

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA
EDICIÓN 2019



TEMA: ELABORACIÓN DE MODELO CONCEPTUAL GEOQUÍMICO PROFUNDO DEL
CAMPO GEOTÉRMICO SAN JACINTO-TIZATE.

INTEGRANTES:
MARIA JOSÉ CORTEZ RAMÍREZ
SILVIA MARCELA LETONA CARRILLO
RUDDY ALFREDO ROMERO ESPINOZA

TUTORES:
ING. ANTONIO MATUS
ING. NOEL LÓPEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2019

CONTENIDO

	RESUMEN	
1	INTRODUCCIÓN	1
2	JUSTIFICACIÓN	2
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
4	OBJETIVOS	4
4.1	Objetivo General.....	4
4.2	Objetivos Específicos.....	4
5	MARCO TEÓRICO	5
5.1	Diagramas Triangulares.....	5
5.1.1	Diagrama Na-K-Mg.....	5
5.1.2	Diagramas de clasificación de gases geotérmicos.....	6
5.2	Isotopos.....	7
5.2.1	Isótopos en agua geotérmica.....	9
5.3	Geotermómetros Acuicos	10
5.3.1	Geotermómetros catiónicos	11
5.3.2	Geotermómetro de sílice.....	11
5.4	Modelo de Mezcla Entalpía vs Cloruro.....	12
5.5	Relaciones de Concentración Químicas de Interés Geotérmica	13
5.5.1	Sodio-potasio (Na/K)	13
5.5.2	Dióxido de carbono-hidrógeno (CO ₂ /H ₂)	14
5.5.3	Cloro-boro (Cl/B).....	14
6	METODOLOGÍA	15
6.1	Colección de Información Geoquímica	15
6.2	Campo de Estudio	15
6.3	Procesamiento de la Información.....	16
6.4	Caracterización de los Fluidos Producidos del Campo en Estudio.....	16
6.4.1	Clasificación de fluidos geotérmicos	16
6.5	Identificación de Zonas de Recarga y Descarga del Campo en Estudio	16
6.6	Determinación de Zona de Ascenso	16
6.7	Procesos Termodinámicos Ocurrentes en el Reservorio en Estudio.....	17
6.8	Representación el Modelo Conceptual Geoquímico Profundo	17
7	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	18
7.1	Evaluación de Antecedentes.....	18

7.2	Diagramas Triangulares.....	18
7.2.1	Diagrama de Giggenbach.....	18
7.2.2	Diagrama Ar-N ₂ -He.....	19
7.2.1	Diagrama H ₂ S-CH ₄ -CO ₂	20
7.3	Diagrama de Oxígeno 18 vs. Cl de Pozos Geotérmicos	20
7.4	Modelos de Mezcla.....	24
7.4.1	Isocontornos CO ₂ /H ₂ S	27
7.5	Representación del Modelo Conceptual Geoquímico Profundo.....	28
8	CONCLUSIONES	30
9	RECOMENDACIONES.....	30
10	AGRADECIMIENTO	31
11	REFERENCIAS	32
12	ANEXOS.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Composición isotópica en agua magmática	¡Error! Marcador no definido.9
Tabla 2	Ecuaciones empíricas de geotermómetros acuosos	12

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa tectónica de Centroamérica.....	2
Figura 2	Modelo geoquímico de San Jacinto Tizate.....	4
Figura 3	Diagrama Na-K-Mg	7
Figura 4	Diagrama N ₂ -Ar-He	8
Figura 5	Distribución isotópica	9
Figura 6	Línea meteorica mundial.....	10
Figura 7	Entalpía de producción vs. Cloruro a descarga total	14
Figura 8	Mapa de Nicaragua y ubicación de puntos analizados.....	16
Figura 9	Estructura geológica del campo geotermico de San Jacinto - Tizate.....	18
Figura 10	Diagra de Giggenbach Na-Mg-He	20
Figura 11	Diagrama triangular Ar-N ₂ -He (Background vs. 2019).....	21
Figura 12	Diagrama triangular H ₂ S-N ₂ -He (Background vs. 2019)	21
Figura 13	Diagrama de cloruro vs. Oxígeno-18 de pozos geotermicos	22
Figura 14	Diagrama Oxígeno-18 vs. Elección	23
Figura 15	Diagrama de Oxígeno-18 vs. Deuterio	24
Figura 16	Diagrama de Oxígeno-18 vs. Cloruro.....	24
Figura 17	Diagrama de Oxígeno-18 vs. Cloruro de pozos productores	25
Figura 18	Diagrama de Entalpía medida vs. Cloruro en descarga total.....	26
Figura 19	Isocontorno de Cloruro de descarga total (Background vs. 2019)	26
Figura 20	Isocontorno de Entalpía medida de pozos (2019)	27
Figura 21	Isocontorno de T-SiO ₂ (Background vs. 2019)	27
Figura 22	Isocontorno de T-Na-K (Background vs. 2019)	27
Figura 23	Isocontorno de CO ₂ /H ₂ S (Background vs. 2019).....	28
Figura 24	Isocontorno de CO ₂ (Background vs. 2019)	28
Figura 25	Isocontorno de CO ₂ /H ₂ (Background vs. 2019)	28
Figura 26	Propuesta de modelo conceptual geoquímico del campo en estudio	29
Figura 27	Modelo conceptual geoquímico profundo en 3D del campo de San Jacinto....	29

RESUMEN

Este trabajo presenta una propuesta de actualización del modelo geoquímico del campo geotérmico de San Jacinto - Tizate, la modelación se realizó en 3D utilizando el software Voxler, la fuente de calor se define como un cuerpo magmático con mayor proximidad a los pozos productores TZ-3, TZ-1, TZ-4 y TZ-2; la zona de ascenso parte de estos pozos hacia el resto del campo, este parámetro fue valorado por medio de los diagramas triangulares de gases He-N₂-Ar y H₂S-CH₄-CO₂ e isocontornos de geotermómetros calculados de cuarzo y cationes de Na-K, isocontornos de entalpía medida, isocontornos de gases como hidrogeno, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y una relación de los mismos. La recarga del sistema geotérmico se estima en el sector oeste del campo a los 263m de altura, dicha recarga alimenta únicamente a la parte occidental y se evidencia por la entrada de agua de menor temperatura en pozos ubicados en esta parte del campo, el patrón de flujo de reinyección que muestran los resultados de las pruebas de trazadores es de sureste a noreste a través de la falla BG y de noroeste a sureste a través de la falla La Cholla, quedando en una especie de semi-aislamiento algunos pozos ubicados en el extremo oeste de esta zona, la descarga directa de reservorio se aprecia en El Rodeo Tizate y para ello se valoró la química completa del fluido en superficie así como de su contenido isotópico en pozos productores, reinyectores, zonas aledañas al campo geotérmico y agua de mar.

1 INTRODUCCIÓN

Nicaragua es un país dotado de un alto potencial geotérmico de 1519 MW, que está ligado a la presencia en su territorio de la cordillera volcánica activa que se extiende desde el Golfo de Fonseca en dirección sureste hasta llegar a la frontera con Costa Rica, con una extensión de 380 Km (ENEL, 2017). La energía geotérmica es una fuente de energía emisora de dióxido de carbono relativamente baja.

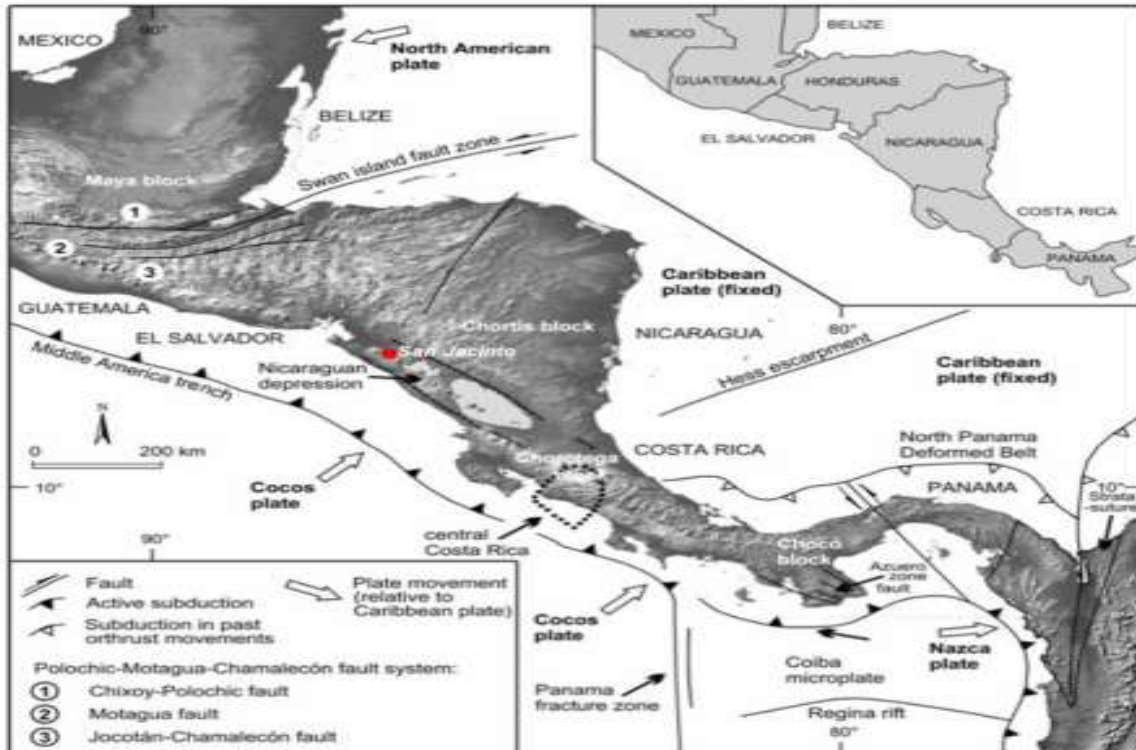


Figura 1: Mapa tectónico de Centroamérica.

Fuente: PENSA.

Actualmente, en Nicaragua existen dos campos geotérmicos en explotación, el campo geotérmico San Jacinto - Tizate, ubicado en la comarca de San Jacinto, municipio de Telica, a 20 Km del Departamento de León y el campo geotérmico Momotombo, tanto la planta geotérmica de San Jacinto como la planta geotérmica de Momotombo cuentan con una capacidad instalada de 77 MW cada una.

Los primeros estudios en el campo geotérmico de San Jacinto consistieron en mediciones de flujo de calor de las manifestaciones superficiales, diversos estudios demostraron que el recurso existente en la zona, presentaba altas temperaturas entre 250°C a 300°C (PENSA).

Hasta ahora, la central geotérmica de San Jacinto - Tizate cuenta con 14 pozos productores, 6 pozos de reinyección y 1 de monitoreo. El último modelo geoquímico (evaluación integrada) se realizó a inicio del 2017, a finales del mismo año e inicios del 2018 se perforaron 4 pozos geotérmicos entre ellos 3 productores y 1 de reinyección. Por lo anterior

se requiere una actualización del modelo conceptual geoquímico profundo y por supuesto de la integración de la actualización simultánea de la geología y geofísica.

Este proyecto permitió identificar las posibles zonas de recarga y descarga, la circulación de fluido (patrón de flujo), zonas de ascenso (upflow), y representado en un modelo conceptual geoquímico profundo actualizado. Lo anterior es para integrar los nuevos pozos perforados (productores y re-inyectores).

Para identificar las zonas de recarga y descarga del sistema geotérmico se evaluó Oxígeno-18 vs Elevación y Oxígeno-18 vs Cloruros tanto en aguas meteóricas y agua de origen marino como en manifestaciones superficiales respectivamente.

Con los datos geoquímicos de pozos geotérmicos un año después de su inicio de producción (Background) vs último año de producción se elaboraron diagramas areales (Cl, H₂, H₂S, CO₂, CO₂/H₂, CO₂/H₂S, geotermómetros de SiO₂ y Na/K) para determinar zonas de ascenso y posibles procesos que ocurren en el reservorio.

Los resultados de trazadores en todos los pozos de reinyección permitieron identificar el patrón de flujo de aguas reinyectadas, simultáneamente se evaluaron modelos de mezclas (Entalpía vs Cloruro y Cloruro vs Oxígeno-18) para confirmar esta información.

Por último con la información obtenida se representó el modelo conceptual geoquímico profundo tanto en vista de planta como en 3 dimensiones mediante el software Voxler.

2 JUSTIFICACIÓN

Debido a que las propiedades químicas del reservorio están en constante cambio, es necesario con el uso de los datos recolectados en los monitoreos constantes que se realizan, y el tratamiento adecuado de la información; se realice la actualización del modelo geoquímico con cierta frecuencia a manera de conocer mejor su evolución.

La realización del presente trabajo pretende actualizar la caracterización química del campo geotérmico San Jacinto-Tizate con el fin de elaborar un modelo conceptual geoquímico profundo que permita visualizar los procesos termodinámicos que ocurren en los distintos estratos del reservorio y la incorporación de la química de fluidos de los pozos recién perforados que no lograron considerarse en la última versión del modelo conceptual 2017.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El campo geotérmico San Jacinto-Tizate ha estado en explotación desde el año 2005, habiendo un desarrollo constante del mismo, que consiste en la perforación de nuevos pozos productores, reinyectores y de observación, así como la instalación de mayor capacidad de generación de energía eléctrica; por lo que es natural que el reservorio esté en constante cambio.

Este cambio se ve reflejado en la química de los fluidos provenientes de diversas fuentes geotermales que incluyen pozos y fumarolas, mediante el análisis de la información

obtenida a través del monitoreo continuo del campo, se puede tener una perspectiva de la evolución del mismo, y así desarrollar el modelo geoquímico profundo del campo con cierta frecuencia de manera de conocer mejor las condiciones actualizadas del campo, para establecer mejores prácticas en el manejo del recurso para la preservación de este.

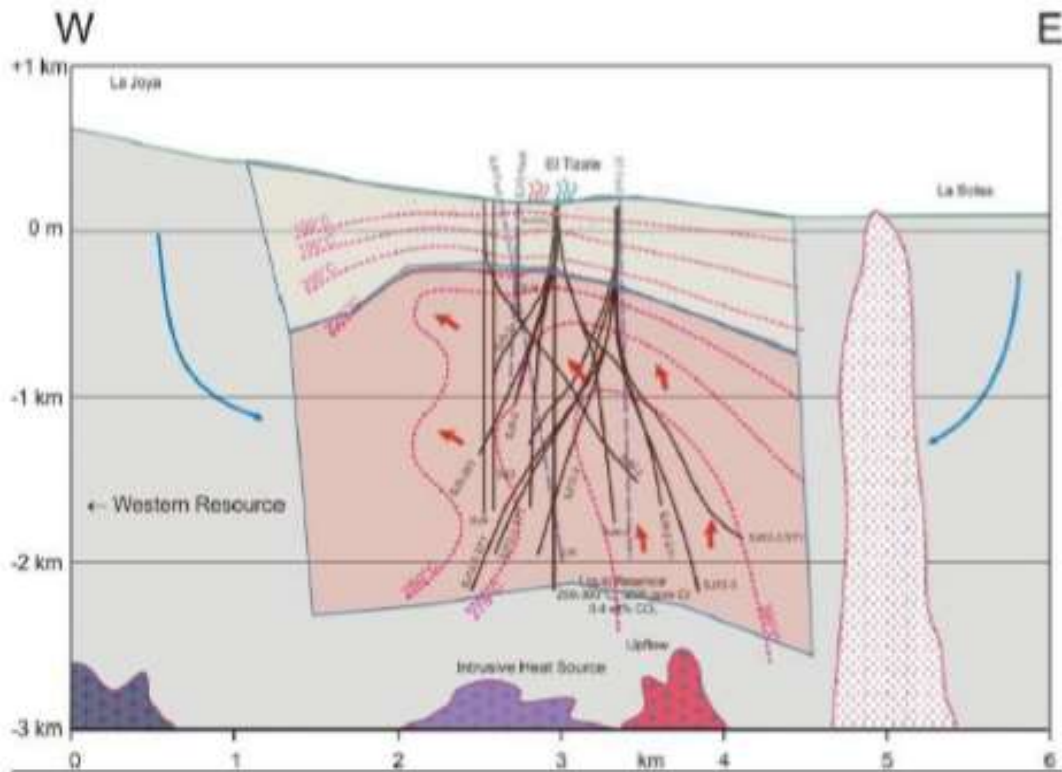


Figura 2: Modelo geoquímico de San Jacinto Tizate, 2005.

Fuente: (Gunter Gámez, 2018).

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Elaborar un modelo conceptual geoquímico profundo del campo geotérmico San Jacinto – Tizate.

4.2 Objetivos Específicos

- Evaluar los antecedentes geoquímicos del campo geotérmico San Jacinto – Tizate.
- Realizar una caracterización geoquímica de los fluidos geotérmico de pozos productores, reinyectores y de fumarolas.
- Identificar el origen, zona de recarga y descarga del sistema geotérmico.
- Determinar las zonas de ascenso y los procesos termodinámicos ocurrentes en el campo de estudio.
- Representar el modelo conceptual geoquímico profundo en 3 dimensiones mediante el software Voxler.

5 MARCO TEÓRICO

En este acápite, se presenta una descripción sobre los principales conceptos teóricos para sustentar los resultados obtenidos en esta investigación. Se presenta la evaluación de antecedentes con datos geoquímicos del campo, la clasificación de las aguas geotérmicas, diagramas triangulares, diagramas de isotopos, diagramas areales, como también procesos de mezcla.

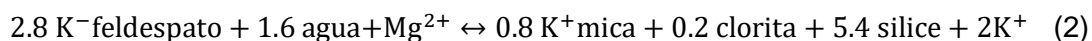
5.1 Diagramas Triangulares

Formado por triángulos equiláteros donde se representa, la composición aniónica o catiónica del agua. En cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Como cationes se suele utilizar Na-K-Mg y como aniones Cl-SO₄-HCO₃.

5.1.1 Diagrama Na-K-Mg

Giggenbach (1986) propuso la combinación de los geotermómetros de Na/K y K/Mg en un diagrama triangular, a partir del cual se pueden clasificar las aguas y extrapolar la probable temperatura del reservorio, de una manera más sencilla y directa. En este diagrama los dos sistemas están representados por dos conjuntos de líneas, uno para las razones de Na/K y otro para las razones de K/Mg, donde cada valor representa líneas isotermas. La intersección de las isotermas de Na/K y K/Mg, referidas a la misma temperatura, corresponden a la composición del agua en equilibrio con las fases minerales controlando ambos geotermómetros y delineando la llamada “curva de equilibrio total”.

El diagrama triangular se basa en la dependencia de la temperatura de las siguientes ecuaciones:



La zona de equilibrio parcial sugiere ya sea un mineral que se ha disuelto, pero no ha alcanzado el equilibrio, o una mezcla de agua que ha alcanzado el equilibrio (por ejemplo, agua geotérmica) dilución con agua no equilibrada (por ejemplo, agua subterránea fría).

Puntos cerca de la esquina de \sqrt{Mg} generalmente sugiere una alta proporción de las aguas subterráneas relativamente fría, no necesariamente “inmaduras”.

La posición de un punto de datos en el diagrama se obtiene calculando la sumatoria de las concentraciones (en mg/kg) de los tres componentes que intervienen siguiendo la Ecuación 3:

$$S = \frac{Na}{1000} + \frac{K}{100} + \sqrt{Mg} \quad (3)$$

$$\%Na = \frac{Na}{10s} \%K \frac{K}{s} \%Mg = \frac{100\sqrt{Mg}}{s}, D = \%Mg + 0.5\% Na \quad (4)$$

A partir de la sumatoria (S), se obtiene el porcentaje de sodio (% Na) y (D) que son los que se representan como (Y) respectivamente:

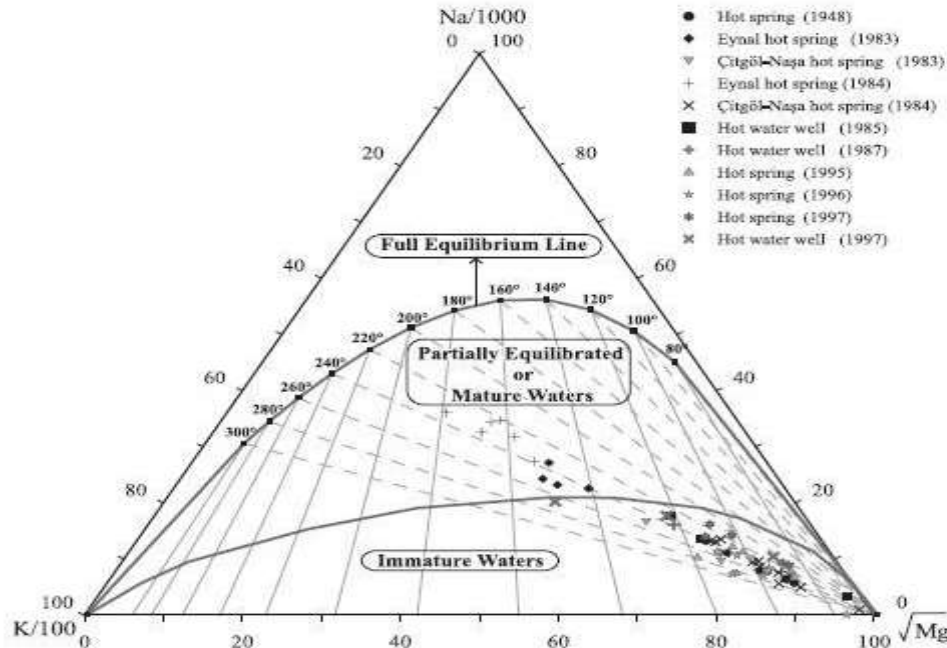


Figura 3: Diagrama Na-K-Mg

Fuente: Metodología geoquímica aplicada a fluidos geotermales, Octubre 2017, LaGeo.

5.1.2 Diagramas de clasificación de gases geotérmicos

Entre los gases relativamente más solubles en agua están: el amoníaco, sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono. Entre los menos solubles en agua están el metano, hidrógeno, nitrógeno, argón, helio. Los sistemas de alta temperatura tienen un contenido significativo de dióxido de carbono, metano e hidrógeno (Matus, 2019) no mientras que los sistemas de baja temperatura están dominados por el nitrógeno. El gas de mayor proporción es el dióxido de carbono (alrededor 95%), y del 1 al 5% del resto de gases. El orden de solubilidades en la fase líquida puede resumirse de la siguiente manera: $NH_3 > H_2S > CO_2 > N_2 > CH_4 > H_2$.

Altos valores de las relaciones CO_2/H_2S , CO_2/H_2 , CO_2/NH_3 indican, que los gases han viajado por un largo recorrido por lo que ha existido remoción de H_2S , H_2 y NH_3 del vapor por reacciones con las rocas en su camino y por ende entre más largo el recorrido dichos gases resultan más deficientes. Los principales gases nobles son: He y Ar por lo que normalmente se construye el diagrama triangular: N_2 -Ar-He. El N_2 tiene normalmente un carácter inerte. Los gases de placas convergentes tienen una relación $N_2 / Ar > 1500$, los gases de placas divergentes una tiene una relación $N_2 / Ar < 25$ (Martínez, 2017).

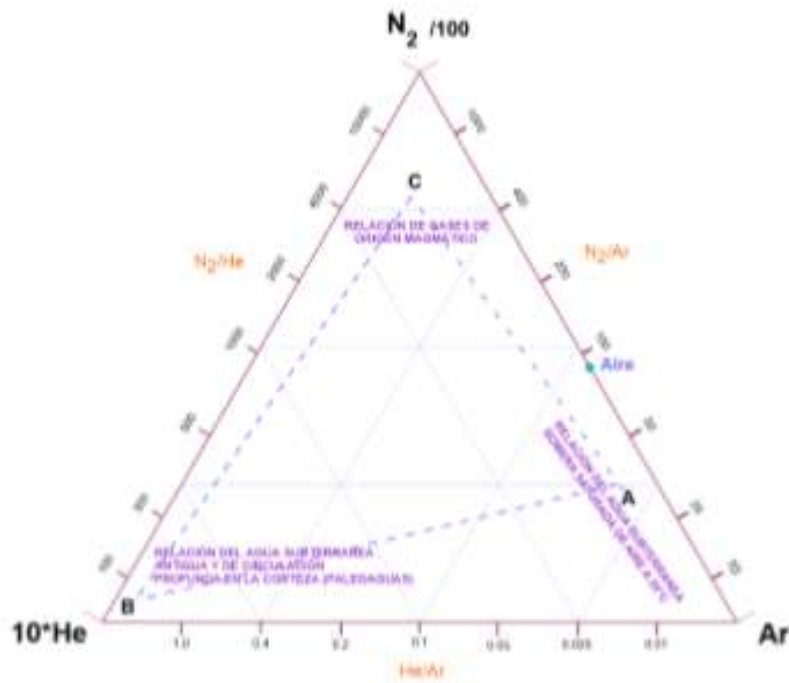


Figura 4: Diagrama N₂-Ar-He

Fuente: (Hernández, 2018).

5.2 Isótopos

Los isótopos son átomos de una misma especie química, que varían en el número de neutrones, por lo que la masa atómica también varía volviendo uno más ligero que otro.

Los isótopos estables permanecen con la configuración atómica propia, es decir mismo número de protones, neutrones y electrones, estando en mayor abundancia en la naturaleza; mientras que los isótopos que tienen un mayor número de neutrones son más pesados e inestables por lo que están de manera más limitada presente en la naturaleza. La inestabilidad de ellos provoca que no puedan permanecer como tales en el ambiente y decaen o se transforman en otra configuración distinta.

En el área de la geotermia algunos de los isótopos que se estudian para determinar origen del agua del sistema son: deuterio (D), tritio (T), oxígeno 18 (¹⁸O); la energía vibracional de los átomos es menor en los isótopos más livianos en consecuencia las propiedades físico químicas varían ligeramente entre los isótopos de un mismo elemento.

El fraccionamiento isotópico se lleva a cabo por el siguiente comportamiento, la presión de vapor del D y ¹⁸O, es algo menor que la del ¹H y del ¹⁶O; por lo que durante el proceso de evaporación, los isótopos ligeros (¹H y ¹⁶O) cambian a la fase de vapor con una tasa proporcionalmente mayor que la de los isótopos pesados, dando por resultado que, en la fase habrá una proporción mayor de isótopos ligeros que en la fase líquida remanente.

El agua de mar tiene un valor de delta alrededor de cero puesto es el patrón de referencia, las aguas continentales tienen valores negativos, ya que su origen es la evaporación del agua de mar y como consecuencia están empobrecidas en ^{18}O , distribución de isótopos en precipitaciones, ver Figura 6.3.

Las mayores variaciones del contenido isotópico del deuterio y del ^{18}O de las aguas naturales tienen lugar durante el proceso de precipitación, a través de una serie de estaciones meteorológicas mundiales se miden estos isótopos para generar información de un promedio pesado de cada localidad y establecer la línea meteórica mundial (León, 2007).

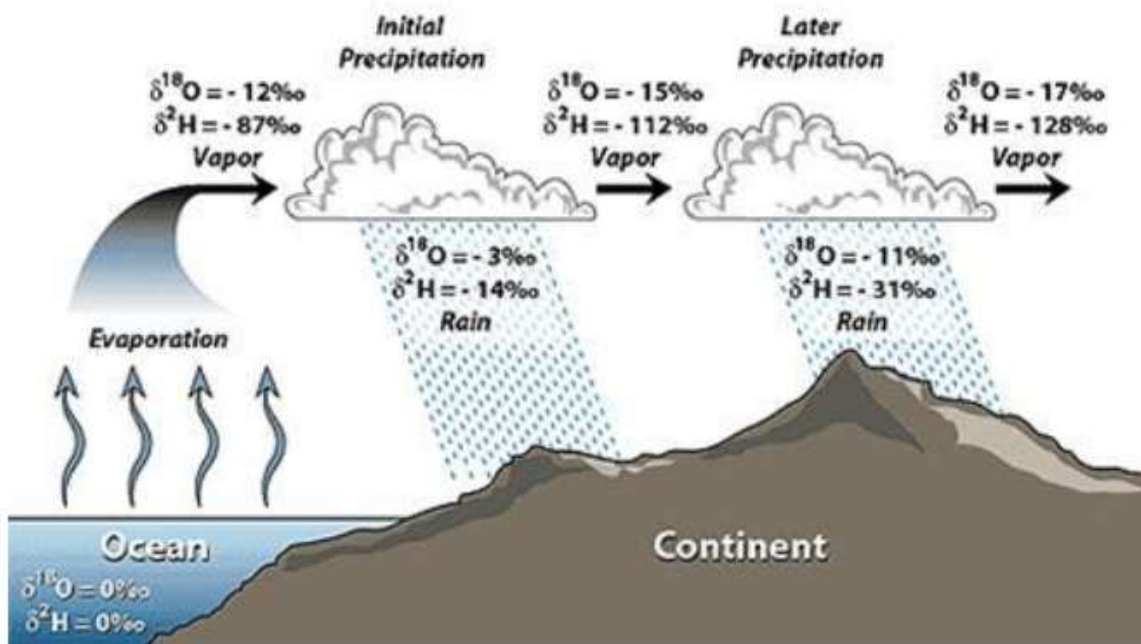


Figura 5 Distribución isotópica

Fuente: (Matus, 2019).

En la Figura 6.4 se muestran los valores promedio de $\delta D^{0/00}$ y de $\delta^{18}\text{O}^{0/00}$ de las estaciones de todo el mundo.

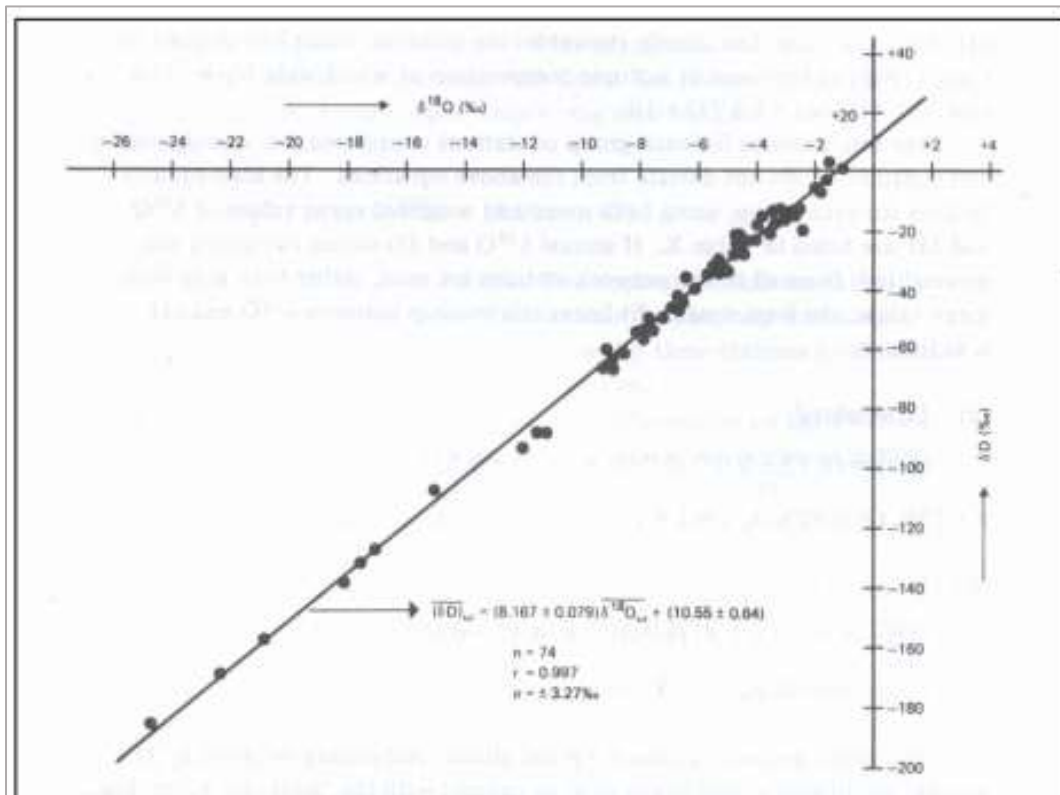


Figura 6 Línea meteórica mundial

Fuente (León, 2007).

5.2.1 Isótopos en agua geotérmica

El agua geotérmica está compuesta por una mezcla de agua magmática y agua meteórica que se infiltra; según Giggenbach el agua magmática tiene una composición isotópica característica dependiendo del tipo de magma, ver Tabla 1.

Tabla 1: Composición isotópica en agua magmática

Tipo de agua	Básico	Andesítico
Rango de $\delta D (‰)$	-5 a -35	-60 a -85
Rango de $\delta^{18}O (‰)$	+8 a +11	+5 a +8

Fuente: Manual de geotermia. Quijano 2007.

El agua meteórica modifica la composición de ^{18}O , mediante un proceso de intercambio isotópico con la roca huésped, facilitado por las temperaturas altas. Tanto las rocas ígneas como las sedimentarias están enriquecidas en ^{18}O con respecto al agua de mar y las aguas meteóricas.

Mientras que el deuterio presente no varía al estar en contacto con la roca del reservorio, ya que las rocas contienen muy poca cantidad de hidrógeno. Así las aguas geotérmicas presentan un delta con respecto a la línea meteórica mundial.

La estabilidad isotópica y las composiciones químicas de las fuentes termales, pozos de agua y aguas superficiales frías, han demostrado ser instrumentos de gran utilidad en los estados iniciales de exploración geotérmica de muchos de los regímenes hidrogeológicos. Se pueden utilizar para determinar el origen de los fluidos térmicos y determinar la relación de este tipo de agua con el régimen de agua subterránea local.

En la exploración geotérmica de un sistema hidrotermal se efectúan determinaciones de la relación D/H, tanto de las aguas de precipitación como de las subterráneas termales, para establecer el origen y la altitud del área de recarga y los procesos de intercambio con rocas a elevada temperatura.

5.3 Geotermómetros Acuosa

En la exploración y monitoreo de un sistema geotérmico, la estimación de las temperaturas ayuda a estimar el potencial geotérmico y la factibilidad de explotar sus recursos para la generación de energía eléctrica. Esta estimación de temperaturas se realiza mediante el uso de geotermómetros que emplean la composición química o isotópica de los fluidos que emergen en manantiales hidrotermales o fumarolas, o que son extraídos de pozos perforados (Rodríguez Santoya, 2008).

La composición de fluidos geotérmicos está controlada por reacciones químicas, que dependen principalmente de la temperatura de equilibrio entre el fluido geotérmico y los minerales a profundidad.

Los geotermómetros químicos son herramientas de bajo costo que se usan, tanto para predecir las temperaturas de equilibrio de los sistemas geotérmicos, como para dilucidar los principales procesos geoquímicos que ocurren en el interior de los yacimientos (Arnórsson, 2000), unos están basados en ecuaciones analíticas fundamentadas, en forma empírica, en bases de datos creadas con mediciones de temperatura y de composición química de fluidos muestreados en pozos o manifestaciones termales, también existen otros tipos de geotermómetros que se obtiene a partir de experimentos de solubilidad de minerales o de estudios de interacción roca-agua en condiciones de equilibrio químico y termodinámico (Rodríguez Santoya, 2008).

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

Entre las condiciones de aplicabilidad de los geotermómetros están:

- No se deben tener contribuciones significativas de las especies químicas del sistema externo.

- Necesaria fuerte dependencia de relaciones cuantitativas entre especies implicadas en la reacción con la temperatura.

La aplicación e interpretación geotermométricas requiere un buen entendimiento de los procesos involucrados en el sistema geotermal.

Actualmente se han desarrollado una amplia variedad de geotermómetros para fases acuosa, destacando las diferentes versiones del geotermómetro de sílice y los geotermómetros de composición catiónica.

5.3.1 Geotermómetros catiónicos

Se basan en la distribución de álcalis entre la fase sólida y la fase líquida, pueden ser: Na-K, Na-K-Ca, Na-Ca-K-Mg, entre otros (Na-Li, K-Mg). Funcionan bien para aguas calientes, por lo que la aplicabilidad podría llegar hasta los 350 °C debido a que está basado en relaciones que son menos afectadas por diluciones y separación de vapor, volviendo el equilibrio más lento en comparación a los geotermómetros de sílice.

5.3.2 Geotermómetro de sílice

Su principio básico es la variación de la solubilidad con la temperatura, como la sílice está presente en diferentes formas es posible estimar temperaturas como geotermómetros de cuarzo, cristobalita, calcedonia, sílice amorfa entre otras. La solubilidad de la sílice es controlada por la sílice amorfa a baja temperatura y por el cuarzo a una alta temperatura. Entre las consideraciones al utilizar estos geotermómetros es que su rango de aplicabilidad es hasta los 250 °C debido a que la separación de vapor, y el incremento de pH proporciona temperaturas sobreestimadas mientras que la mezcla con agua fría la temperaturas son subestimadas.

En resumen (Rodríguez Santoya, 2008) mencionan que la aplicación de los geotermómetros de SiO_2 ha presentado diversos problemas en la predicción de temperaturas debido a la presencia de procesos de mezcla de fluidos, re-equilibrio químico y de pérdidas de vapor, así como problemas relacionados con su determinación analítica, los geotermómetros catiónicos no presentan esta dificultad debido a que estos se basan en relaciones iónicas y no en concentraciones de una sola especie química, sin embargo, su aplicación podría verse afectada por reacciones de intercambio iónico con minerales arcillosos, proceso de enriquecimiento de algunos cationes o por la falta de equilibrio entre solutos y minerales de alteración presentes en estos sistemas.

Tabla 2: Ecuaciones empíricas de geotermómetros acuosos

Geotermómetro	Ecuación Empírica	Aplicabilidad
Cuarzo- sin pérdida de vapor (Fournier,1977)	$T(^{\circ}C) = \frac{1309}{5.19 - \log SiO_2} - 273.15$ (6)	Hasta 250°C
Cuarzo- con pérdida de vapor (Fournier,1977)	$T(^{\circ}C) = \frac{1522}{5.75 - \log SiO_2} - 273.15$ (7)	Hasta 250°C
Calcedonia (Fournier,1977)	$T(^{\circ}C) = \frac{1032}{4.69 - \log SiO_2} - 273.15$ (8)	Hasta 250°C
Cristobalita (Fournier,1977)	$T(^{\circ}C) = \frac{1000}{4.78 - \log SiO_2} - 273.15$ (9)	Hasta 250°C
Sílice amorfa (Fournier,1977)	$T(^{\circ}C) = \frac{731}{4.52 - \log SiO_2} - 273.15$ (10)	Hasta 250°C
Na/K (Truesdell,1976)	$T(^{\circ}C) = \frac{856}{0.857 - \log \frac{Na}{K}} - 273.15$ (11)	T>250°C
Na-K-Ca (Fournier,1973)	$T(^{\circ}C) = \frac{1047}{\log \frac{Na}{K} \left(\beta \log \sqrt{\frac{Ca}{Na}} + 2.06 \right) + 2.24} - 273.15$ (12)	T>250°C
Na-K-Ca-Mg (Fournier,1973)	$T(^{\circ}C) = T_{Na-K-Ca} - \Delta T_{Mg}$ (13)	T>250°C
	$R = \frac{Mg}{Mg + 0.61Ca + 0.31K} \times 100$ (14)	
	$\Delta T_{Mg(R=15-50)} = \frac{1.03 - 59.971 \log R + 145.05 \log R^2 - 36711 \log R^3}{T - 1.677 \frac{\log R}{T^2}}$ (15)	
	$\Delta T_{Mg(R=15-50)} = \frac{10.66 - 4.7415 \log R + 325.87 \log R^2 - 1.032^2 \log R^3}{T - 1.9677 \frac{\log R^3}{T^2}}$ (16)	

Fuente: Metodología geoquímica aplicada a fluidos geotermales, Octubre 2017, LaGeo.

5.4 Modelo de Mezcla Entalpía vs Cloruro

La evolución en el tiempo de la concentración de cloruro y de las temperaturas geotermométría puede ser de gran ayuda para comprender los cambios en el reservorio debidos a la extracción. Es importante recordar que los cambios de presión son los más rápido se difunden a través del reservorio, seguidos por los cambios químicos y, por últimos, los cambios térmicos. Esto se debe a que la roca, que contiene la mayor parte de la energía térmica del reservorio, actúa como un retardador del enfriamiento al ceder calor al fluido. Gracias a ello, es posible prever un enfriamiento brusco, más rápido de lo deseado, en los pozos productores. El enfriamiento puede deberse a que existe una conexión demasiado directa entre los pozos inyectoros y productores o a una entrada másica de fluidos de menor temperatura de acuíferos vecinos del reservorio (León, 2007).

Un tipo de gráfica, que puede ser ilustrativo de los procesos en el reservorio, es el de entalpía de producción vs cloruro a descarga total.

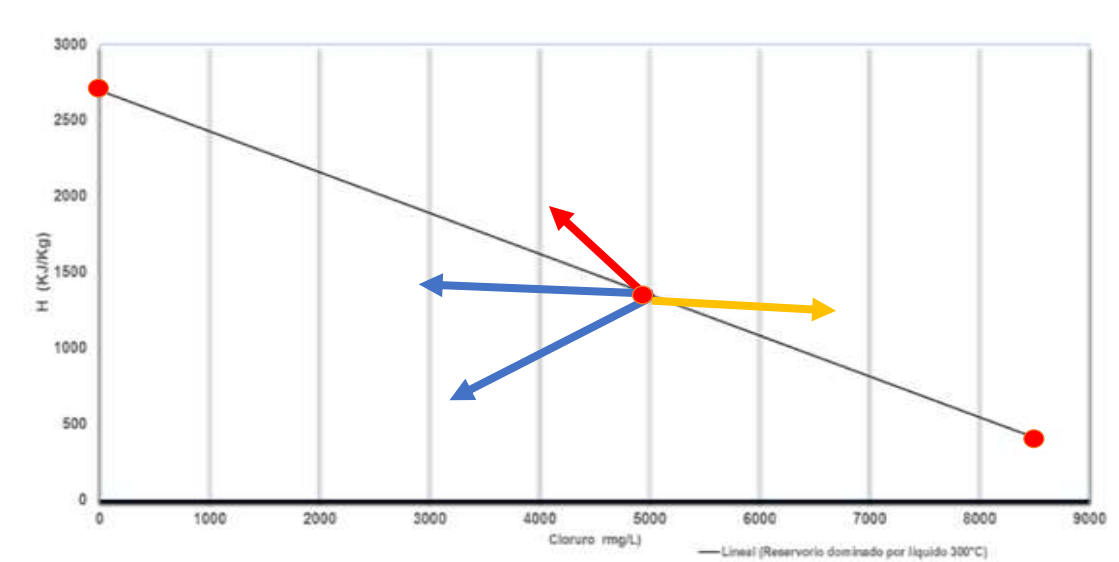


Figura 7: Entalpía de producción vs cloruros a descarga total

Fuente: Manual de Geotermia ciencias de la tierra e ingeniería de reservorios, 2007.

Los puntos rojos representan un pozo hipotético; el punto central corresponde a las condiciones de un reservorio dominado por líquido de 300 °C ($H = 1344$ kJ/kg) y una concentración de cloruro de 5000 mg/L, el punto inferior a la derecha son las condiciones del agua del vertedor ($H = 419$ kJ/kg, $Cl = 8475$ mg/L) y el punto superior izquierdo corresponde al vapor ($H = 2700$ kJ/kg, $Cl = 0$).

Líneas azules: muestran la tendencia en el caso de recarga de agua periféricas de menor temperatura y concentración de cloruros.; la línea horizontal indica que el agua de recarga barre suficiente calor de la roca de tal manera que su entalpía final es la original del reservorio; la otra línea indica que el reservorio se enfría paulatinamente.

Líneas amarillas: representan la influencia de agua de reinyección, enriquecida en cloruros por efecto de la separación del vapor; la línea horizontal correspondería al caso en el que el agua de reinyección se recupera térmicamente antes de llegar al pozo productor, mientras que la otra línea, indicaría un enfriamiento paulatino.

Línea de color rojo: indica la tendencia de enriquecimiento de cloruros por efecto de una ebullición vigorosa en la zona de drene del pozo.

5.5 Relaciones de Concentración Químicas de Interés Geotérmica

5.5.1 Sodio-potasio (Na/K)

Baja razón permite delimitar áreas de alta temperatura o zonas de directa migración, no responde rápidamente al enfriamiento con indicadores que utilizan sílice, alta razón puede indicar rutas indirectas que permiten reacciones agua-roca o enfriamiento.

5.5.2 Dióxido de carbono-hidrógeno (CO₂/H₂)

Disminuye en vapor separado a baja temperatura debido a reacciones con roca y agua. Un valor bajo en la relación brinda la perspectiva que el vapor se origina por debajo de la capa de oxidación y posiblemente en un acuífero de alta temperatura; si el valor es alto indica que ha existido remoción de hidrógeno debido a la interacción de este con otras especies a lo largo de un camino largo.

5.5.3 Cloro-boro (Cl/B)

Puede proporcionar indicios de los límites de área explotada, patrones de circulación de fluidos, zona de recarga y descarga, así como la distribución de la salinidad, si la relación es alta indica zona de alta temperatura.

6 METODOLOGÍA

Este capítulo presenta los métodos empleados para el desarrollo de la investigación, que se describe a continuación.

6.1 Colección de Información Geoquímica

Se evaluaron dos periodos particulares para la realización del modelo conceptual geoquímico profundo de San Jacinto – Tizate, el primero es el background que consiste en la clasificación y caracterización geoquímica de cada pozo en un periodo equivalente al inicio de su producción (se tomaron datos del promedio de un año posterior a su inicio de producción con el objetivo de permitir la estabilización del mismo) y el segundo es el promedio del año en curso 2019. Es importante mencionar también que este trabajo es una representación modélica de la Evaluación geoquímica del campo geotérmico San Jacinto Tizate, Nicaragua presentada en el año 2018 en el Diplomado en Geotermia para América Latina, Edición 2018 por los Ing. Gunter Gámez y Eduardo Echeverría.

6.2 Campo de Estudio

El Campo de esta investigación corresponde al campo geotérmico San Jacinto - Tizate que se encuentra en el noroeste de Nicaragua. El área de concesión geotérmica es de 40 km². El área evaluada para este proyecto se enmarca en los cuadros rojos donde se incluye además agua de mar en Las Peñitas.

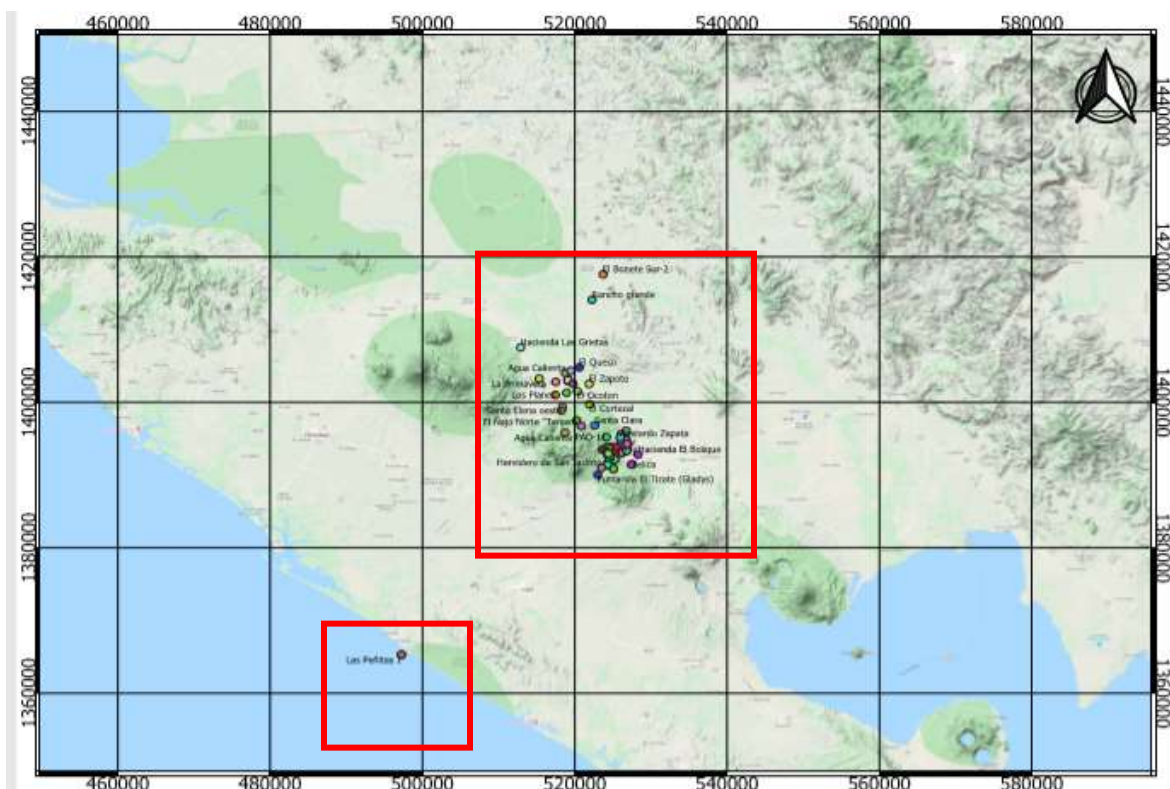


Figura 8: Mapa de Nicaragua y ubicación de puntos analizados

Fuente: Elaboración propia a través de software QGIS.

6.3 Procesamiento de la Información

Los datos utilizados en el desarrollo del presente documento se seleccionaron con dos propósitos, el primero para poder tener la visión del comportamiento de los pozos posterior a su primer año de operación, como background y el segundo saber el comportamiento en la actualidad del campo para proponer el modelo geoquímico profundo.

6.4 Caracterización de los Fluidos Producidos del Campo en Estudio

En esta sección se aborda una descripción de diagramas de clasificación del fluido geotérmico.

6.4.1 Clasificación de fluidos geotérmicos

Existen diversos gráficos que se utilizan para la clasificación, en este estudio se realizará la evaluación elaborando los siguientes diagramas:

- Diagrama triangular Na-K-Mg mediante el software Aquachem.
- Diagrama triangular N₂-He-Ar mediante el software Grapher.
- Diagrama triangular CO₂-CH₄-H₂S mediante el software Grapher.

6.5 Identificación de Zonas de Recarga y Descarga del Campo en Estudio

Para identificar la zona de recarga se utiliza el isótopo de Oxígeno-18 este se grafica vs. Elevación, para la descarga se requiere graficar el isótopo de Oxígeno-18 vs. Cloruro además de evaluar la química de las manifestaciones en el área de estudios. Para realizar estos gráficos será mediante el software Aquachem.

6.6 Determinación de Zona de Ascenso

La estimación de temperaturas con geotermómetros químicos es uno de los más importantes métodos para la explotación y desarrollo de los recursos geotérmicos debido a que pueden predecir temperaturas de superficie y en el reservorio durante la explotación. En este estudio se determinarán los geotermómetros de sílice y catiónicos.

Para poder conocer la distribución espacial de los componentes geoquímicos del flujo geotérmico se utiliza el software Surfer en el cual se harán los siguientes isocontornos.

- Geotermómetro de SiO₂
- Geotermómetro de Na-K
- Entalpía medida
- Na/K
- CO₂/H₂
- Cl/B

Los isocontornos se ubicarán sobre un mapa geológico base del campo. Y el mapa utilizado es el siguiente:

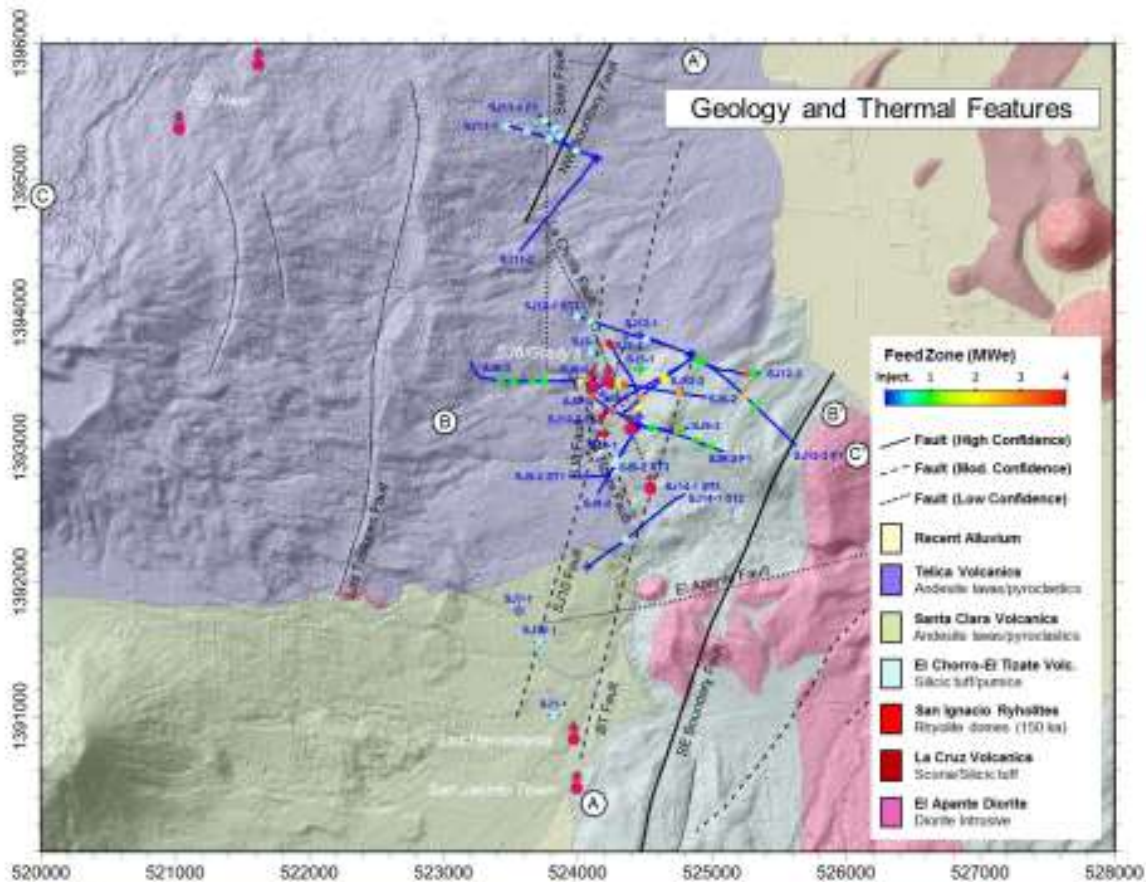


Figura 9: Estructuras geológicas del Campo Geotérmico San Jacinto - Tizate
Fuente: PENSA

6.7 Procesos Termodinámicos Ocurrentes en el Reservorio en Estudio

Para este estudio se ilustra los procesos termodinámicos en el reservorio mediante modelos de mezcla (Entalpía vs Cloruro), la entalpía que se utiliza será la entalpía medida para luego graficar junto a cloruros en descarga total, esto se confirmara con el diagrama de oxígeno-18 vs Cloruro.

6.8 Representación el Modelo Conceptual Geoquímico Profundo

Para el modelaje del campo en tres dimensiones se utilizó el software Voxler que permite visualizar los datos de múltiples componentes para modelos geológicos, geofísicos, modelos de pozo, modelos de yacimiento en tres dimensiones, de manera que facilita la visualización de las estructuras representadas de una mejor manera.

Genera datos tridimensionales en modelos integrales que facilitan toma de decisiones a través de la representación de las partes claves.

7 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en esta investigación con la finalidad de proponer un modelo conceptual geoquímico profundo del campo geotérmico de San Jacinto – Tizate.

7.1 Evaluación de Antecedentes

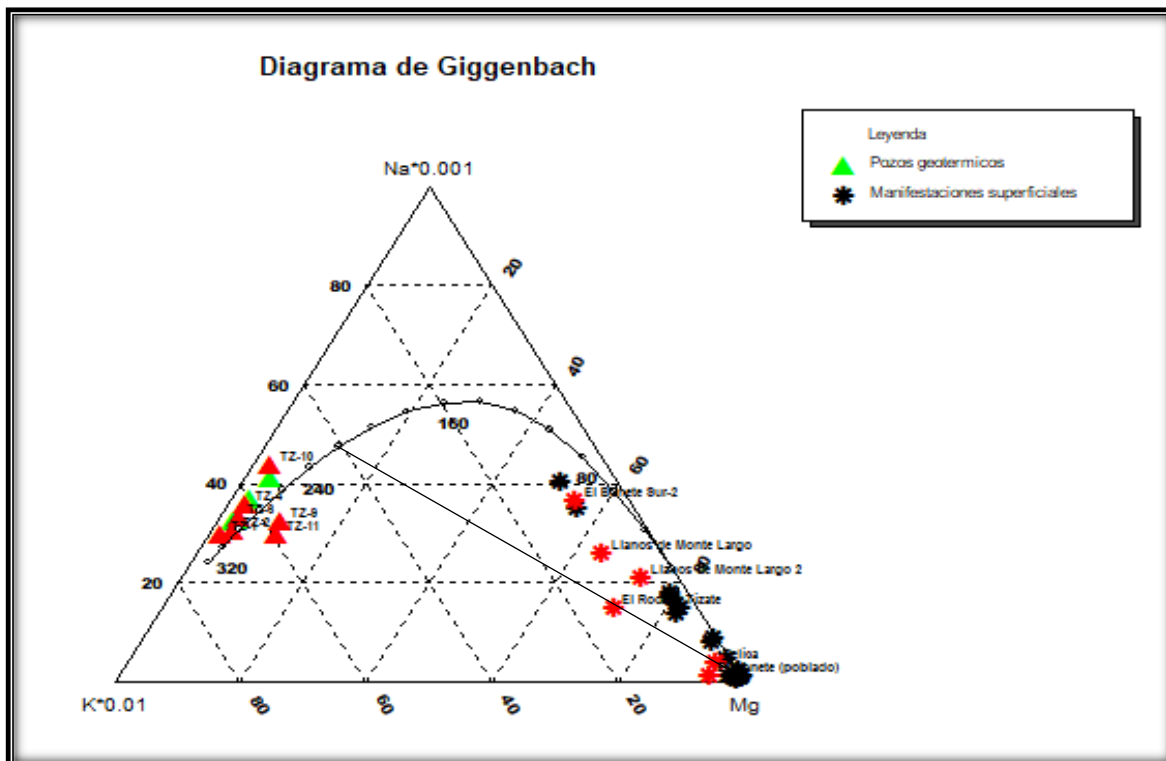
Se evaluaron dos periodos particulares para la realización del modelo conceptual geoquímico profundo de San Jacinto – Tizate, el primero es el background que consiste en la clasificación y caracterización geoquímica de cada pozo en un periodo equivalente al inicio de su producción (se tomaron datos del promedio de un año posterior a su inicio de producción con el objetivo de permitir la estabilización del mismo) y el segundo es el promedio del año en curso 2019. Es importante mencionar también que este trabajo es una representación modélica de la Evaluación geoquímica del campo geotérmico San Jacinto Tizate, Nicaragua presentada en el año 2018 en el Diplomado en Geotermia para América Latina, Edición 2018 por los Ing. Gunter Gámez y Eduardo Echeverría.

7.2 Diagramas Triangulares

Los diagramas triangulares permiten clasificar las aguas según su contenido de especies químicas.

7.2.1 Diagrama de Giggenbach

El diagrama de Giggenbach muestra que los pozos se encuentran en equilibrio, con excepción del TZ-9 y el TZ-11 quienes se encuentran un poco por debajo de la línea de equilibrio total, además da una estimación de la temperatura que va desde los 260° C – 310° C y para el caso del Rodeo Tizate (posible zona de descarga, ver Figura 16) la estimación es de 220° C.



7.2.2 Diagrama Ar-N₂-He

El diagrama Ar-N₂-He con respecto a la línea base revela que los pozos más cercanos a la componente magmática son el TZ-3, TZ-9, TZ-6 es decir, se encuentran más cercanos a la fuente de calor, esto muestra la zona de ascenso TZ-3 que se confirma con las isothermas de geotemperatura calculadas con sílice y sodio-potasio (ver Figura 9.4.1 y 9.4.2). Los pozos que tienden a la componente meteórica son el TZ-14, TZ-5, TZ-10. Para el 2019 se observa un cambio en los pozos con tendencia a la componente magmática, se reflejan ahora el TZ-1, TZ-2, TZ-12 y los pozos que tienden a la componente meteórica son el TZ-5, TZ-14, TZ-13 esto debido a los efecto de la reinyección, confirmado con los diagramas de mezcla Cloruros vs. Entalpía y Cloruros vs Oxígeno-18 (ver Figura 9.2.3). Lo cual indica pozos afectados por reinyección ebullición (TZ-9, TZ-7, TZ-13), los pozos que se encuentra en relativo equilibrio (TZ-5, TZ-4, TZ-3, TZ-1, TZ-2), los pozos afectados por dilución (TZ-10, TZ-11, TZ-8) y los pozos de vapor dominante (TZ-14, TZ-6, TZ-12).

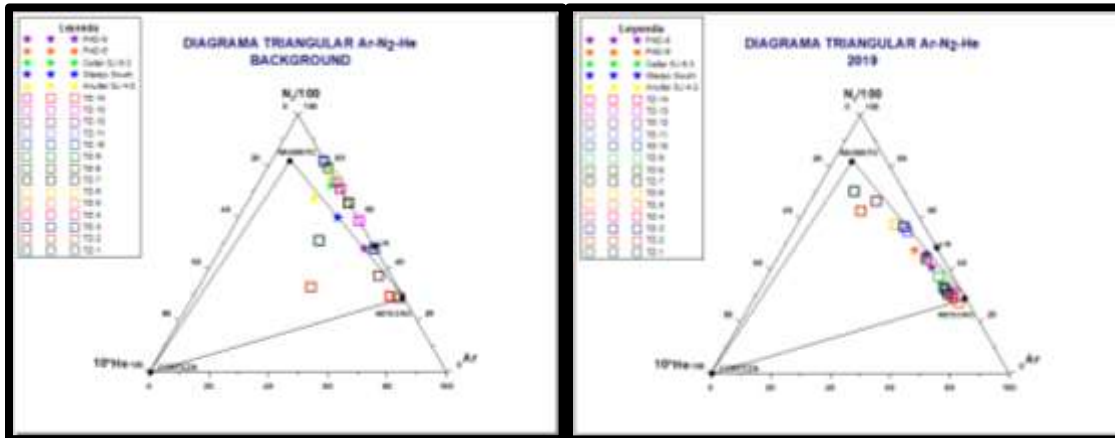


Figura 11: Diagrama triangular Ar-N₂-He (Background vs 2019)

7.2.1 Diagrama H₂S-CH₄-CO₂

El diagrama H₂S-CH₄-CO₂ es un complemento del diagrama triangular Ar-N₂-He. El background muestra que varios pozos tienden a la componente de metano. El metano es un gas de origen magmático primario y los pozos que obedecen a esta tendencia confirman la cercanía a la fuente de calor de pozos tal como el TZ-3. Una tendencia a CO₂ y H₂S significa que es un vapor de procedencia más profunda.

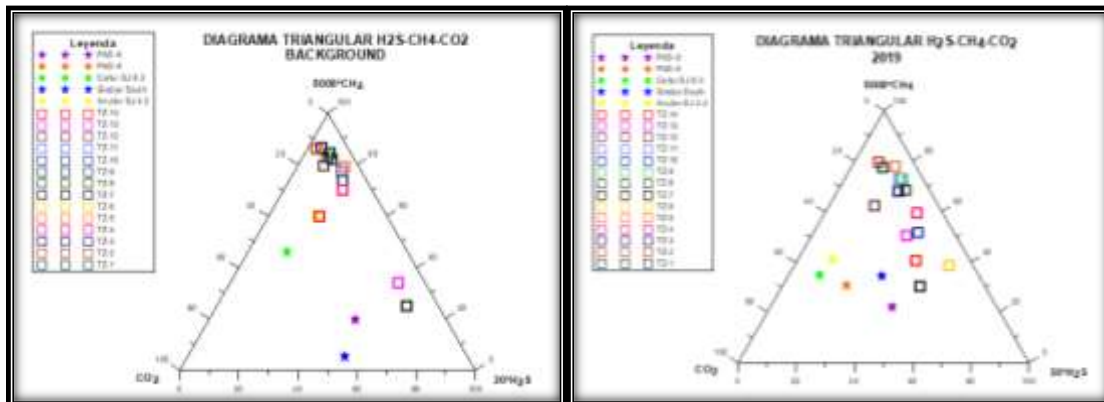


Figura 12: Diagrama triangular H₂S-N₂-CO₂ (Background vs 2019)

7.3 Diagrama de Oxígeno 18 vs. Cl de Pozos Geotérmicos

La alineación y distribución que muestran los pozos geotérmicos permite identificar en primer lugar que en el extremo derecho se ubican tres pozos (TZ-7, TZ-9 y TZ-13), que por la cantidad de cloruros y oxígeno-18 pueden estar afectados tanto por reinyección como por ebullición. De acuerdo con el diagrama de entalpías-cloruros (ver Figura 18) y a la evaluación geoquímica presentada en 2018 por Ing. Gámez estos pozos han presentado ambos procesos físicos. Los pozos ubicados en el extremo izquierdo de puntos agrupados (TZ-8, TZ-10 y TZ-11) sufren proceso de dilución con agua de menor temperatura (posiblemente recarga del sector oeste, ver Figura 14 Evaluación de zona(s) de recarga). En el extremo inferior izquierdo se encuentran los pozos vapor dominante, uno de ellos el

TZ-6, tiene un fork además de su pierna principal, durante el muestreo, de acuerdo a los resultados obtenidos se encontraba generando el fork que es vapor dominante, los tres pozos son TZ-12, TZ-6 y TZ-14, la permeabilidad del pozo TZ-14 es la menor, esto explica por qué tiene mayor cantidad de oxígeno-18, teniendo muy poca permeabilidad, su alimentación de agua es tan limitada que por diferencia de presión el líquido pasa al estado de vapor espontáneamente, permitiendo que el isótopo en cuestión se concentre en mayor proporción que en los otros dos pozos. El TZ-12 presenta mayor permeabilidad que el TZ-14, en este sentido, a mayor permeabilidad y considerando los resultados de TFT (Tracer Flow Testing) que muestran entrada esporádica de fluido bifásico la cantidad de oxígeno-18 es menor. El TZ-6 es un pozo de doble pierna, como se mencionó anteriormente, una de líquido dominante y otra de vapor con una actuación intermitente, el vapor se acumula en la fork hasta que logra vencer la presión del fluido de la pierna principal, esta particularidad causa que el contenido de oxígeno-18 no sea ni el más ni el menos concentrado de los tres pozos productores en estudio. Los pozos restantes ubicados en la parte media se encuentran en relativo equilibrio.

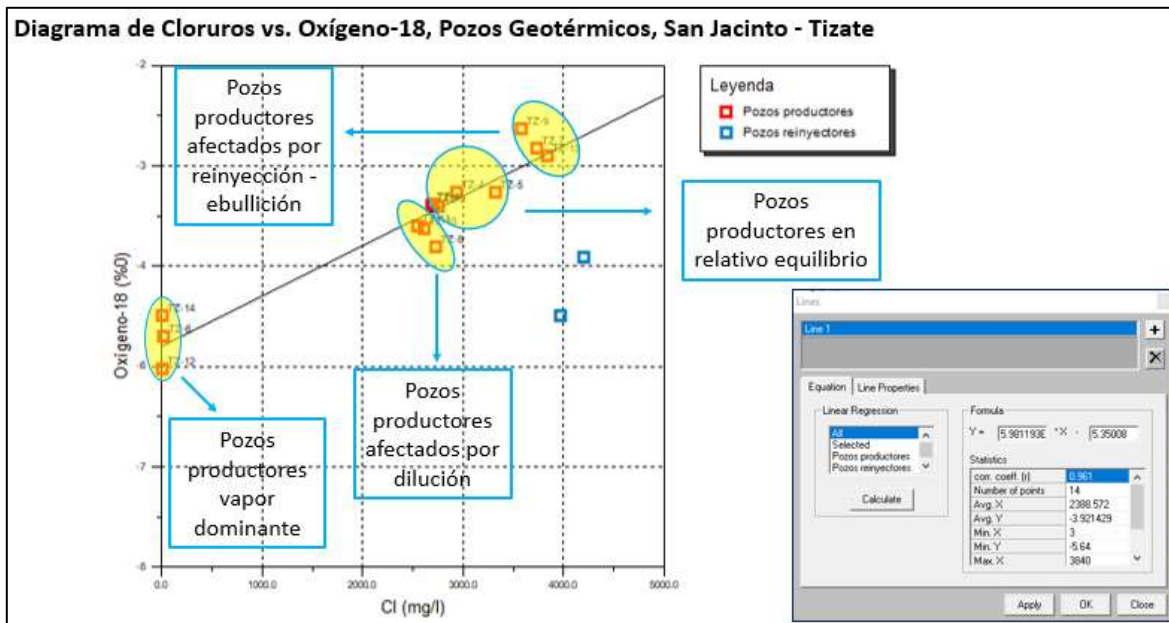


Figura 13: Diagrama de Cloruro vs. Oxígeno-18 de pozos geotérmicos, San Jacinto - Tizate.

Para estimar las zonas de recarga del sistema geotérmico San Jacinto – Tizate se evaluaron dos zonas localizadas en el sector oeste (PAD-6) y norte (PAD-11) del campo en mención, y una muestra de agua de mar de la playa más cercana “Las Peñitas” con el fin de correlacionar y valorar la posibilidad de infiltración en un momento dado de agua de origen oceánico. La concentración de isótopos encontrados en el agua meteórica recolectada en el campo son valores cercanos a los encontrados en el agua de mar, esto se explica por el hecho de que la central geotérmica se encuentra a tan solo 35 km de su playa más cercana (aprox. 200 msnm) y como puede observarse en la Fig. 5 en las primeras precipitaciones de agua meteórica se concentran los isótopos estables de deuterio y oxígeno-18 por presentar un mayor peso. En base a esto se estimó la recarga ploteando el agua de mar

encontrándose una altura aproximada de 263m. De acuerdo a los resultados de la prueba de trazadores más reciente se confirma (a través de cloruros ya se había visto la conexión entre algunos pozos reinyectores y productores) que el patrón de flujo principal es de sureste a noroeste a través de la falla BG y de noroeste a sureste a través de la falla La Cholla, tal como se representa en el modelo propuesto.

La prueba de trazadores sumado a pulsos de gases magmáticos (*ver Anexos*) y dilución en algunos pozos localizados en el oeste del campo (Gunter Gámez, 2018) propone la existencia de una separación entre el sector oeste del este del campo con algún cuerpo rocoso de muy baja permeabilidad, podría hablarse de un patrón de flujo semi-aislado de sureste a noroeste; por tanto la recarga encontrada estimada debe estar alimentando al sector oeste del campo.

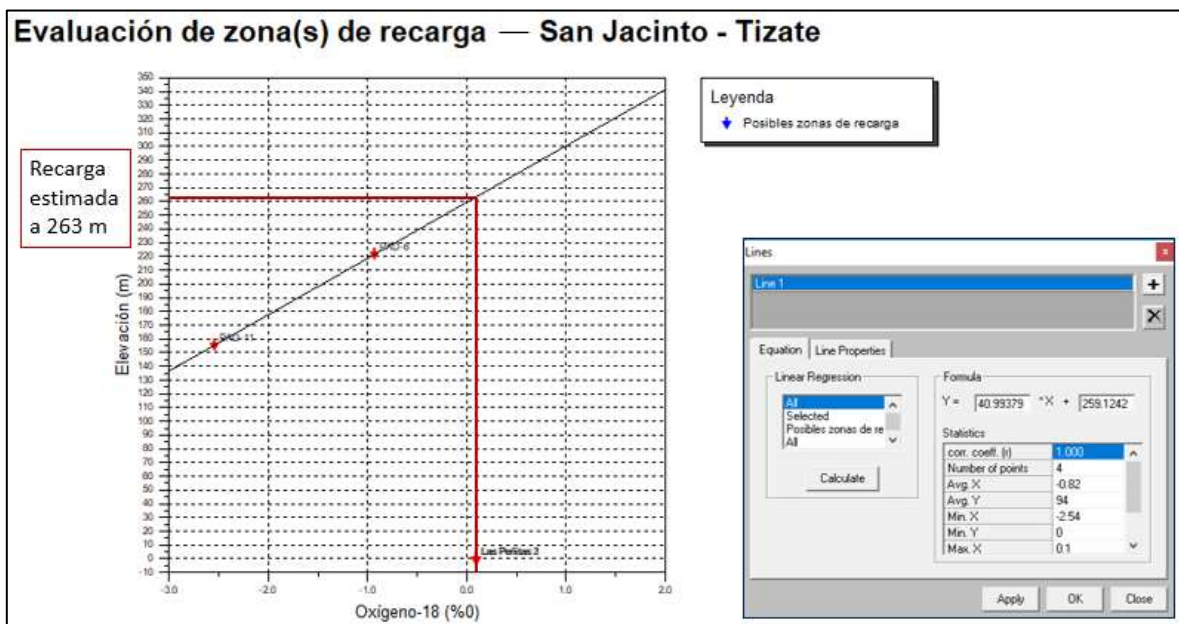


Figura 14: Diagrama Oxígeno-18 vs. Elevación

En el diagrama de Oxígeno-18 vs. Deuterio se puede apreciar la relación lineal que existe entre el agua de mar (Las Peñitas), el agua meteórica recolectada en el oeste y norte del campo para análisis de isótopos y las manifestaciones superficiales (fumarolas) locales de la central geotérmica.

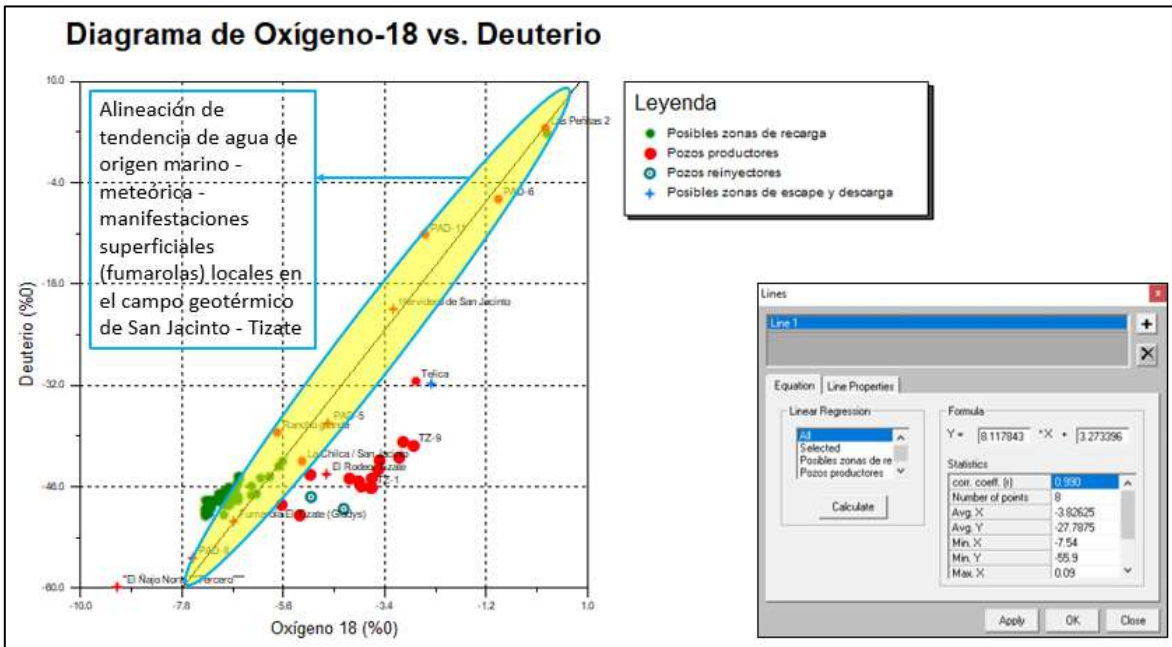


Figura 15: Diagrama de Oxígeno-18 vs. Deuterio

La alineación presentada entre los pozos geotérmicos y las manifestaciones superficiales que afloran en las cercanías de la central geotérmica de San Jacinto – Tizate evidencian una vía de escape controlada de la fase de vapor del reservorio cuyas temperaturas oscilan entre los 30-42 °C y un escape de mayor magnitud en los Hervideros de San Jacinto donde se da un proceso de ebullición que concentra el contenido de oxígeno-18.

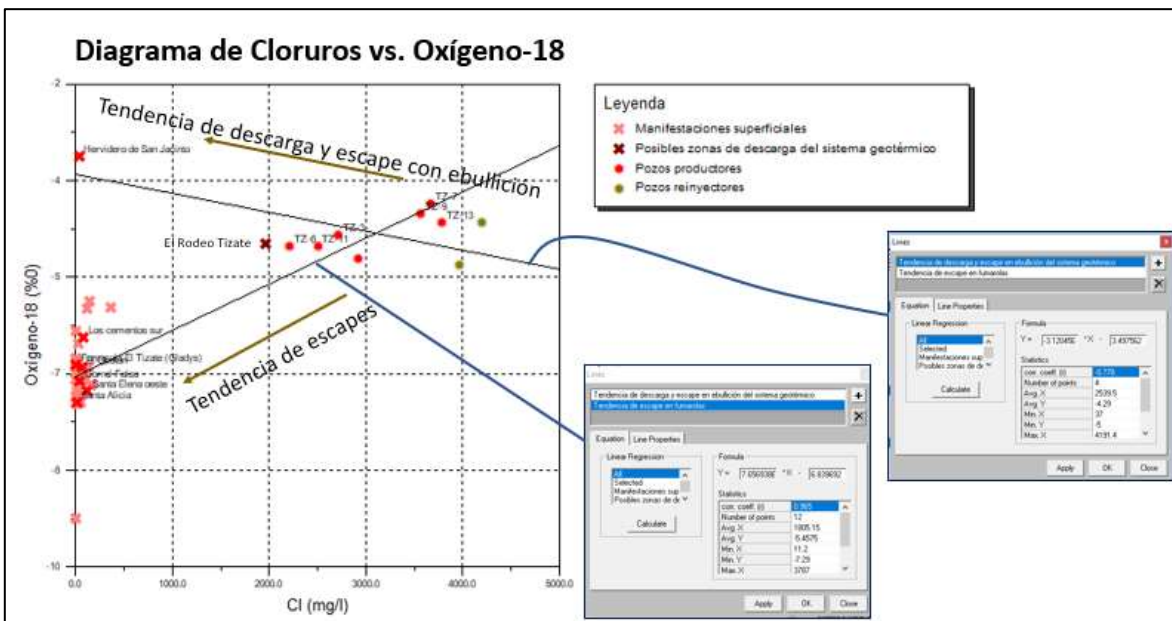


Figura 16: Diagrama de oxígeno 18 vs Cloruro

El diagrama de Oxígeno-18 vs. Deuterio permite clasificar las aguas de acuerdo a su origen y a los procesos termodinámicos que estén sufriendo. Se puede observar que la mayoría

de las manifestaciones superficiales se ubican al lado derecho de la línea meteórica indicando un calentamiento de acuíferos superficiales moderadamente (30-42 °C), con mayor desplazamiento dextral de la línea se ubican los pozos geotérmicos, Los Hervideros de San Jacinto con mayor contenido de oxígeno-18 y deuterio que las manifestaciones superficiales se clasifica como agua evaporada, las aguas meteóricas recolectadas en el oeste del campo presentan una composición isotópica alta, cercana a los valores de agua de mar.

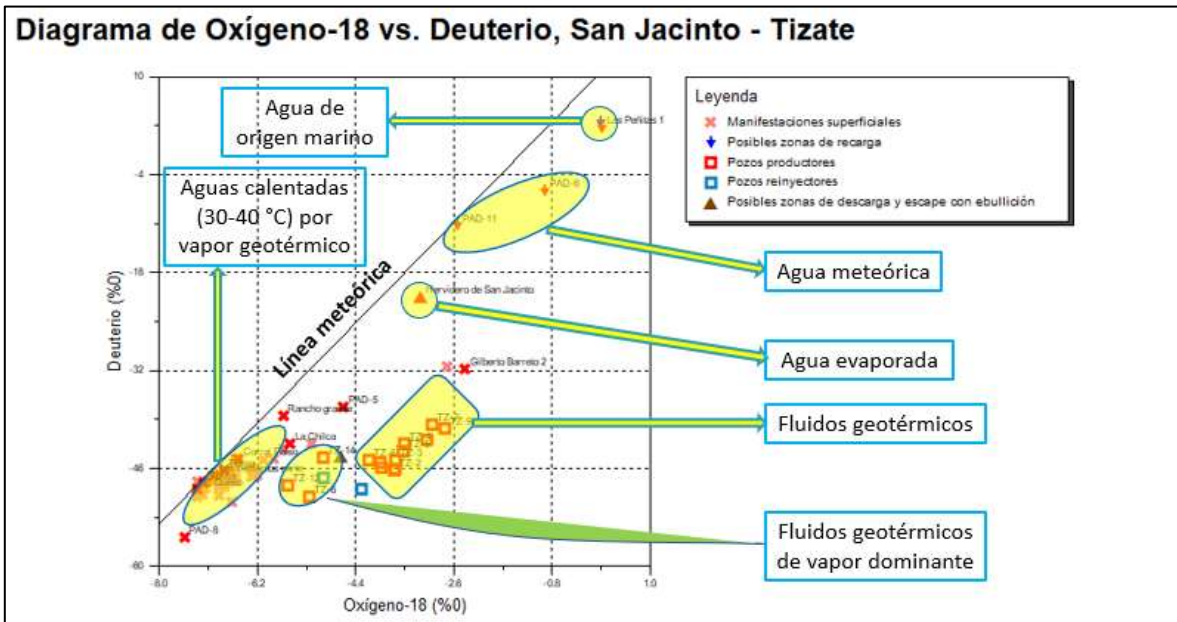


Figura 17: Diagrama de oxígeno 18 vs Deuterio, San Jacinto - Tizate

7.4 Modelos de Mezcla

Los diagramas presentados en la Figura 13 y Figura 18 reflejan que en el campo geotérmico algunos pozos como el TZ-9, TZ-7 y TZ-13 se encuentran muy afectados por procesos de reinyección actualmente y sufrieron procesos de ebullición en periodos anteriores (Gunter Gámez, 2018).

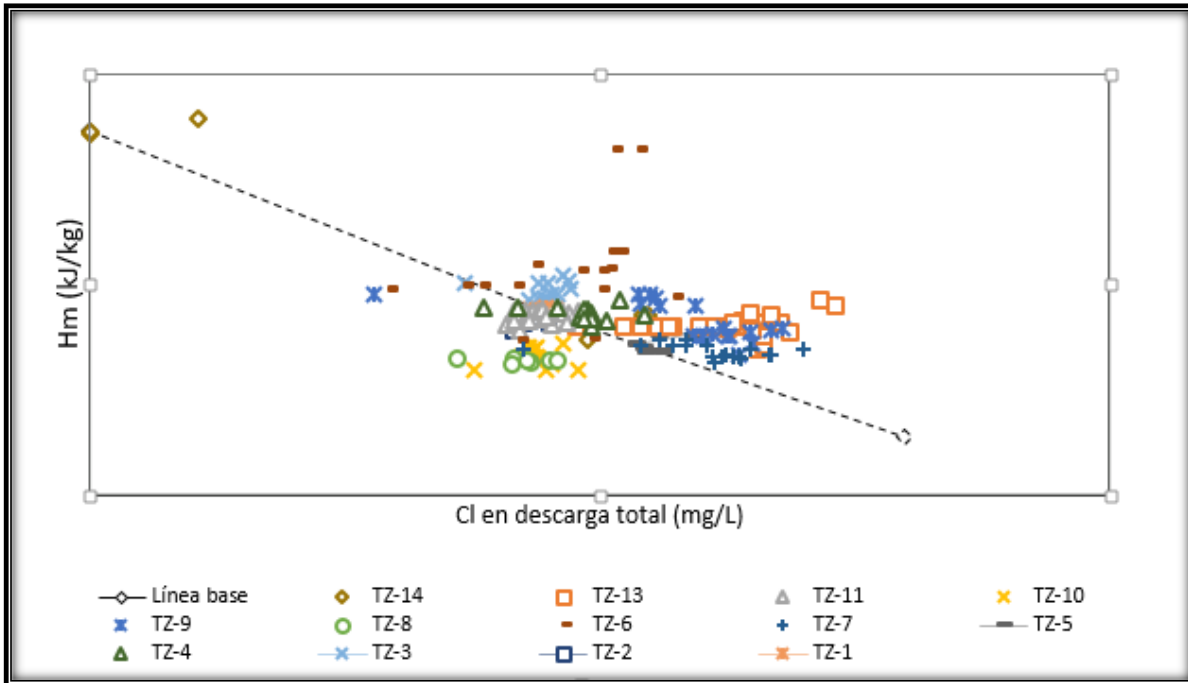


Figura 18: Diagramas de Entalpía medida vs. Cloruro en descarga total

Con los isocontorno de cloruro se aprecia que para la línea base el TZ-14 presentó alto contenido de cloruro al igual que el TZ-9 esta tendencia para el 2019 cambia debido a que TZ-14 inició generando fluido bifásico y actualmente produce predominantemente vapor, el TZ-13, TZ-9, TZ-7 contienen alto contenido de cloruro porque son afectados por reinyección (confirmado con prueba de trazadores), el TZ-3 no es afectado por reinyección. Según la prueba de trazadores lo cual se podría asociar a la zona de ascenso del fluido esto se verifica con el promedio de entalpía medida para el 2019.

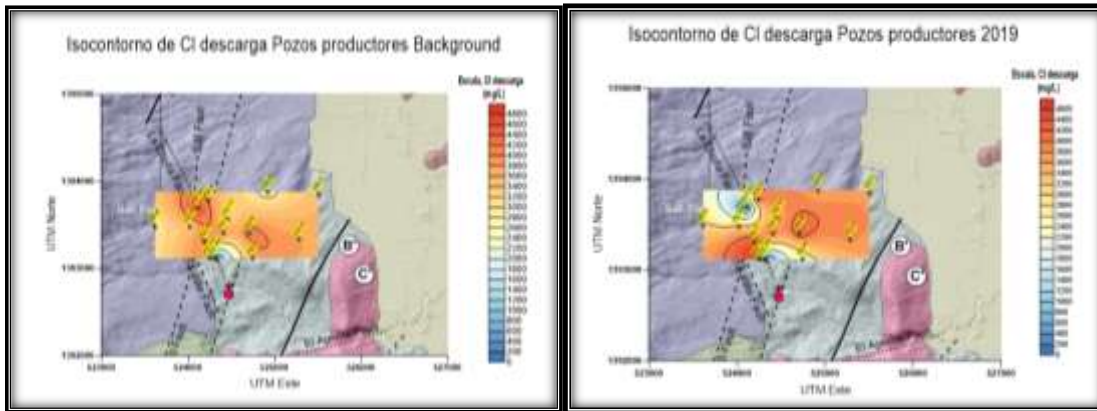


Figura 19: Isocontorno de Cloruro de pozos productores (Background vs. 2019)

La figura de la izquierda muestra el promedio de la entalpía medida para el 2019 lo cual indica dos puntos con alto valores de entalpía esto es porque los pozos TZ-14 y TZ-12 son vapor dominante, cabe mencionar que el pozo TZ-14 con pocos meses de producción, en los primeros 3 meses produjo fluido bifásico y posteriormente solo vapor. Quitando los dos puntos con valores de entalpía de vapor se puede apreciar en la figura de la derecha que

la zona más caliente proviene de TZ-3, TZ-1 y TZ-2 concluyendo junto al isocontorno de cloruro la zona de ascenso del campo.

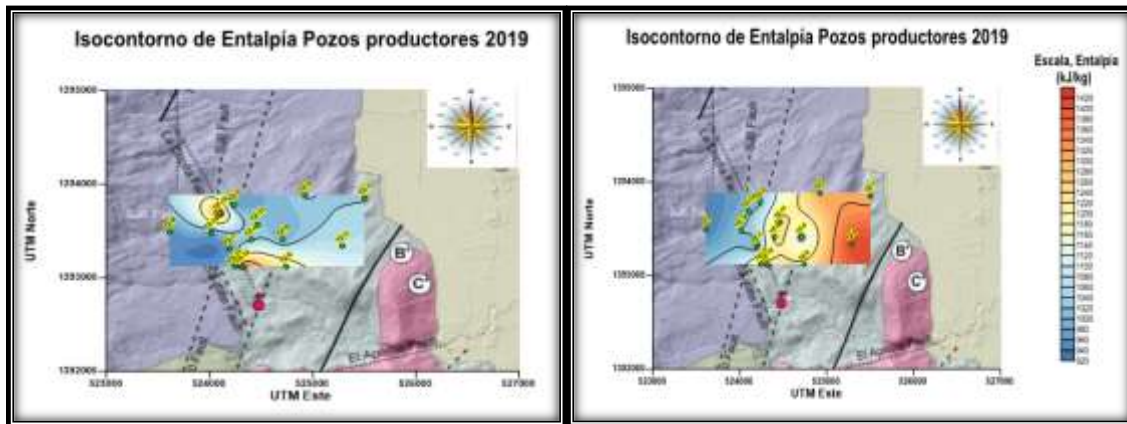


Figura 20: Isocontornos de entalpía medida (2019)

Con el isocontorno de temperatura de SiO₂ Fournier 1977, se observa claramente cuál es la zona de ascenso, que se ubica en los pozos TZ-2, TZ-1, TZ-3, confirmado además junto a isocontorno de entalpía medida, e isocontorno de Temperatura de Na-K Fournier.

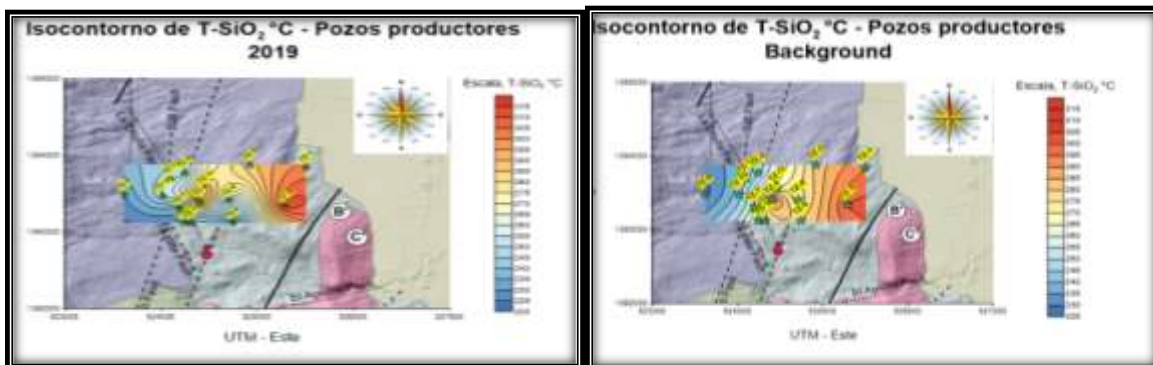


Figura 21: Isocontornos de T-SiO₂ (Background vs. 2019)

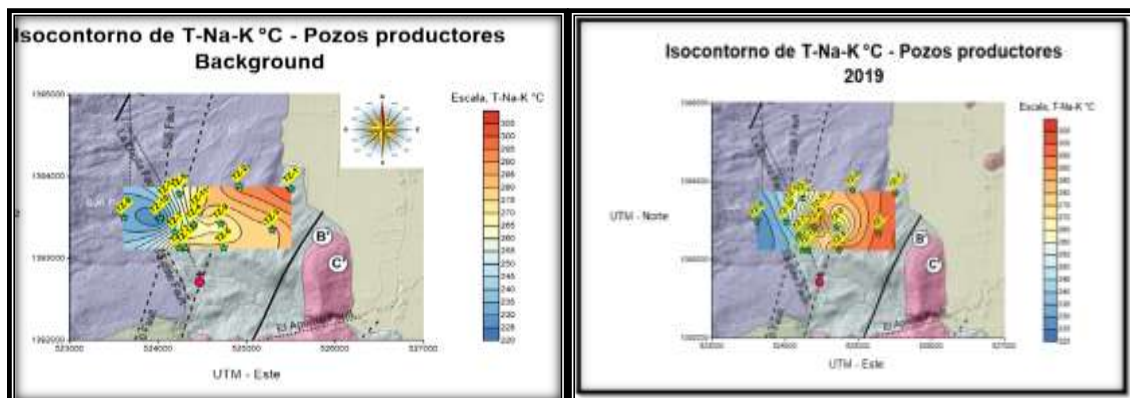


Figura 22: Isocontornos T- Na-K (Background vs. 2019)

7.4.1 Isocontornos CO₂/H₂S

Usando la relación CO₂/H₂S se observa que el background posee altos valores en la relación, eso se puede explicar por la acumulación de gases en el reservorio, esta acumulación dio tiempo suficiente para que el metano (gas magmático primario) se oxidara a dióxido de carbono (CO₂). Para el 2019 la relación alta se encuentra en el TZ-2 y TZ-12.

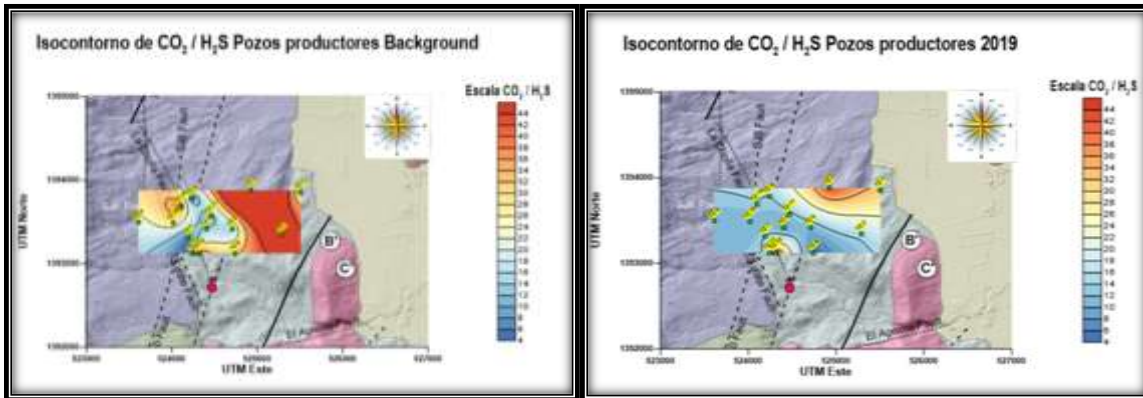


Figura 23: Isocontorno de CO₂/H₂S (Background vs. 2019)

En la figuras 24 se observa un mayor contenido de gas CO₂ en los pozos TZ-2, TZ-1 y TZ-14 relacionado a proceso de ebullición. En el año 2019 (figura de la derecha) se aprecia una disminución en la concentración de CO₂.

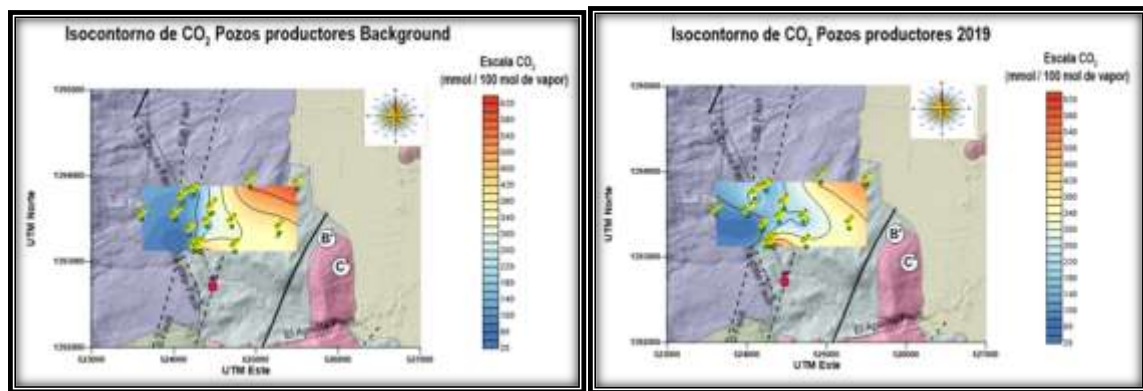


Figura 24: Isocontorno de CO₂ (Background vs. 2019)

En la figura 25 se observa la relación CO₂/H₂, para la línea base la zona más caliente era el TZ-1, TZ-2 y TZ-12; para el 2019 la zona más caliente se refiere al TZ-12, TZ-6 (doble pierna produce vapor y liquido), TZ-14 aparte de estos pozos esta TZ-3, TZ-1 que posiblemente es la zona de ascenso del fluido geotérmico.

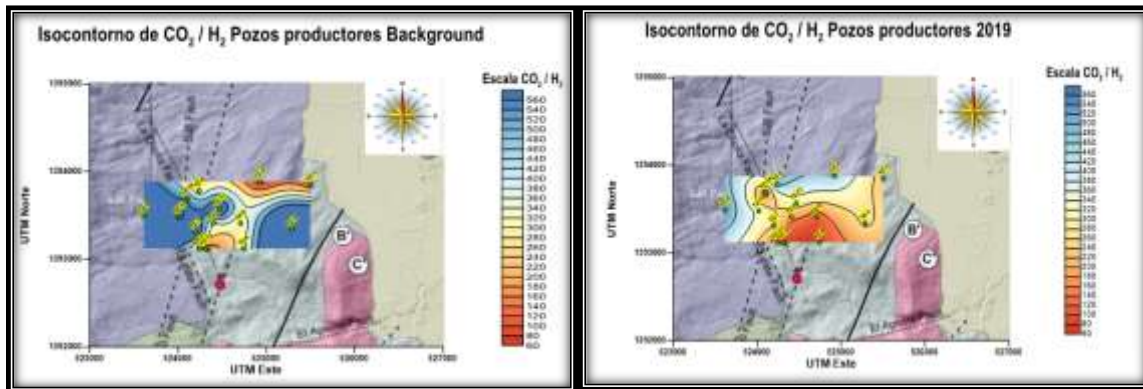


Figura 25: Isocontorno CO₂/H₂ (Background vs. 2019)

7.5 Representación del Modelo Conceptual Geoquímico Profundo.

- La zona de ascenso parte de los pozos productores con mayor temperatura y profundidad: TZ-3, TZ1, TZ-2 y TZ-4 hacia el resto del campo.
- El patrón de flujo de fluido de reinyección tiene orientación de sureste a noreste y la falla principal es la BT y de noroeste a sureste a través de falla La Cholla, las aguas reinyectadas en la zona sureste del campo se mezclan: RW4 y RW6 (BT) y las aguas del RW-1 afectan parte de los pozos centrales del campo a través de la falla La Cholla. En la falla BT hay un punto de intersección donde se da la inclusión de un tercer fluido de reinyección proveniente de RW-5. Debido a la permeabilidad del pozo RW-4 presenta el mayor porcentaje de contenido en la mezcla. En la falla La Cholla la tri-mezcla afecta a casi todos los pozos centrales con excepción del TZ-6 y TZ-12. En la zona occidental del campo los pozos son muy poco afectados por reinyección y su baja afectación viene dada por pozos reinyectores ubicados en la misma zona.
- Lo anterior expuesto evidencia la separación casi aislada de los sectores oeste – este del campo geotérmico.
- La zona de recarga estimada se encuentra al oeste del campo y afecta con proceso de dilución principalmente a los pozos TZ-8 y TZ-10. Se identificó otra zona de infiltración en la parte norte del campo, sin embargo, por el patrón de flujo debería estar alimentando otro cuerpo de agua en dirección más al norte.
- Los afloramientos de fumarolas y manifestaciones superficiales en general son escapes de vapor geotérmico que calientan los acuíferos subterráneos.

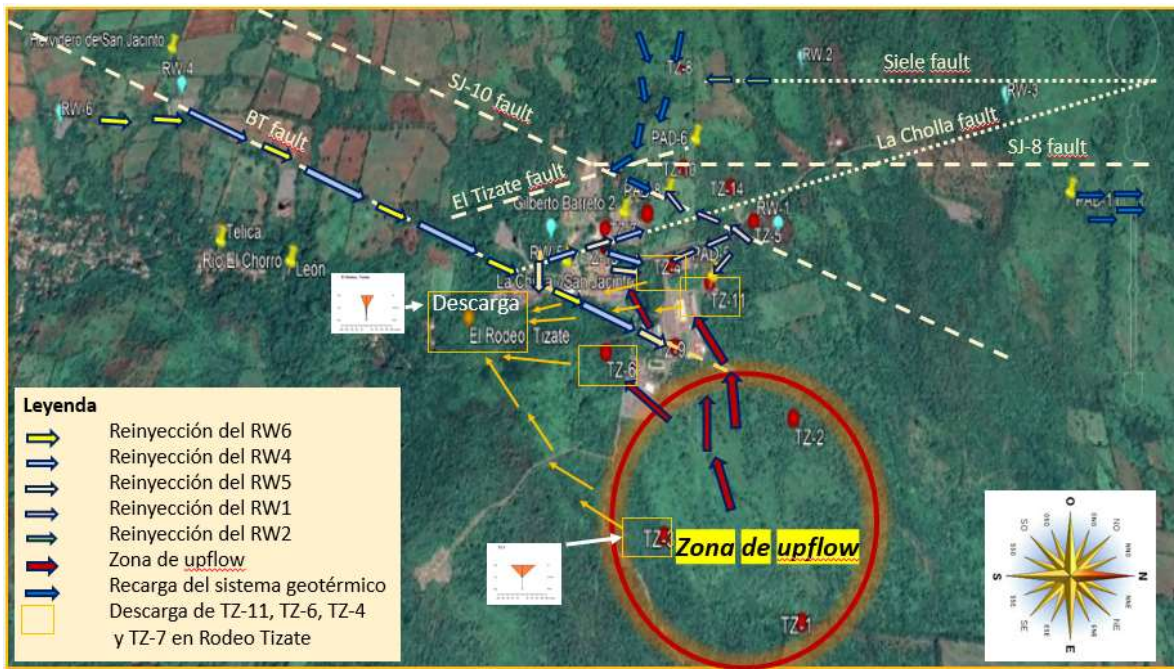


Figura 26: Propuesta de modelo conceptual geoquímico del campo geotérmico de San Jacinto-Tizate

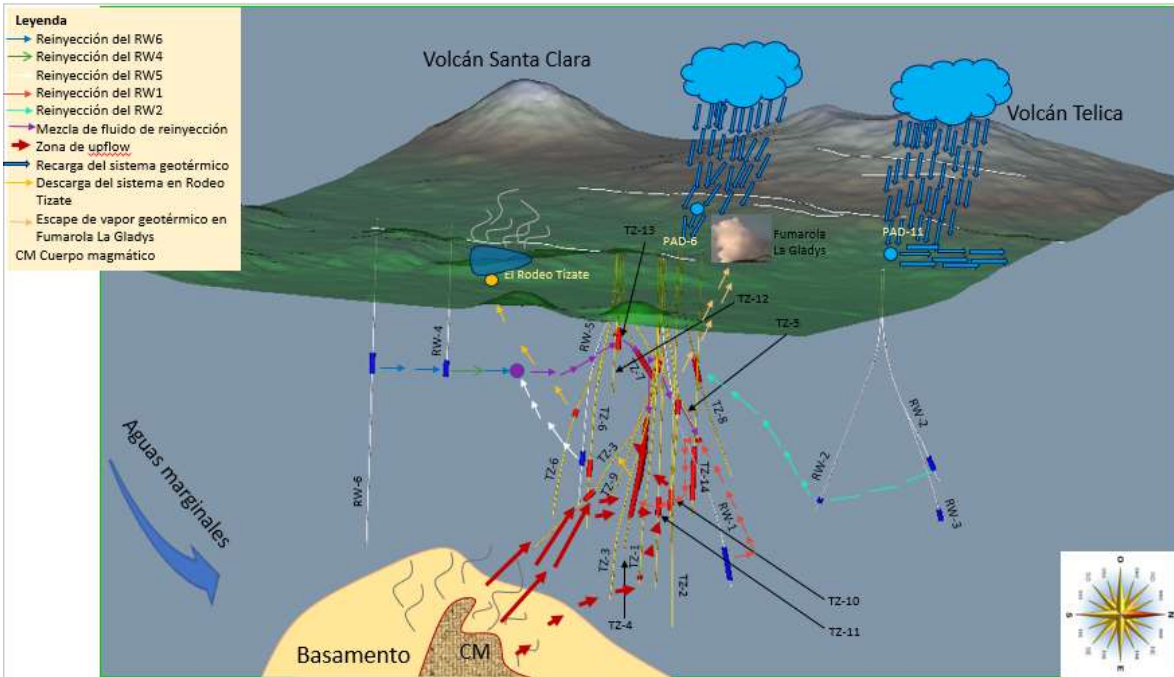


Figura 27: Modelo conceptual geoquímico profundo en 3D del campo de San Jacinto-Tizate

8 CONCLUSIONES

- La fuente de calor es un cuerpo magmático que se encuentra con mayor proximidad a los pozos TZ-3, TZ-1, TZ-4 y TZ-2. Esta cercanía da origen al flujo de ascenso del sistema geotérmico que inicia en los pozos mencionados y se dirige hacia el resto del campo (Evaluado con los diagramas triangulares en Figura 11 y 12).
- El patrón de flujo de reinyección tiene orientación de sureste a noreste a través de la falla BT y de noroeste a sureste a través de la falla La Cholla (de acuerdo con los resultados obtenidos en la última prueba de trazadores).
- Se infiere la existencia de un semi-aislamiento entre el sector occidental-oriental del campo geotérmico (Evaluación de zonas de recarga, Figura 14 y Anexos) que puede estarlo ocasionando algún cuerpo rocoso de muy baja permeabilidad. Es importante mencionar que de acuerdo con los resultados de trazadores el TZ-1 quedaría en un punto convergente entre la zona aislada y la zona caliente y productiva del este.
- Por las cercanías de la central geotérmica de San Jacinto – Tizate con las costas del Pacífico, las precipitaciones meteóricas muestran un contenido alto de isótopos estables de ^{18}O y ^2H .
- Se estimó la zona de recarga a 263m aproximadamente localizada al oeste del campo. Esta entrada de agua de menor temperatura es posiblemente la causante de la dilución en los pozos TZ-8 y TZ-10 (Modelos de mezclas, Figuras 13 y 18).
- La zona de recarga del Este del campo se esperaría encontrar en dirección al sur.
- Existen múltiples escapes reflejados en las manifestaciones superficiales aledañas a la central geotérmica, particularmente en Los Hervideros donde se presenta un proceso de ebullición.
- La poca permeabilidad de los pozos TZ-14, TZ-6 (en la fork) y TZ-12 explica la diferencia del contenido de ^{18}O en cada pozo.

9 RECOMENDACIONES

- Evaluar un estudio isotópico de ^{18}O y ^2H en la zona sur y este del campo geotérmico de San Jacinto – Tizate.
- Realizar un monitoreo de las manifestaciones superficiales de las zonas aledañas de la central geotérmica con el fin de evaluar un estudio químico completo actualizado del comportamiento de escapes de vapor geotérmico.
- Se recomienda explorar la zona norte del campo en la búsqueda de descargas directas del sistema geotérmico.

10 AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios por habernos provisto con la sabiduría, perseverancia y dedicación para llegar hasta este punto dentro de la formación personal de cada uno de nosotros y por su inmenso amor.

A la Universidad de El Salvador, Lageo, UNU-GTP e ICEIDA por el apoyo en la formación profesional y aportar conocimiento para el desarrollo de la geotermia en nuestras naciones.

Al personal de LaGeo que nos atendió a lo largo del curso, por su disponibilidad y brindarnos el apoyo que requerimos.

Al Departamento de Reservoirio de PENZA conformado por: Ing. Julio Guidos, Ing. Gunter Gámez, Ing. Idalia Matus, Ing. Guillermo Chávez y la colaboración de los licenciados Christian Paiz y Zhamir El'Azar.

A nuestras familias, Patricia Ramírez, Adolfo Canales, Nidia Espinoza, Héctor Romero, Dara Rugama, Leonel Letona, Silvia Carrillo, Fernanda, Ángel, por el amor y el apoyo emocional e incondicional que nos han brindado en el camino hasta acá.

A Ing. Melva Su, Ing. Mayela Sánchez, Lic. Gioconda Guevara y Tiffer Martínez, por su apoyo en la gestión para asistir a este proceso de formación.

Y por su constante apoyo en el desarrollo de este trabajo a los Ing. Marco Delgado, Ing. Gunter Gámez e Ing. Julio Guidos.

María José Cortez, Marcela Letona y Ruddy Romero.

11 REFERENCIAS

- Arnórsson. (2000). Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. sampling methods, data handling, interpretation international atomic energy agency. viena.
- Comisión Nacional de Energía. (Octubre de 2001). Vol. 5 Evaluación del área de San Jacinto-Tizate. Obtenido de Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua.
- ENEL. (2017). Obtenido de http://www.enel.gob.ni/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=16&Itemid=2
- García, M. (2019). Fundamentos de Geología y Vulcanismo. Módulo II: Geología aplicada a la geotermia, DGAL 2019.
- Gunter Gámez, E. E. (2018). Evaluación geoquímica del campo geotérmico San Jacinto Tizate, Nicaragua. San Salvador.
- Hernández, K. M. (2018). Propuesta de modelos geológico y geoquímico de un área geotérmica en Nicaragua. San Salvador.
- León, J. L. (2007). Manual de Geotermia. En J. L. León, ciencias de la tierra e ingeniería de reservorios (pág. 89).
- María, M. (2019). Clasificación de fluidos geotérmicos. Módulo III: Geoquímica aplicada a la geotermia, DGAL 2019.
- Martínez, G. (2017). San Salvador.
- Martínez, G. (2017). Geoquímica Preliminar del Prospecto Geotérmico Volcán Mombacho, Nicaragua. DGAL 2017.
- Matus, A. (2019). Geotermometría. Módulo III: Geoquímica aplicada en geotermia, DGAL 2019.
- Nicholson, K. (1955). Geothermal Fluids. Chemistry and exploration Techniques.
- Polaris Energy Nicaragua. (2019). Proyecto: Historia de la Concesión. Obtenido de <http://polarisgeothermal.com/>
- Quijano, J. (2007). Manual de Geotermia, Ciencias de la Tierra e Ingeniería de Reservorio.
- Renderos, R. (2002). Chemical characterization of the thermal fluid discharge from well production tests in the Berlin geothermal field. El Salvador, C.A: UNU-GTP.
- Rodriguez Santoya, R. J. (2008). Geothermometers using computation and Geochemiometrical tools: application to the Temperature prediction of geothermal systems. Revista mexicana ciencia geología 25, 3.

12 ANEXOS



Fotografía 1. Muestreo de isótopos en agua meteórica en PAD-6 por el Lic. Zhamir El'Azar. PENSA.

En los siguientes diagramas obsérvese dos grupos de pozos que presentan pulsos magmáticos en distintos períodos de tiempo.

- Se encuentra coincidencia exacta entre los grupos de pozos en el caso del hidrógeno y helio.
- Se encuentra coincidencia exacta entre los grupos de pozos para el metano y argón. Sin embargo, los pozos que conforman los grupos varían en cuanto a los del ítem anterior.
- El nitrógeno difiere en uno de los pozos integrantes en relación con el metano-argón.

Hay que considerar que no todos los gases se comportan de la misma manera; no viajan a la misma velocidad (los gases más livianos viajan a mayor velocidad, en orden creciente para los gases en estudio sería de la siguiente manera: hidrógeno, helio, metano, nitrógeno y por último el argón, sin embargo se debe tomar en cuenta que los gases que no son

nobles son gases reactivos y al participar en reacciones químicas se transforman en productos que bien pueden ser más o menos pesados que originalmente, por ejemplo el metano se oxida para formar CO₂, el hidrógeno puede participar en muchas reacciones pero principalmente para formar amoníaco con el nitrógeno, etc.).

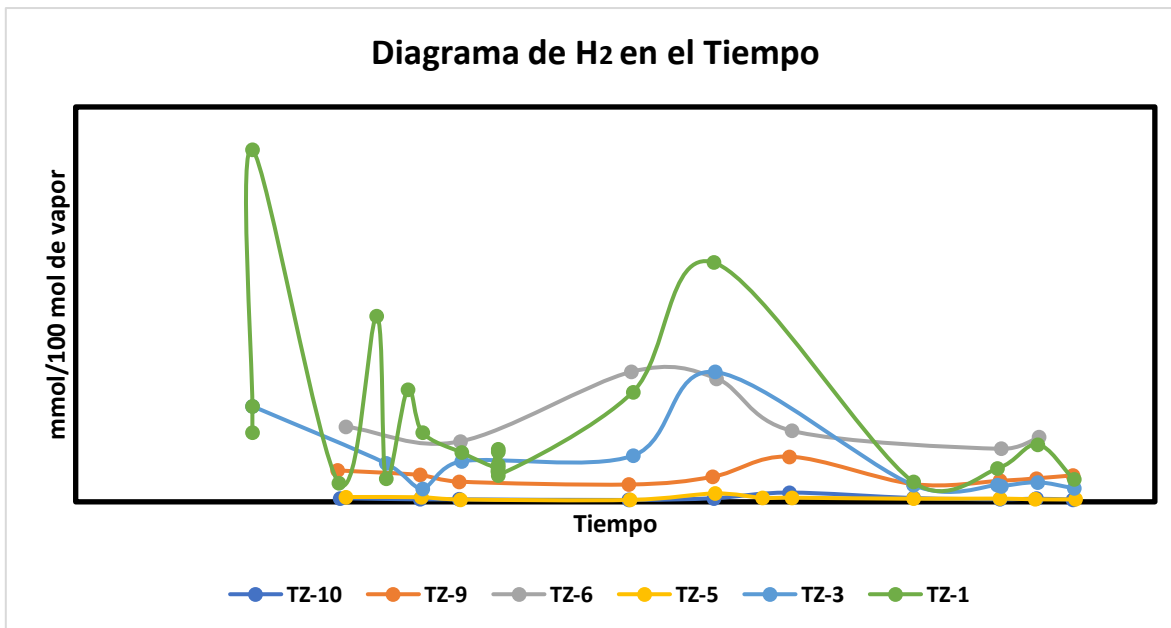
La relación de estos gases en los distintos fluidos geotérmicos de pozos productores sugiere una separación del campo entre los sectores oeste-este. Esto explica que la recarga de agua meteórica en el parte oeste del campo afecta por dilución únicamente a los pozos productores ubicados en esta zona y no a la parte más caliente y productiva del campo que es la zona Este.

La última prueba de trazadores realizada en el campo geotérmico de San Jacinto – Tizate presenta que el patrón de flujo de reinyección es mayoritariamente es de sureste a noreste (falla BT) y de noroeste a sureste (falla La Cholla). Los pozos en el sector oeste son muy pocos afectados por reinyección. El vertido de la sal sulfónica en los pozos reinyectores ubicados en el norte del campo no retornan significativamente a reservorio, concluyendo que el flujo se mueve como se mencionó anteriormente de sur a norte.

a. Hidrógeno

Grupo 1: TZ-1, TZ-3, TZ-5 y TZ-6.

Grupo 2: TZ-9 y TZ-10.

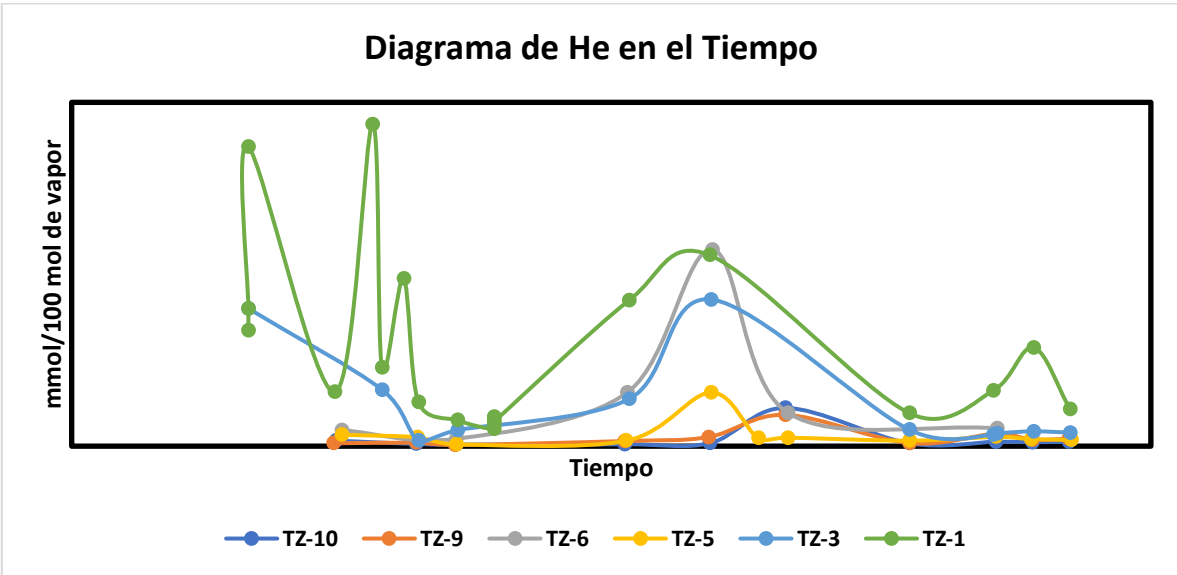


a. Helio

Grupo 1: TZ-1, TZ-3, TZ-5 y TZ-6.

Grupo 2: TZ-9 y TZ-10.

Diagrama de He en el Tiempo

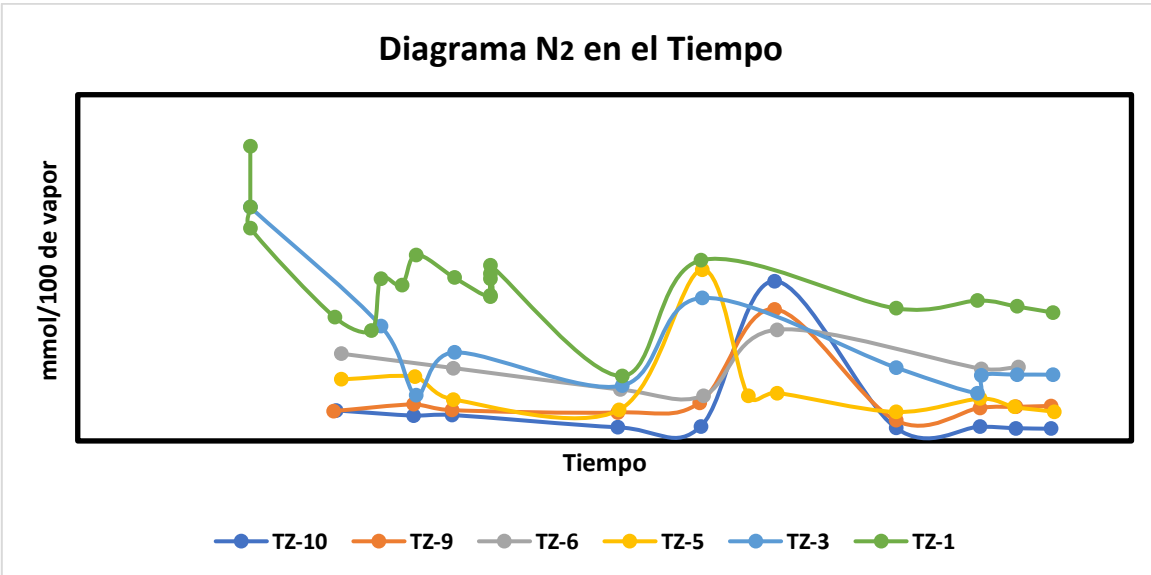


a. Nitrógeno

Grupo 1: TZ-1, TZ-3, y TZ-5.

Grupo 2: TZ-6, TZ-9 y TZ-10.

Diagrama N2 en el Tiempo

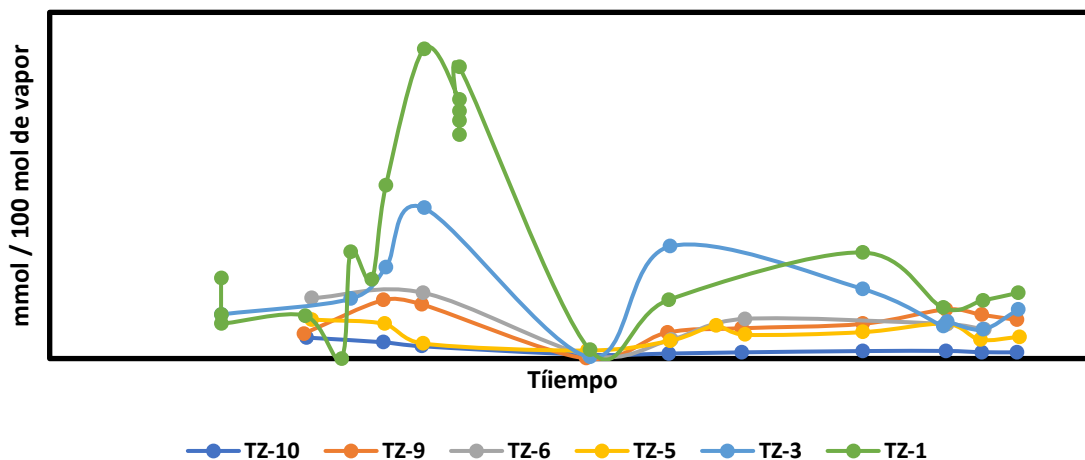


a. Metano

Grupo 1: TZ-1, TZ-3, y TZ-6.

Grupo 2: TZ-5, TZ-9 y TZ-10.

Diagrama de CH₄ en el Tiempo



a. Argón

Grupo 1: TZ-1, TZ-3, y TZ-6.

Grupo 2: TZ-5, TZ-9 y TZ-10.

Diagrama de Ar en el Tiempo

