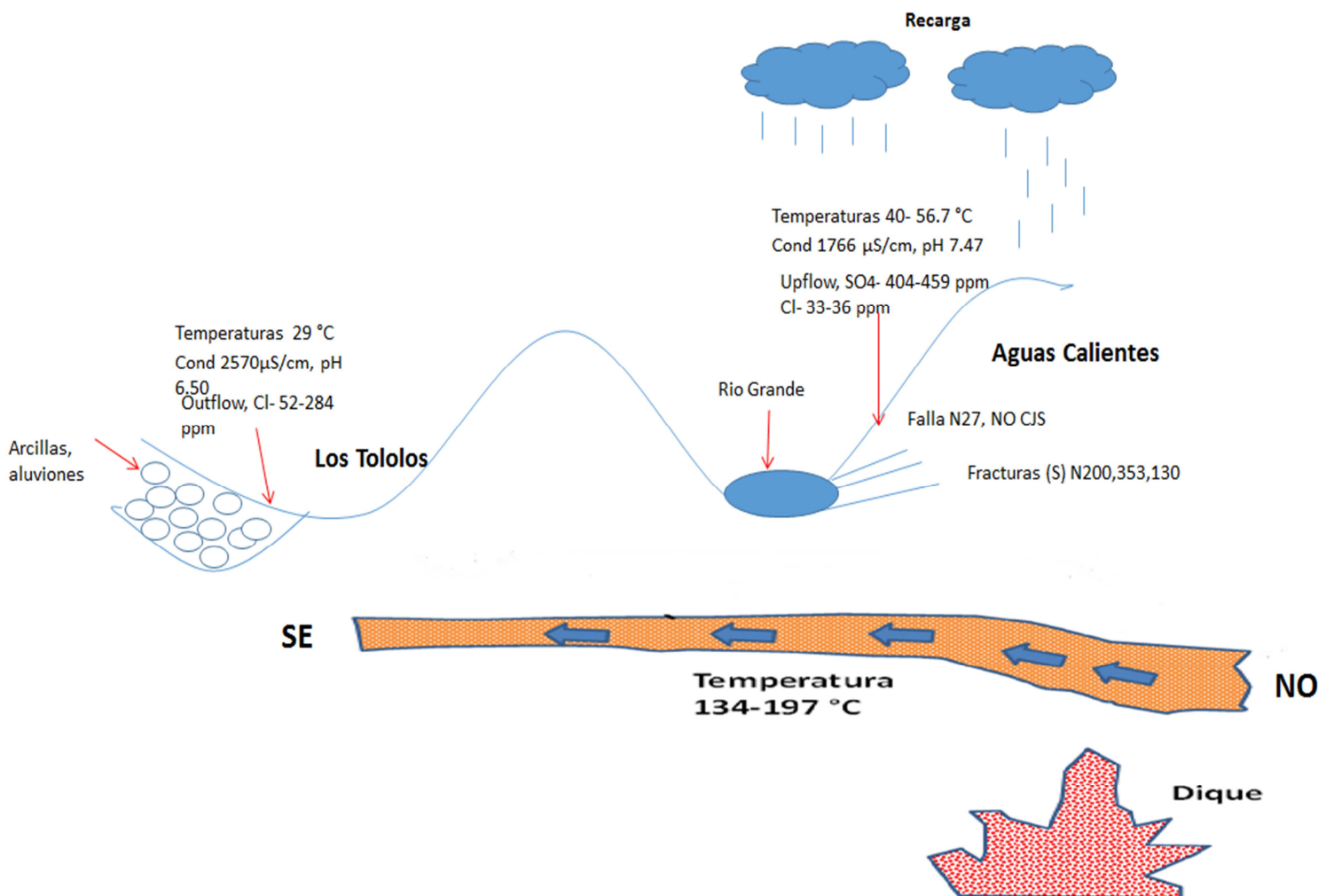


Ilustración 9, Diagrama de Modelo Conceptual Geoquímico

9. Conclusiones

- La información obtenida para elaboración del modelo conceptual permitió tener una idea esquemática de la posible interacción de los fluidos con diferentes fuentes de origen superficial, también estimaciones de temperatura asociadas a una fuente de calor de un intrusivo producto de la tectónica de placa característica de esta zona.
- Los Diagramas de Piper; Triangulares y Binarios nos muestran una caracterización de las aguas donde se puede apreciar los diferentes componentes químicos en base a sus concentraciones y las interacciones que han sufrido entre agua roca, el ascenso de los fluidos por medio de fallas, procesos de mezcla con aguas superficiales y la procedencia de los fluidos.
- De acuerdo a los valores de temperatura obtenido por geotermometría, el reservorio presenta temperaturas entre 134 – 197°C, estos valores fueron evaluados principalmente por el geotermómetro de Giggenbach y el de cationes, no se tomó como referencia el geotermómetro de sílice debido a que se observó que estas aguas han sufrido procesos de mezclas por tanto no existía una huella de la temperatura al compararlos con los otros.

10. Recomendaciones

- Para futuros estudios del área de Cerro Juan Sapo es importante considerar estudios geofísicos como gravimetría y estudios magnéticos, así como análisis de isótopos en la zona norte del Río Grande, lo que permitirá una mejor delimitación del área de interés.
- Unificar toda información disponible y realizar un modelo conceptual interdisciplinario para estimar el potencial de esta zona.
- Colectar muestras de los ríos, como posible recarga de los acuíferos involucrados en el Sistema Cerro Juan Sapo.



11. Agradecimientos

Primeramente a Dios por regalarme salud y sabiduría para poder realizar el presente trabajo.

A las instituciones BID, NFD, CNE, Universidad Nacional de El Salvador y LaGeo, por brindarme la oportunidad de participar en este Diplomado.

A los coordinadores del Diplomado Jaime Arévalo, David Enoc Escobar y Erick Reyes Campos por su gestión y guía.

A mi tutor Ing. Antonio Matus por su apoyo y supervisión.

A mi empleador, el Ministerio de Energía y Minas (MEM), por la oportunidad de asistir y culminar este Diplomado.

A mis jefes Ing. Mario González Barbosa y Ing. Ernesto Martínez, a mis compañeros por su apoyo incondicional.

Finalmente a mis hijos, mi esposa y padres porque siempre han estado a mi lado fomentando mi crecimiento intelectual.

12. Bibliografía

1. Henley R.W., Truesdell A.H. et.al. Fluid Mineral Equilibria in Hydrothermal. Volumen I.
2. Ellis A.J, Mahon W.A, Chemistry and Geothermal Systems. New york, Copyright 1977.
3. Matus A. Geochemical Exploration in Chinameca Geothermal Field, El Salvador. October, 2009.
4. Guidos Julio. Introducción a la Geotermia [Diapositivas 5-33], San Salvador, 2014, 33.
5. Estudio de Potenciales y Calidad de los Acuíferos del Norte de León y Chinandega, Cuenca
6. El Sauce. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE).
7. Guisbert H. Elvira^a, Ramos R. Oswaldo^a, Romulo Gemio^a, Choque Rigoberto^b, Flores Henry^c, Niura Amalia^a, Caracterización Fisicoquímica de Cuerpos de Agua Superficial y Subterránea de la Localidad de Belén Pituta "B", Municipio de Guaqui, Bolivia.
8. Dirección de Geotermia del Ministerio de Energía y Minas, Reconocimiento Geológico de Área de Cerro Juan Sapo. Marzo 2012. Reporte no publicado del Ministerio de Energía y Minas.
9. Claudia Cristina Reyes Linares, Geoquímica Preliminar de los Prospectos Geotérmicos de San Francisco Libre y Santa Bárbara, Nicaragua, Diciembre 2013.
10. Plan Maestro Geotérmico. Octubre, 2001. Nicaragua
11. Marini Luigi. Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy. Genova, Italia. Octubre 2000.
12. <http://www.nuevasesperanzas.org/documents/05%20Technical%20reports/San%20Marcos%20hydrogeological%20study%202009%20ESP.pdf>

13. Anexos

Tabla 3, Componentes Químicos del área Cerro Juan Sapo

Ident.	Temp	pH	Cond	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	Cl-	SO4-2	HCO3-	SiO2	B	Li+	As	Fe2+	TDS
PE-26	27.9	6.51	243	27	1.33	20.41	5,249	3.93	12.14	142.78	71.3	0.05	0	0.0013	0.045	135
PE-24	26.8	6.58	212.2	18.16	1.14	18	6,831	4.09	6.61	136.11	62.3	0.05	0	0.00119	0	105
PE-2	28.6	6.36	655	27.91	2.55	50.17	20.7	52.49	28.6	80.06	58.6	0.05	0.004	0	0.019	359
PE-10	29.1	6.22	1369	42.45	1.94	103.7	45.1	201.45	32.2	70.72	68.9	0.05	0.007	0.00109	0	716
PE-12	29	6.5	2570	68.32	1.71	220.89	79.5	354.92	47.5	100.08	68.3	0.05	0.007	0	0	1394
PE-1	28.8	6.55	1816	84.59	2.41	131.57	52.2	284.94	129.36	130.1	69.3	0.05	0.005	0	0	944
PE-41	26.4	6.66	280	22	1.19	37.22	12.21	4.15	23.9	178.81	61	0.05	0.005	0	0	159
PE-42	26.9	6.27	193.2	17.59	1.25	15.29	8.76	3.59	26	113.42	69	0.05	0.006	0	0.035	95
PE-38	26.6	6.63	355	19.07	0.96	46.63	18.7	4.82	38.6	230.18	70	0.05	0.005	0	0	197
PE-35	26	6.83	351	22.19	2.01	41.79	19.25	5.34	51.91	192.15	56.3	0.05	0.05	0	0.022	200
M-31	25.8	7.38	215.5	18.6	3.05	21.6	10.32	4.61	1.25	160.3	49.4	0.05	0.05	0	0.038	105
M-27	27.7	6.89	344	17.33	0.37	47.49	15.62	3.54	2.12	268.21	52.2	0.05	0.05	0	0.025	187
M-22	52.1	7.76	1208	169.83	5.01	113.71	3.82	36.09	459.2	54.71	49.2	0.99	0.101	0	0	602
PE-45	43.3	7.89	1125	167.24	4.36	60.3	2.48	36.17	431.2	70.72	65.9	0.95	0.093	0	0	598
M-32	55.8	7.54	1133	159.89	4.76	57.94	2.24	33.76	404	76.72	72.3	0.93	0.095	0	0.02	573

Tabla 4, Clasificación de Recursos Geotérmicos

Clasificación de Recursos Geotérmicos (°C)	Muffler y Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Benderitter and Cormy (1990)	Nicholson (1993)	Axelsson and Gunnlaugsson (2000)
Recursos de Baja Entalpia	<90	<125	<100	≤150	≤190
Recursos de Entalpia Intermedia	90-150	125-225	100-200	-	-
Recursos de Alta Entalpia	>150	>225	>200	>150	>190



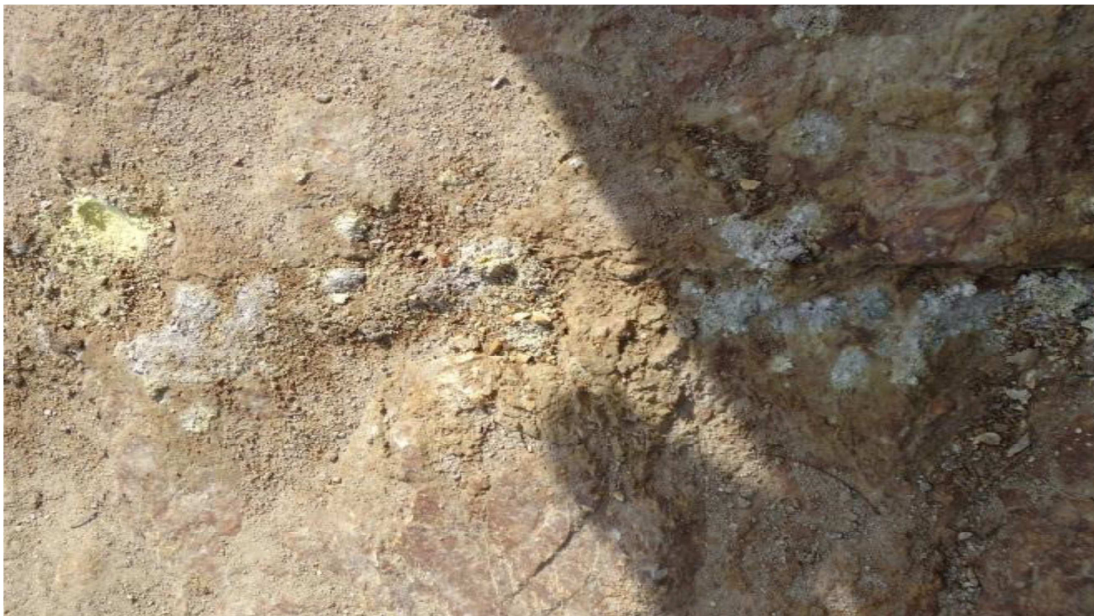
Rocas basálticas afectadas por una alteración pervasiva.



Falla rellena de material arcilloso



Manantial anómalo (40°C) a orillas del río El Grande



Deposiciones de Azufre sobre la arena en el río El Grande