

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

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA

EDICIÓN 2017



ANÁLISIS Y CONTRIBUCIONES AL MODELO  
CONCEPTUAL DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS AZUFRES  
A PARTIR DE NUEVAS ZONAS PERFORADAS

PRESENTAN:

Yohanna Katherine García Zabala

Adriana Hernández Pérez

ASESORES:

Antonio Matus - Manuel Rivera

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2017

## Tabla de contenido

<b>1. Resumen.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Planteamiento del problema .....</b>	<b>6</b>
<b>4. Justificación del estudio .....</b>	<b>6</b>
<b>5. Objetivo general.....</b>	<b>6</b>
<b>5.1. Objetivos específicos .....</b>	<b>6</b>
<b>6. Marco teórico .....</b>	<b>7</b>
<b>6.1. Modelo conceptual del sistema geotérmico de Los Azufres .....</b>	<b>7</b>
6.1.1. Evolución vulcanológica .....	7
6.1.2. Sistemas estructurales .....	8
6.1.3. Alteración Hidrotermal .....	9
6.1.4. Características de los fluidos .....	9
6.1.5. Fuente de calor.....	12
6.1.6. Estado termodinámico.....	13
<b>7. Metodología y datos .....</b>	<b>14</b>
<b>8. Análisis de datos .....</b>	<b>16</b>
<b>8.1. Análisis geológico.....</b>	<b>16</b>
<b>8.2. Análisis geoquímico.....</b>	<b>18</b>
<b>8.3. Análisis termodinámico .....</b>	<b>22</b>
<b>9. Discusión de resultados .....</b>	<b>23</b>
<b>10. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>30</b>
<b>11. Agradecimientos .....</b>	<b>31</b>
<b>12. Referencias .....</b>	<b>32</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Localización del Campo Geotérmico Los Azufres .....	5
<b>Figura 2.</b> Mapa geológico superficial del campo geotérmico Los Azufres. Tomado de: (Molina, M. 2013).....	8
<b>Figura 3.</b> Movimiento de los fluidos a través de las diferentes estructuras. Modificado de (Pérez, E. 2001).....	10
<b>Figura 4.</b> Comportamiento de los fluidos en el Los Azufres. Tomado de (Molina, M. 2013). .....	11
<b>Figura 5.</b> Isocontornos de la relación CO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> S. Tomado de (Pérez, E. 2001).....	12
<b>Figura 6.</b> Modelo resistivo en dirección N-S del campo geotérmico Los Azufres. Tomado de: (Molina, M. 2013).....	13
<b>Figura 7. a)</b> Perfil de presión vertical de estado inicial en Los Azufres (Iglesias et al., 1985). <b>b)</b> Perfil de temperatura del estado inicial en Los Azufres (Iglesias & Arellano, 1985). .....	14
<b>Figura 8.</b> Ubicación del pozo Az-81.....	15
<b>Figura 9. a)</b> Perdidas de circulación pozo Az-81. <b>b)</b> Serie de registros PT pozo Az-81. Tomado de: (Medina, B. et al. 2017).....	16
<b>Figura 10.</b> Modelo conceptual incluyendo el pozo Az-81, sección en dirección E-O.....	17
<b>Figura 11.</b> Zonas del Sistema Geotermico Los Azufres, sección dirección E-O. Modificado de (Pérez, E. 2001).....	17
<b>Figura 12. a)</b> Contenido relativo de Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> . (Giggenbach, W. 1991). <b>b)</b> Diagrama para análisis de gases relación N/100-10He-Ar (Giggenbach, W. & Goguel. R. 1989).....	18
<b>Figura 13.</b> Diagrama Cl-B. Modificado de (Arellano et al., 2005).....	19
<b>Figura 14.</b> Diagrama Na-K. Modificado de (Arellano et al., 2005).....	19
<b>Figura 15. a)</b> Geotermómetro de Na-K-Mg de (Giggenbach, W. 1991). <b>b)</b> Geotermómetro L <sub>HA</sub> -L <sub>CA</sub> (Giggenbach & Goguel. 1989) .....	20
<b>Figura 16.</b> Diagrama de Fischer-Tropsch (CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> = CH <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O) para el Pozo Az-81. ....	21
<b>Figura 17.</b> Entalpia- cloruros en condiciones previas a la explotación. Modificado de (Arellano, V. et al. 2005) .....	22
<b>Figura 18. a)</b> Relación elevaciones zonas productoras – Presión no perturbada. La línea continua oblicua corresponde al perfil de presión de ebullición contra la profundidad (modelo BPPD de Grant et al., 1982); la línea sub-vertical corresponde a la zona dominada por vapor en la parte superior del depósito. <b>b)</b> Perfil de temperatura de estado natural del reservorio no perturbado. Modificado de (Iglesias, E. & Arellano, V. 1985). ....	23
<b>Figura 19.</b> Estimación de presiones y temperaturas de acuerdo a el abatimiento de la presión. <b>a)</b> Presiones con abatimiento de 0.38 bar/año Zona Sur y 0.58 bar/año Zona Norte comparadas con estado no perturbado <b>b)</b> Temperaturas de saturación correspondientes a las presiones con abatimiento comparadas con temperaturas en estado no perturbado. ....	25
<b>Figura 20.</b> Perfil de isotermas de la zona sur del campo en dirección E-O Modificado de (Pérez, E. 2001) obtenido de la sección observada en la Figura 8.....	26
<b>Figura 21.</b> Mapa de temperaturas a 1800 msnm. Modificada de (Molina, M. 2013) .....	27
<b>Figura 22.</b> Correlación de distancias horizontales de pozo Az-81 con pozos aledaños... ..	28

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Temperatura del pozo usando los geotermómetros de Na-K. ....	21
<b>Tabla 2.</b> Correlación de distancias verticales y horizontales. a) Tomado de (Iglesias, E. et al. 2011). b) Correlación del pozo Az-81 con pozos aledaños.....	28

## **1. Resumen**

Se realizan contribuciones al modelo conceptual del Campo Geotérmico Los Azufres a partir de la interpretación de la información geológica, geoquímica y termodinámica correlacionados con el pozo Az-81 perforado en el 2015 y ubicado en el sector Este de la zona sur del campo.

El análisis se realizó teniendo en cuenta los elementos esenciales de un modelo conceptual en donde se encontró correlación de los diferentes aspectos hacia la nueva zona analizada. Se identificó que el campo presenta un decremento en la presión el cual fue notorio al correlacionar las presiones y temperaturas actuales con las medidas en los inicios de la explotación.

Finalmente se sugiere la propuesta operativa del pozo y se hacen recomendaciones de estudios que se podrían realizar en el futuro con el fin de ampliar el conocimiento del reservorio y comportamiento de la inyección.

## 2. Introducción

El Campo Geotérmico Los Azufres se encuentra ubicado en el eje Volcánico de México en el estado de Michoacán (Figura 1). Corresponde a un sistema hidrotermal con intenso grado de fracturamiento y se encuentra dividido en dos zonas: Maritaro al norte, dominada por la fase líquida y Tejamaniles al sur, dominada por la fase vapor (Barragan, R. *et al.* 2005).



**Figura 1.** Localización del Campo Geotérmico Los Azufres

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), inició la exploración de este campo en 1972 y ha sido explotado con éxito desde 1982, generando actualmente 225 MW y siendo el segundo campo geotérmico más importante de México.

Diversos estudios se han realizado del sistema geotérmico de Los Azufres. (Pérez, E. 2001) y (Molina, M. 2013) concluyen en el modelo geotérmico conceptual basado en información geológica, geofísica, geoquímica y en el análisis de datos y mediciones realizadas en pozos perforados, definiendo las principales características del sistema geotérmico. Por otra parte (Arellano, V. *et al.* 2005) habla acerca de la respuesta que ha tenido el reservoriogeotérmico Los Azufres en su desarrollo para caracterizar las condiciones termodinámicas de los fluidos.

Establecer nuevas estrategias operativas permite que este campo mantenga la explotación sustentable del recurso, una de estas es la reinyección de agua residual al reservorio con el fin de recargarlo y continuar con el aprovechamiento del mismo. La reinyección se ha realizado desde los inicios del campo en el sector Oeste, de acuerdo a los estudios químicos se determina hay una influencia hacia la zona productora, la salmuera inyectada proveniente del proceso de generación es enviada hacia presas de enfriamiento para posteriormente dirigirla por gravedad hacia los pozos inyectora a temperaturas que oscilan entre los 40 y 50°C.

Como parte del desarrollo y expansión del Campo Geotérmico se realiza la perforación de nuevos pozos y por tanto se requiere la actualización y estudio de la información obtenida en dichas perforaciones.

En el presente trabajo se muestran contribuciones al modelo conceptual a partir de la información obtenida en el sector Este con la perforación de un nuevo pozo, de acuerdo a esto se sugiere el uso del pozo planteando una estrategia operativa.

### **3. Planteamiento del problema**

Producto de la expansión y desarrollo del campo es importante actualizar la información vigente que permita tomar decisiones de explotación y aprovechamiento del recurso, de ahí la inquietud de actualizar el modelo conceptual en este sector.

La explotación comercial del reservorio por más de 30 años ha dado como consecuencia un decremento en la producción y la presión del recurso, es por esto que de acuerdo al análisis de los estudios realizados con anterioridad y la información vigente el Campo Geotérmico tiene la necesidad de continuar con la recarga del reservorio también en el sector Este.

### **4. Justificación del estudio**

La realización del presente trabajo pretende actualizar la información en el sector Este del Campo Geotérmico Los Azufres con el fin de comprender de manera general el comportamiento del reservorio en este sector y establecer la base para estudios posteriores.

### **5. Objetivo general**

Integrar al Modelo Conceptual del Campo Geotérmico Los Azufres la información geológica, geoquímica y termodinámica del pozo Az-81 perforado al este de la zona sur del campo y sugerir la estrategia operativa en base a dicha información.

#### **5.1. Objetivos específicos**

- Reconocer los aspectos de la geología del pozo (litología, alteraciones y sistemas de fracturamiento) para correlacionarla con la geología del sistema geotérmico observada en el modelo conceptual actual.
- Identificar las características y comportamientos de los fluidos del pozo para determinar si son consistentes con los fluidos de la zona productora del campo.
- Obtener perfil y mapa de isotermas del campo para observar el comportamiento de la temperatura hacia el sector Este a partir de la información del nuevo pozo.
- Sugerir la posible estrategia operativa del pozo a partir de los análisis realizados.

## 6. Marco teórico

### 6.1. Modelo conceptual del sistema geotérmico de Los Azufres

El sistema geotérmico Los Azufres, corresponde a una secuencia volcánica que inició su actividad hace aproximadamente 1 Ma en donde se reconocen tres eventos eruptivos de lavas de composición silícica y algunos depósitos de ignimbritas, esta secuencia actúa como reservorio y capa sello dependiendo de sus características (Dobson & Mahood, 1985). Dicha secuencia ha sido afectada por tres sistemas de fallas: un sistema NNO-SSE el cual afecta rocas del Mioceno y permite la circulación de los fluidos en profundidad, un sistema en dirección E-O importante en el desarrollo del campo geotérmico debido a que es el que lleva los fluidos a superficie y otro sistema identificado en dirección NE-SO (Pérez, E. *et al.* 2010).

#### 6.1.1. Evolución vulcanológica

El Campo Geotérmico Los Azufres corresponde a uno de varios sistemas geotérmicos que se encuentran en la zona volcánica de composición silícea del Pleistoceno en el eje volcánico de México. En este se identifican cuatro unidades principales de mayor a menor edad (Molina, M. 2013), (Figura 2):

- **Unidad andesítica de Mil Cumbres:** (18–1.0 Ma) se encuentra presente en todo el campo teniendo un espesor promedio de 2.700 m, corresponde litológicamente a rocas andesíticas con algunas intercalaciones de paleo-suelo, rocas basálticas y aglomerados volcánicos. Esta unidad corresponde a las rocas del reservorio.
- **Unidad de Riolita Agua Fría:** (1-1.5 Ma) secuencia silícica de hasta 1,000 m de espesor, se superpone a la Unidad Mil Cumbres, corresponde litológicamente a lavas riolíticas. Está presente en niveles poco profundos principalmente en la parte sur y central del campo. Esta unidad corresponde a la capa sello.
- **Dacita Tejamaniles:** corresponde a lavas jóvenes que se encuentran localmente en el sector sur del campo sobre la Riolita de Agua Fría.
- **Depósitos piroclásticos:** se considera que esta unidad incluye una variedad de depósitos piroclásticos superficiales jóvenes, que se han originado a partir de una actividad volcánica relativamente joven en las cercanías del campo.



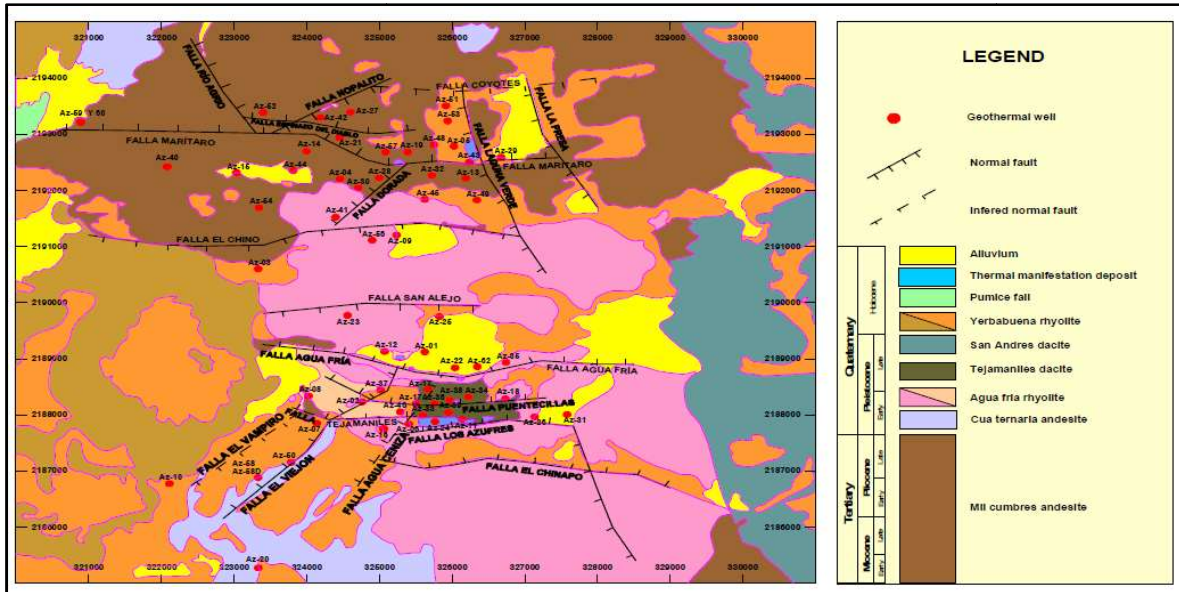


Figura 2. Mapa geológico superficial del campo geotérmico Los Azufres. Tomado de: (Molina, M. 2013)

### 6.1.2. Sistemas estructurales

Estudios realizados por (Pérez, E. *et al.* 2010) y (Molina, M. 2013) mencionan que el campo de Los Azufres se encuentra dominado por tres tendencias principales de fallamiento. Estas tres tendencias definen la permeabilidad y están representadas por las principales fallas que se han mapeado dentro o cerca del campo.

- **Tendencia NNO-SSE:** en la zona norte se encuentran las fallas La Presa, Laguna Verde y Río Agrío. Este sistema de fallas tiene mayor expresión en profundidad que en superficie y se extiende a través del campo hasta el basamento, teniendo en cuenta análisis topográficos y análisis de datos geofísicos. Las fallas con tendencia NNO-SSE se cortan mediante el sistema de fallas E-O, esto supone que las fracturas de tendencia NNO-SSE son un sistema más antiguo en comparación con los sistemas de fallas con tendencia E-O.
- **Tendencia NE-SO:** en el sur corresponde a las fallas de El Vampiro, El Viejón y Agua Ceniza y en el norte a las fallas de Nopalito y Dorado.
- **Tendencia E-O:** corresponde a un sistema de fallas principalmente normales con buzamiento en dirección hacia el norte con alto grado de inclinación, es la más significativa debido a que es la que ejerce influencia sobre las características del sistema geotérmico y es la que mayor evidencia tiene en superficie. En el sector sur corresponde a las fallas San Alejo, Agua Fría, Puentecillas, Tejamaniles, Los Azufres y El Chinapo y en el sector norte a las fallas Laguna Larga, El Chino, Espinazo del Diablo, Coyotes, Maritato y La Cumbre.

### **6.1.3. Alteración Hidrotermal**

El tipo de alteración hidrotermal que se ha identificado en el Campo Geotérmico Los Azufres es típico de un sistema geotérmico volcánico de alta temperatura, los minerales secundarios que se han obtenido en la perforación incluyen minerales de arcilla, calcita, clorita, pirita, cuarzo, epidota, hematita, anfíbol hidrotermal y otros óxidos. Se han identificado varias zonas de diferentes conjuntos de minerales hidrotermales, distinguidas principalmente sobre la base de la primera aparición de los minerales de alteración (en función de la profundidad en el pozo). Se ha encontrado que la aparición de la epidota a 1300 m de profundidad vertical se correlaciona con temperaturas de formación de aproximadamente 250°C, mientras que la primera aparición de anfíbol tiende a coincidir con temperaturas cercanas a 300°C. Por otra parte, la aparición de la epidota se ha correlacionado con el tope de la zona de reservorio productivo, mientras que la primera aparición de anfíbol se ha inferido que corresponde con la base del reservorio productivo, (Molina, M. 2013).

Uno de los elementos más importantes de un sistema geotérmico es la capa sello debido a que reduce las pérdidas de calor del reservorio. En los análisis geológicos de pozos de producción que se han realizado en Los Azufres, se identificaron minerales de alteración argílica y argílica-filítica en la unidad Riolita de Agua Fría, donde se encontraron arcillas como esmectita, zeolita y clorita en profundidades menores de 500 a 700 m. Esta alteración es la que ha impermeabilizado la unidad riolítica, permitiendo que esta actúe como capa sello.

En la zona sur, la distribución de la capa sello desaparece alrededor de la falla El Chinapo, mientras que en la zona norte desaparece alrededor de la falla de Laguna Verde al este, y alrededor de las fallas Coyotes y Nopalito. Por otra parte, en la zona central la capa sello es relativamente débil, así como las manifestaciones hidrotermales superficiales, (Molina, M. 2013).

### **6.1.4. Características de los fluidos**

Diferentes autores como (Nieva, D. *et al.* 1987), (Barragan, R. *et al.* 2005), (Barragan, R. *et al.* 2011) entre otros han realizado estudios acerca del origen, características y comportamiento de los fluidos en el campo geotérmico Los Azufres. En los anteriores estudios se ha identificado que el origen de los fluidos de los Azufres, corresponde a una combinación de la interacción de agua magmática con agua meteórica que se ha infiltrado en el subsuelo desde periodos prehistóricos.

En Los Azufres, el fluido profundo es de composición neutra sódico-clorurada. Se ha identificado el cloruro como el anión dominante y aunque las concentraciones varían dependiendo del pozo, en aguas separadas a presión atmosférica la concentración de cloruros es de aproximadamente 2.500 a 4.000 ppm.

Para los gases no condensables (GNC), la concentración en el reservorio en fase líquida puede ser menor al 1% en peso, mientras en la fase de vapor oscilan entre 2% y 8% en peso. El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el componente principal de los GNC y su contenido es de más del 90% molar. Se ha encontrado también otros GNC como el  $\text{H}_2\text{S}$  (0.5-18% molar) y trazas de  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , Ar y He. Las concentraciones de gas en el sector sur siempre han sido mayores que en el sector norte, (Molina, M. 2013).

Una de las características más importantes de los fluidos de Los Azufres es que muestran altas concentraciones de boro en comparación con otros campos geotérmicos, esto podría ser interpretado por la interacción del fluido profundo con la roca sedimentaria metamorfoseada del basamento con un alto contenido de boro. Un contenido relativamente alto de  $\text{NH}_3$  hasta 3.5% molar en GNC de los vapores de pozo también indica la contribución de las rocas sedimentarias a los fluidos del reservorio.

Los estudios que se han realizado en cuanto al patrón de movimiento de los fluidos en los Azufres sugieren que las estructuras con tendencia NNO-SSE son las que controlan el movimiento regional del fluido parental en profundidad con dirección hacia en NO, esto considera a el sistema hidrotermal de Araro ubicado a 20 km hacia el NO de Los Azufres como la zona de descarga de fluidos del sistema, (Figura 3).

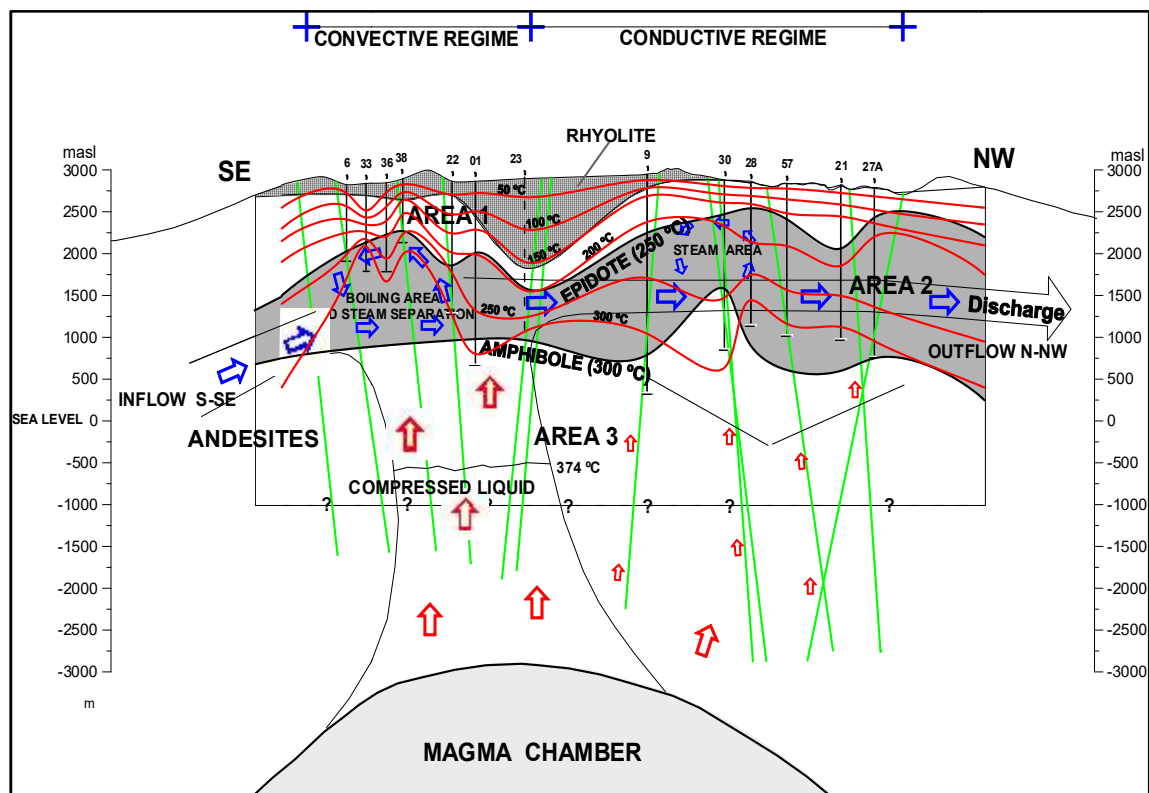
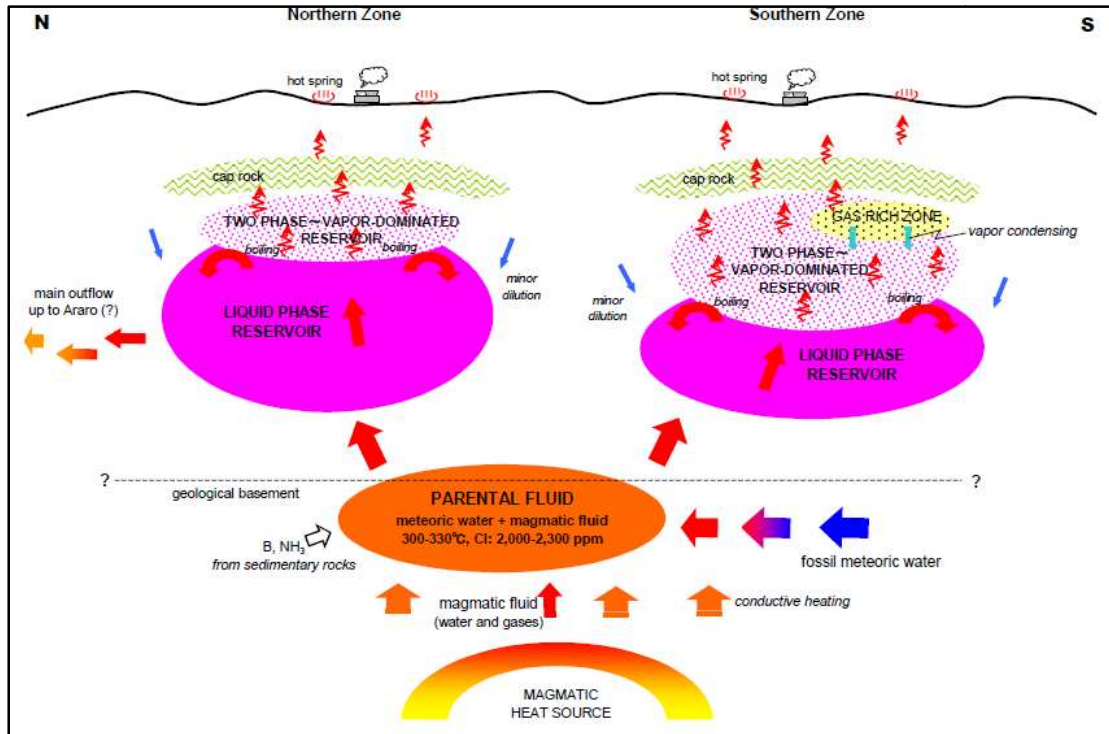


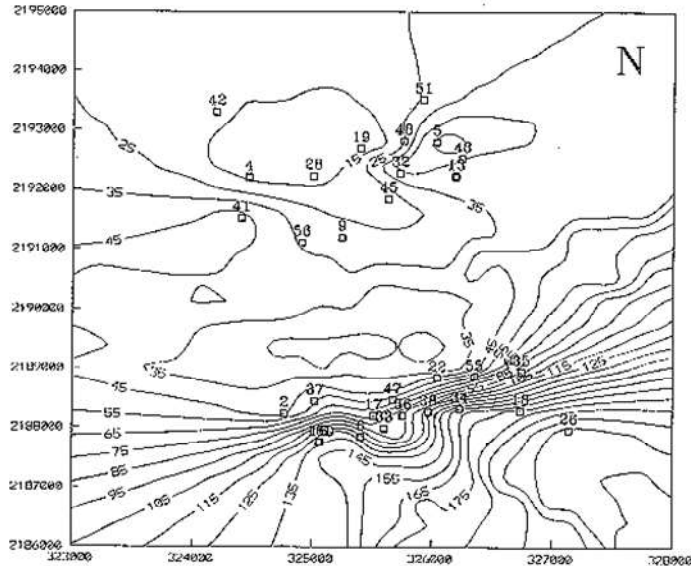
Figura 3. Movimiento de los fluidos a través de las diferentes estructuras. Modificado de (Pérez, E. 2001).

El fluido parental asciende a través de las zonas altamente permeables desarrolladas en las unidades andesíticas, produciendo un sistema de circulación convectiva debajo de la capa sello y generando ebullición tanto en la zona norte como en la zona sur. Lo anterior proporciona una zona del reservorio dominada por vapor siendo más evidente este fenómeno en la zona sur debido a que la ebullición parcial de vapor en la parte más superficial del reservorio en la zona sur produce zonas más ricas en gas, (Molina, M. 2013), (Figura 4.).



**Figura 4.** Comportamiento de los fluidos en el Los Azufres. Tomado de (Molina, M. 2013).

Con la relación  $CO_2/H_2S$  (Figura 5) se observa que los valores más altos se encuentran en la zona de mayor producción y esto se debe a que el proceso de ebullición es más significativo, debida a la diferencia de solubilidades de ambos gases ya que en la fase vapor aumenta en  $CO_2$  y disminuye el  $H_2S$ , con la cual se puede identificar la zona de ascenso por el aumento de la relación. Esta relación se ve disminuida en la dirección SE-NO del campo.



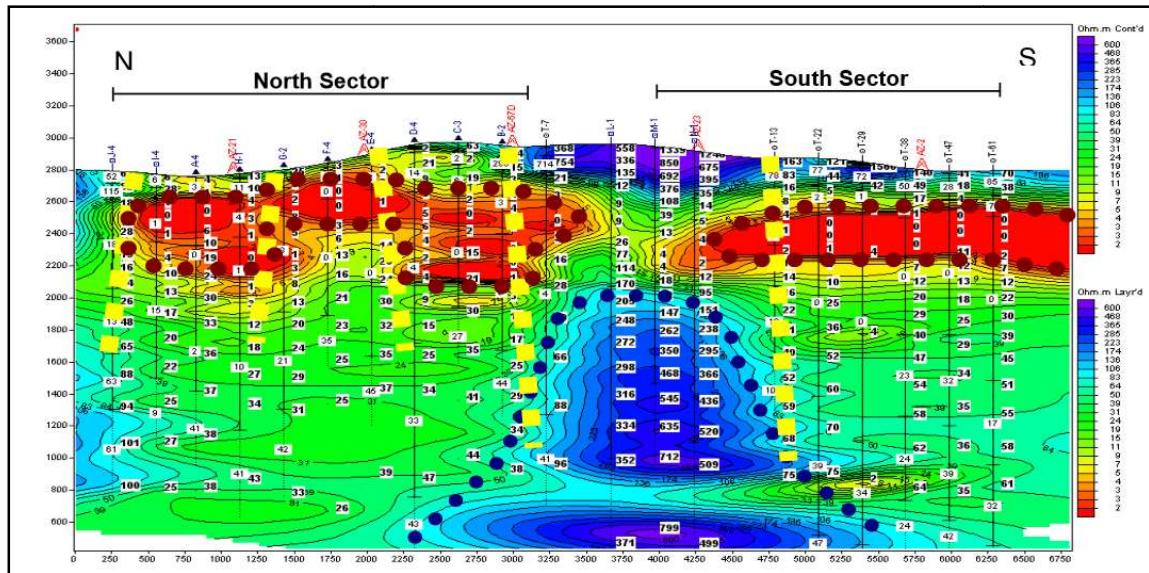
**Figura 5.** Isocontornos de la relación CO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>S. Tomado de (Pérez, E. 2001)

### 6.1.5. Fuente de calor

Poco se ha hablado a cerca de la fuente de calor, sin embargo, (Molina, M. 2013), menciona que el calor de Los Azufres es suministrado al sistema por una cámara magmática de la cual no se puede precisar sus características aun cuando una anomalía alta local de Bouguer, altos valores magnéticos totales y el modelo resistivo (Figura 6) en el campo sugieren la posibilidad de existencia de una intrusión magmática bajo el campo. La naturaleza de la fuente de los fluidos que alimentan el sistema no se puede determinar con total precisión. Sin embargo, el fluido a alta temperatura (> 320°C) es causado principalmente por la circulación del agua meteórica a niveles profundos que ingresan al sistema y se mezclan con el agua magmática.

El modelo resistivo se usó también para definir los límites del sistema, teniendo en cuenta la isoterma de 225°C, la aparición de la epidota y los pozos de producción. (Molina, M. 2013)





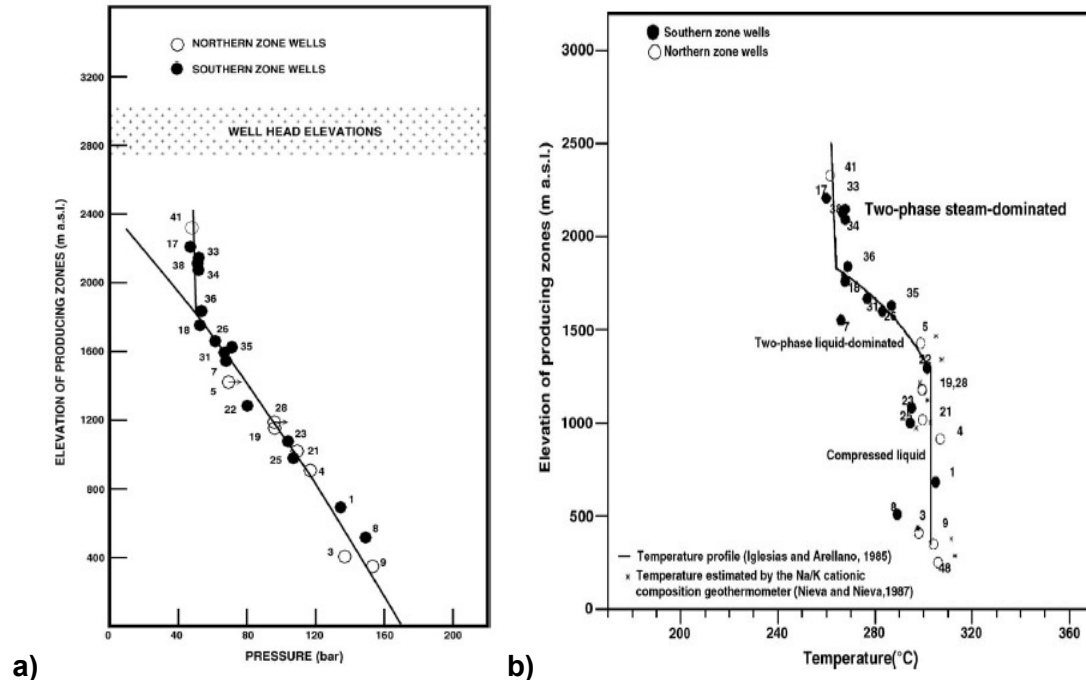
**Figura 6.** Modelo resistivo en dirección N-S del campo geotérmico Los Azufres. Tomado de: (Molina, M. 2013).

### 6.1.6. Estado termodinámico

El sistema geotérmico de Los Azufres se encuentra dividido en 3 fases. El perfil de presión de estado natural del reservorio indica la presencia de una región en fase líquido comprimido en la base y una zona bifásica en el reservorio dividido en una fase dominada por líquido y otra fase dominada por vapor.

La distribución vertical de la presión en el reservorio en condiciones iniciales se muestra en la (Figura 7-a), en donde se observa que la fase continua en el reservorio es predominantemente líquida, aunque puede haber algo de vapor. Además, se observa que el ajuste del perfil de ebullición contra la profundidad (modelo BPPD de Grant et al., 1982) es bueno en el rango de elevación de 350 a 1.800 m por lo cual en las partes superiores del reservorio se encuentra predominantemente en fase vapor. La distribución de presión inicial mostró que el fluido en el reservorio era líquido comprimido (monofásico) a profundidades por debajo de 1280 msnm. Por encima de esa elevación, el líquido se encuentra en ebullición (bifásico); la región de la fase líquido-dominante se extiende desde 1280 msnm hasta 1830 msnm. En niveles más someros, el vapor se convierte en la fase dominante y controla las presiones del reservorio. La región bifásica, dominada por el vapor se extiende hacia arriba a aproximadamente 2400 msnm.

El perfil de temperatura de estado inicial del reservorio se muestra en la (Figura 7-b) donde se observa que la temperatura del líquido profundo fue de aproximadamente 303°C, mientras que la temperatura de la zona bifásica líquido-dominante que sobreyace el fluido comprimido disminuyó a aproximadamente 264°C a 1830 msnm, donde el reservorio se volvió vapor-dominante, (Arellano, V. et al. 2005)



**Figura 7. a)** Perfil de presión vertical de estado inicial en Los Azufres (Iglesias et al., 1985). **b)** Perfil de temperatura del estado inicial en Los Azufres (Iglesias & Arellano, 1985).

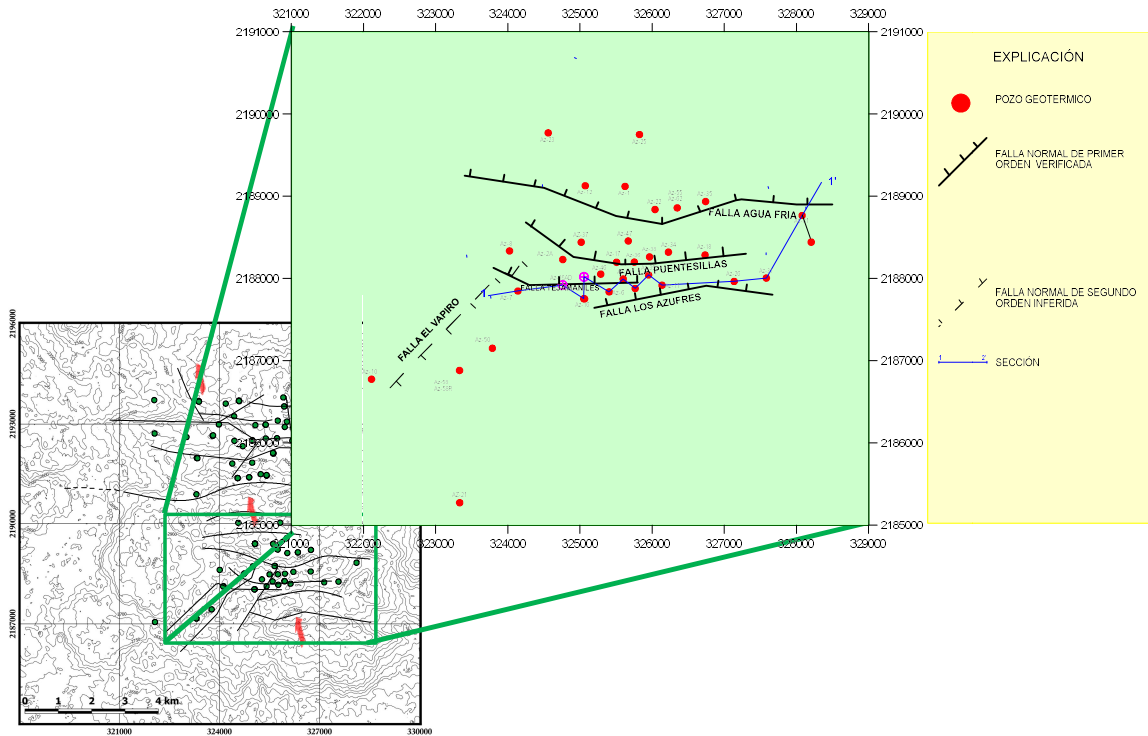
(Arellano, V. et al. 2005) menciona que las principales respuestas del reservorio a la explotación incluyen la ebullición local y generalizada, condensación y mezcla de fluidos más fríos. La ebullición local causada por la reducción de la presión del reservorio es una consecuencia natural de la explotación y afecta a la mayoría de los pozos en todo el campo. La respuesta de los pozos que se ven afectados por los fluidos inyectados incluye aumentos en las tasas de flujo másico producido y presiones en el fondo del pozo y una disminución en la entalpía. La ebullición generalizada se ha desarrollado tanto en la zona norte como en la zona sur del campo.

## 7. Metodología y datos

La metodología se desarrolla de la siguiente manera: recopilación, identificación y análisis de la información existente (geológica, geoquímica y termodinámica), teniendo en cuenta los 9 elementos esenciales de un modelo conceptual: Naturaleza y ubicación de la fuente de calor, idea del tamaño (área, profundidad, fronteras), ubicación de la zona de ascenso, capa sello, naturaleza y ubicación de la recarga de fluido, condiciones termodinámicas (T, P, fase), naturaleza de la permeabilidad, características químicas del fluido y patrón de circulación: ascenso y descarga (natural y en producción) con el fin de concluir en la elaboración de la integración al modelo conceptual actual.

Los datos utilizados en el presente trabajo corresponden a datos obtenidos en la perforación del pozo Az-81 realizada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el año 2015. Este pozo se encuentra ubicado en el lado este de la zona sur del campo

geotérmico (Figura 8). El Az-81 es un pozo direccional el cual tiene una longitud vertical de real 1509.44 m y una profundidad direccional de 1570 m como se muestra en la figura 10.



**Figura 8.** Ubicación del pozo Az-81

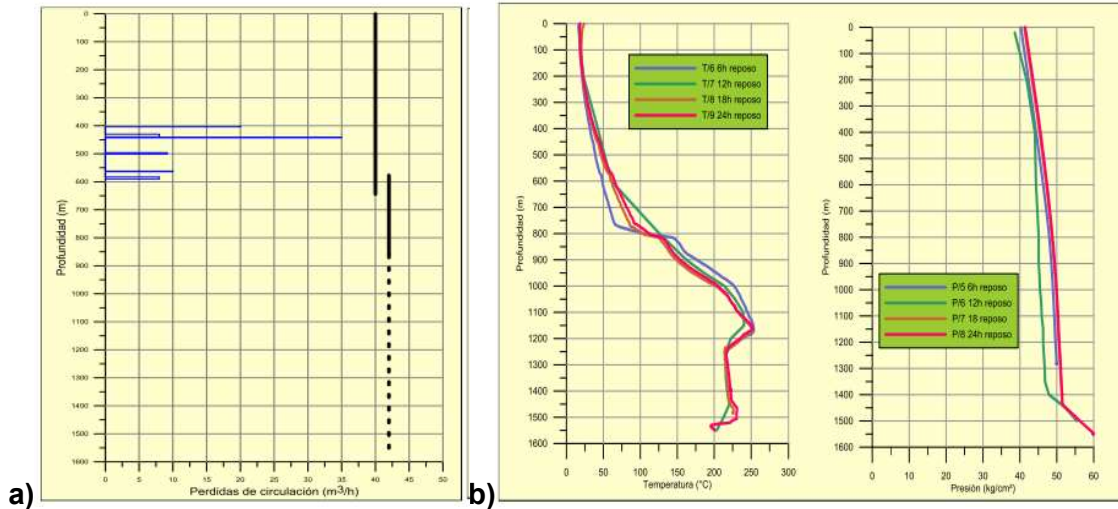
A partir de las muestras obtenidas en la perforación, se identificó la litología, los minerales secundarios y su grado de alteración. De los 0-350 m se encontraron riolitas correspondientes a la unidad Riolita Agua Fría y de los 350-1570 m se identificó una secuencia andesítica con intercalaciones de algunos basaltos correspondientes a la unidad andesítica de Mil Cumbres. El análisis estructural, encontró que el pozo intercepta dos fallas del sistema E-O debido a que hubo evidencia de la Falla Puentecillas entre los 650-740 m y de la falla Los Azufres entre los 1300-1400 m de profundidad.

Se estableció la presencia de dos zonas, considerando la mineralogía primaria y la formación de minerales secundarios o de alteración que se estabilizan a las condiciones del reservorio: la zona I, Comprende del intervalo de 0 a 1300 m de profundidad. Está compuesta por hematita + óxidos + calcita + arcillas (esmectita) + clorita + pirita + cuarzo, caolinita, prehnita y montmorillonita que nos indica zonas de baja temperatura y aporte de aguas meteóricas y constituye la cima del reservorio geotérmico. La zona II, Comprende el intervalo de 1310 m a 1570 m de profundidad está formada por calcita + arcillas + clorita + pirita + cuarzo + epidota y es el que contiene el reservorio geotérmico.

Este pozo se perforó en dos etapas: la primera utilizando la técnica convencional con lodo de perforación, en donde se encontró un intervalo permeable de 401 a 590 m sin interés geotérmico por lo que se cemento. La segunda etapa se perforó con la técnica de bajo



balance, con la cual no es posible cuantificar pérdidas de circulación. Las pérdidas de circulación encontradas durante la perforación de la primera etapa del pozo se muestran en la (Figura 9-a). En la (Figura 9-b) se observan los resultados de la última serie de registros de presión y temperatura (PT), donde se pueden ver zonas convectivas, indicativas de aporte de fluidos al pozo a mayor profundidad y en el intervalo donde no se pudieron cuantificar las pérdidas de circulación durante su perforación, (Medina, B. *et al.* 2017), a las 24 horas en condiciones estáticas se observa que el pozo aún no se recupera térmicamente del enfriamiento producto de la perforación.



**Figura 9. a) Perdidas de circulación pozo Az-81. b) Serie de registros PT pozo Az-81. Tomado de: (Medina, B. *et al.* 2017)**

## 8. Análisis de datos

### 8.1. Análisis geológico.

En cuanto al análisis geológico, se realizó una correlación del modelo conceptual integrando la información obtenida del pozo. Este análisis concluye en que las evidencias de litología y alteraciones permite extender el campo hacia la zona del pozo Az-81 confirmando que las unidades encontradas son correlacionables con la geología de la zona productora, las características del modelo se muestran en un perfil O-E (Figura 10), a partir de la sección mostrada en la figura 8.

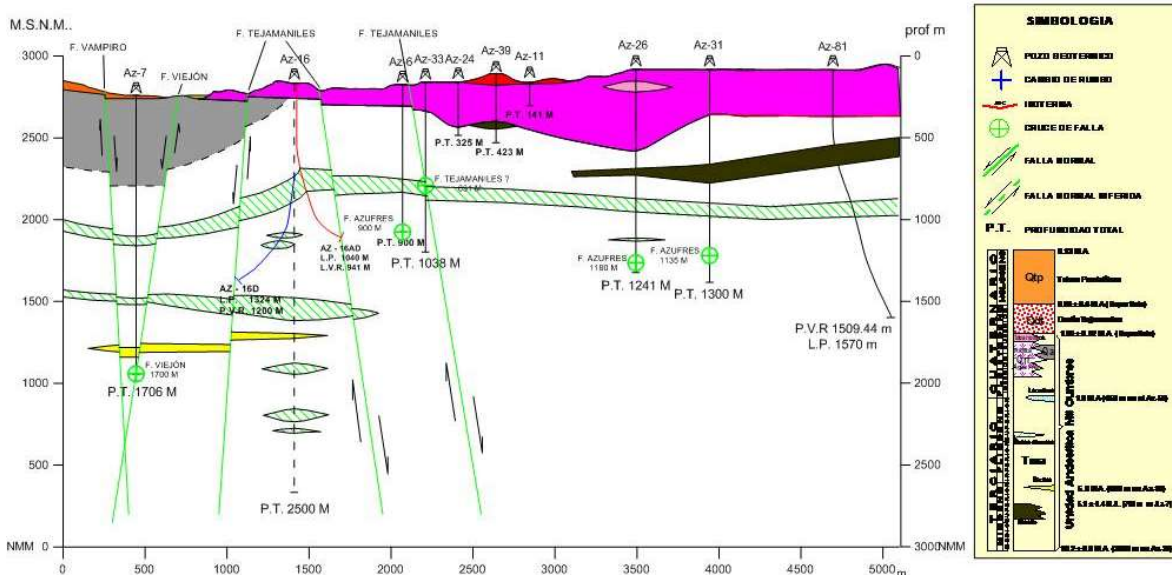


Figura 10. Modelo conceptual incluyendo el pozo Az-81, sección en dirección E-O.

El sistema geotérmico Los Azufres se encuentra dividido en tres zonas características, las cuales se correlacionan con el pozo Az-81 (Figura 11): la zona 1 es la más superficial correspondiente litológicamente a riolita, se caracteriza por la presencia de minerales autigénicos sin epidota. La zona 2 está constituida por andesitas con presencia de minerales autigénicos y presenta epidota indicando temperaturas de 250°C, esta zona corresponde al reservorio el cual se encuentra dividido en dos fases: vapor-dominante en la parte más somera y líquido-dominante en la base. Finalmente la zona 3 está constituido por anfíbol autigénico asociado a minerales en fases anhidras, por lo que se identifica como el basamento del sistema geotérmico el cual se encuentra en fase líquido-comprimido, (Pérez, E. 2001)

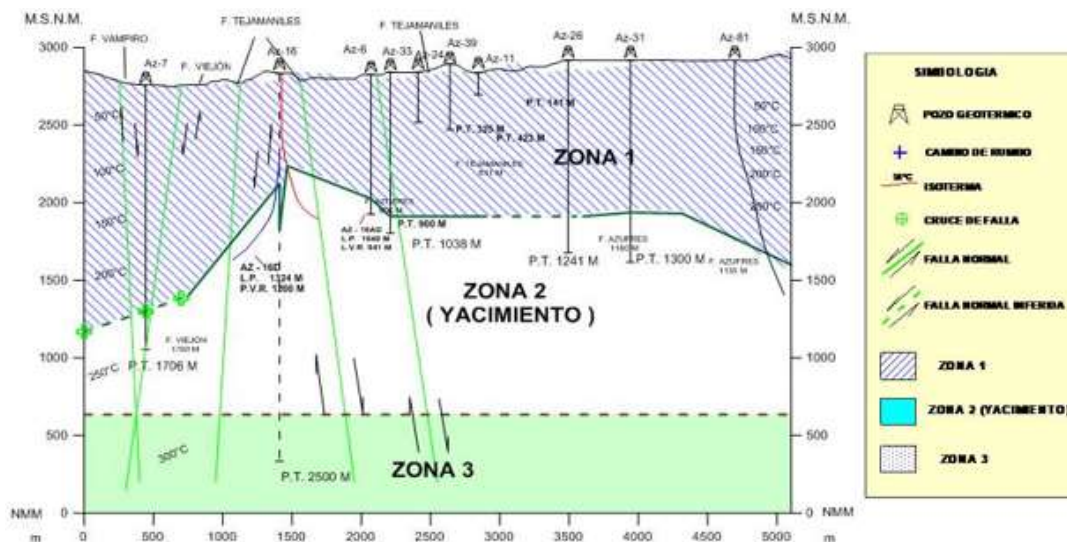
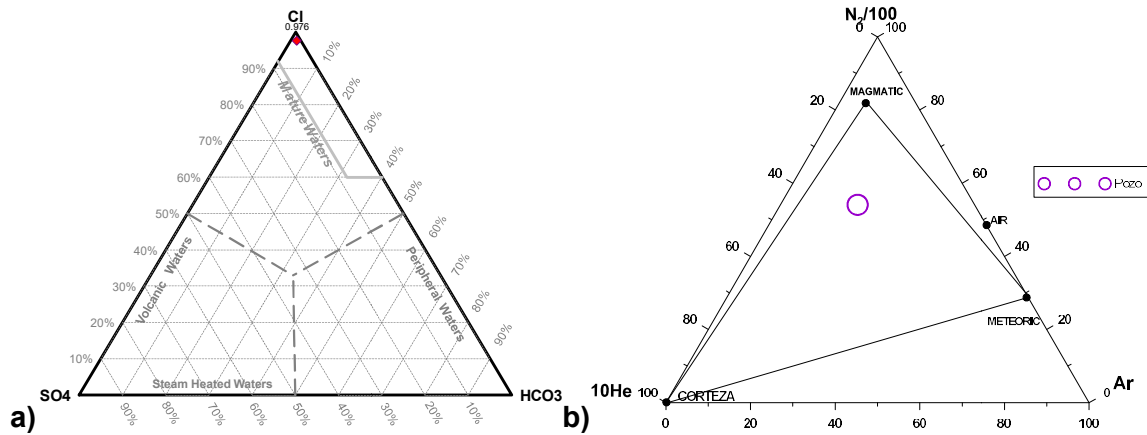


Figura 11. Zonas del Sistema Geotérmico Los Azufres, sección dirección E-O. Modificado de (Pérez, E. 2001)

## 8.2. Análisis geoquímico

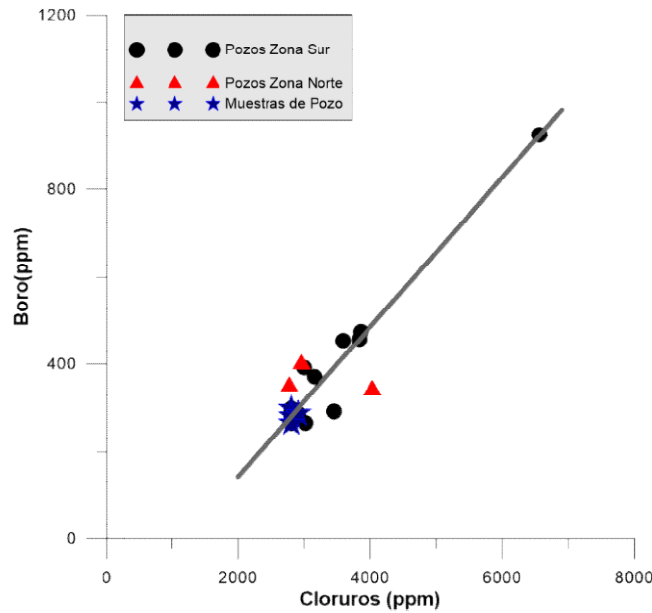
Los análisis geoquímicos del pozo Az-81 dieron como resultado que el agua del pozo es del tipo sódica-clorurada lo que indica un origen magmático profundo (Figura 12-a). El análisis de los gases mediante el diagrama N/100-10He-Ar (Figura 12-b) también muestra que el fluido es de origen magmático indicando que no hay influencia en el este sector por efectos de la reinyección.



**Figura 12. a)** Contenido relativo de  $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ . (Giggenbach, W. 1991). **b)** Diagrama para análisis de gases relación  $\text{N}/100\text{-}10\text{He-Ar}$  (Giggenbach, W. & Goguel, R. 1989)

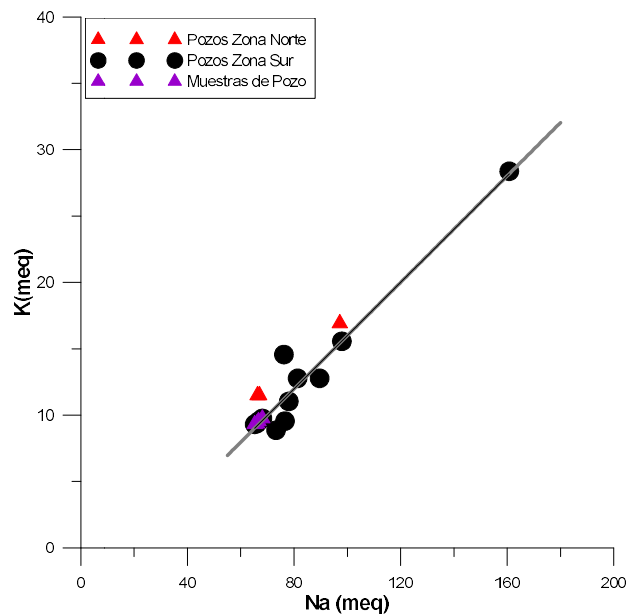
Los cloruros tiene un comportamiento móvil en la mayoría de las aguas naturales, su saturación con respecto a la halita, es alcanzado sólo en entornos naturales muy peculiares. Por lo tanto, se puede utilizar con confianza como referencia para las otras especies o constituyentes disueltos, (Marini L., 2004). Para el caso del análisis de mezclas de aguas, es posible analizar gráficamente los analitos conservadores de los diferentes puntos de muestreo superficiales en un gráfico de dispersión, el resultado de diferentes tipos de mezclas de fluido profundo o subsuperficiales permitiría visualizar una correlación lineal tal como se muestra en la (Figura 13) y el cual es útil para detectar procesos de mezcla y de ebullición. Los puntos de agua que se mueven lejos de la correlación lineal (la cual es representativa de agua pura o de vapor separado y recondensado) son debidos a la ebullición y pueden observarse a la derecha de la línea de tendencia.

En la (Figura 13) también se observa que las muestras del pozo se relacionan directamente con las muestras de los pozos de la misma zona (información de pozos zona norte y sur tomada de (Arellano *et al.*, 2005)) por lo cual se sugiere que el agua del pozo pertenece al mismo reservorio, es decir hay continuidad del reservorio hacia la zona Este del campo geotérmico. Sin embargo no es posible definir si ha habido procesos de mezcla o ebullición en la zona del pozo puesto que la muestra fue tomada solo en el desarrollo y apertura del pozo y el pozo no está en explotación que permita tomar más muestras para identificar la variación del comportamiento del pozo en el tiempo.



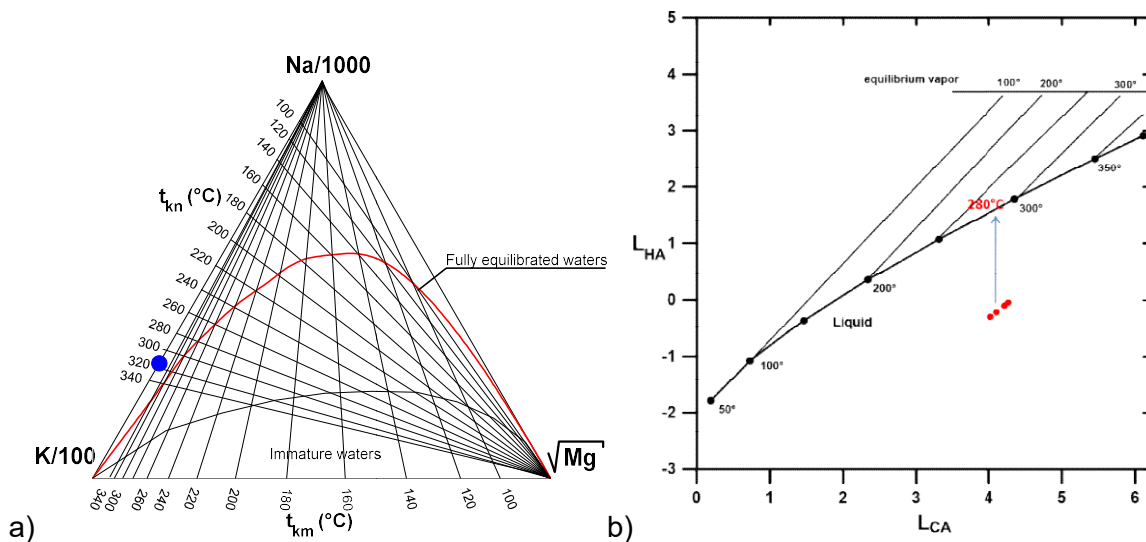
**Figura 13.** Diagrama CI-B. Modificado de (Arellano et al., 2005)

Una variación sistemática entre la proporción Na/K con relación a la temperatura, sucede en todos los sistemas geotérmicos, excepto en los predominantemente ácidos. En muchas áreas con una gran variedad de tipos rocosos, ha sido posible realizar una correlación precisa entre dicho porcentaje Na/K y la temperatura del agua, (Fournier, R. O., & Truesdell, A. H. 1973.). De igual manera que la grafica de CI-B las concentraciones de Na-K (Figura 14) muestran una correlación lineal con las muestras tomadas en otros pozos del mismo campo (información de pozos zona norte y sur tomada de (Arellano et al., 2005)).



**Figura 14.** Diagrama Na-K. Modificado de (Arellano et al., 2005)

Los Geotermómetros son una herramienta para estimar temperaturas del subsuelo que utiliza fórmulas matemáticas derivadas empíricamente a partir de bases de datos de composición química de fluidos y mediciones in-situ de temperatura de pozos geotérmicos o manantiales termales. El geotermómetro de Na-K-Mg (Giggenbach, W. 1991) indica que la muestra del pozo corresponde a un agua equilibrada y sugiere una temperatura del reservorio de 320°C (Figura 15-a). Por otra parte, el geotermómetro de  $L_{HA}$ - $L_{CA}$  (Giggenbach, W. & Goguel, R. 1989) (Figura 15-b) indica que el fluido no está estabilizado aun en la relación  $H_2/Ar$  lo cual se podría atribuir a que el pozo fue perforado con aire, sin embargo, debido a que el  $CO_2$  es mayoritario y más estable, se estima una temperatura de 280°C en el reservorio.



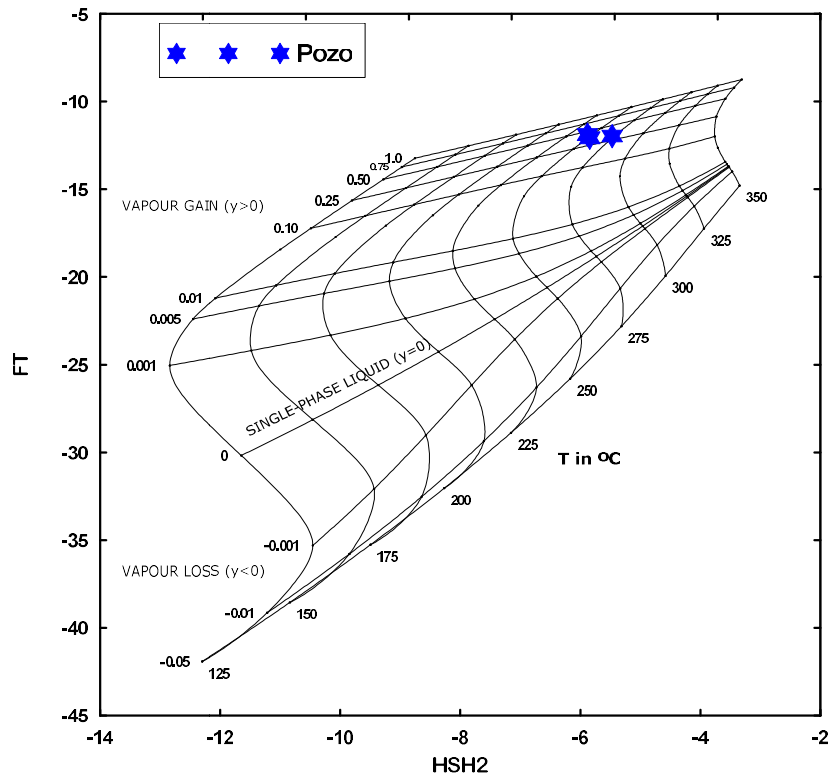
**Figura 15. a) Geotermómetro de Na-K-Mg de (Giggenbach, W. 1991). b) Geotermómetro  $L_{HA}$ - $L_{CA}$  (Giggenbach & Goguel, 1989)**

Se calculó también la temperatura del pozo utilizando los geotermómetros de Na-K. En la Tabla 1 se observa que hay consistencia de temperatura en todos los geotermómetros usando las cuatro mediciones realizadas en el desarrollo del pozo, el promedio de temperaturas obtenidas en los diferentes geotermómetros para las cuatro muestras es de 302.8°C, siendo la temperatura más baja de 291.4°C. El resultado del cálculo de estos geotermómetros es consistente debido a que tienen una desviación estándar de 0.5 y un coeficiente de variación de 0.17.

**Tabla 1.** Temperatura del pozo usando los geotermómetros de Na-K.

Trusdell	Tonani	Arnorrsson (25-250°C)	Arnorrsson (250-350°C)	Fourier	Nieva and Nieva	Giggenbach
308.91441	293.539637	307.818006	297.366433	307.496278	292.396663	315.1001273
307.459491	292.123149	306.488525	296.458917	306.477629	291.398322	314.1845666
308.385889	293.025076	307.335117	297.036956	307.126414	292.03417	314.7677364
308.808929	293.436942	307.721638	297.300694	307.422477	292.324333	315.0338077

El diagrama FT-HSH yuxtapone el geotermómetro basado en la reacción de Fischer-Tropsch ( $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) y un geotermómetro basado en  $\text{H}_2 - \text{H}_2\text{S}$ , con equilibrios en presencia de magnetita y pirita e incluye la trama interna de temperatura versus "Y", el cual se define como la fracción de vapor residente en el reservorio respecto al gas contenido en equilibrio con el agua del reservorio y algunas veces son llamados "redes de Y-T". (Powell, A. 2000). Este geotermómetro se utilizó ya que es adecuado para pozos geotérmicos pues se requiere una relación de gas/vapor determinada. En la (Figura 16) se observa el diagrama FT-HSH donde se obtuvieron temperaturas de 260-270°C en el reservorio y una fracción de vapor de 0.5.



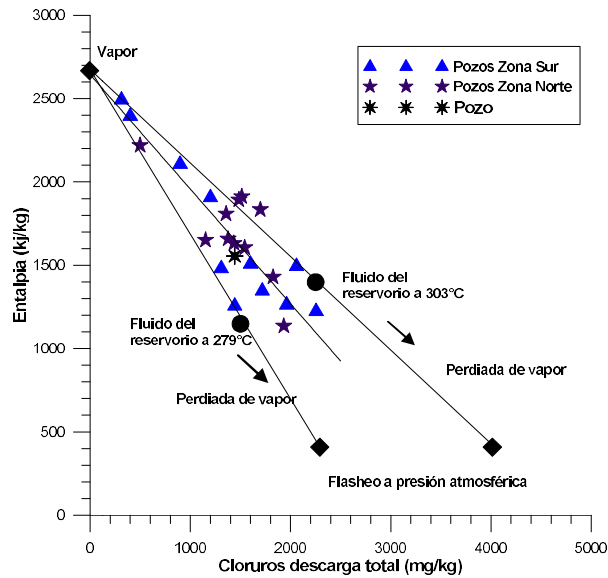
**Figura 16.** Diagrama de Fischer-Tropsch ( $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) para el Pozo Az-81.



### 8.3. Análisis termodinámico

La utilización del diagrama que relaciona la entalpía con los cloruros, permite estimar la temperatura y condiciones de equilibrio de los acuíferos profundos, que alimentan los sistemas hidrotermales. La ebullición mueve el líquido desde 265°C (líquido geotérmico) hasta contenidos de cloruros mayores y entalpías inferiores, por lo que si hay una entrada de fluido frío hay una disminución de la entalpía y una dilución de los cloruros, (Fournier, R. 1979).

La relación de entalpía-cloruros del pozo en condiciones previas a la explotación es mostrada en la (Figura 17) y relacionada con la información tomada de (Arellano, V. et al. 2005) de los pozos de la zona norte y sur del campo. En esta se observa que el pozo se encuentra entre las líneas del reservorio profundo 303°C y la línea del reservorio somero 279°C lo que indica que el pozo se encuentra en la zona bifásica.

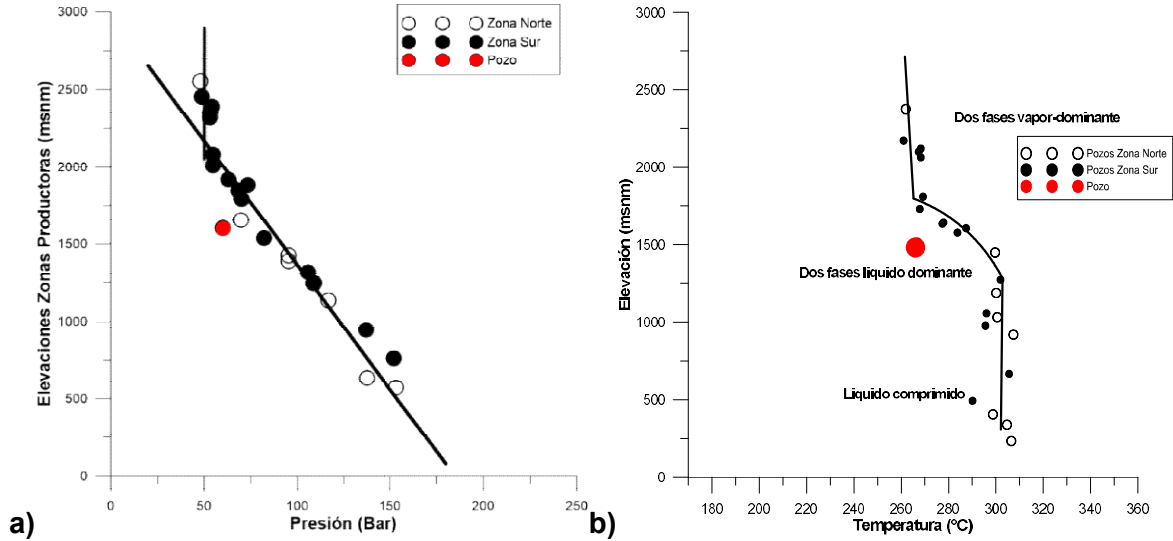


**Figura 17.** Entalpía- cloruros en condiciones previas a la explotación. Modificado de (Arellano, V. et al. 2005)

En la correlación de la presión en la zona productora del pozo Az-81 con las presiones de los pozos del mismo campo (información tomada de (Arellano, V. et al. 2005)) (Figura 18-a), se observa que la presión de la zona productora está por debajo del perfil de presión estimado para el campo en condición natural, lo cual se atribuye a la explotación comercial del campo por más de 30 años, ya que se menciona un abatimiento de presión promedio del 0.38 bar/año en la zona Sur en el Campo Geotérmico Los Azufres (Arellano, V. M., Flores, A, et al. 2015). La variación en el abatimiento anual también se atribuye a cambios en la operación de explotación.

El perfil de temperatura de estado natural del reservorio no perturbado observado en la (Figura 18-b) muestra que la temperatura del líquido profundo era de aproximadamente 303°C, mientras la temperatura de la zona de dos fases dominada por líquido que sobreyace el fluido comprimido disminuyó hacia arriba a alrededor de 264°C a 1830

msnm, donde el reservorio se volvió dominado por el vapor. En la región de vapor, se observa poca variación en la temperatura a 2500 msnm, temperaturas eran solo 2°C más bajas (262°C) que, en la base de la zona, (Iglesias, E. & Arellano, V.1985).



**Figura 18. a)** Relación elevaciones zonas productoras – Presión no perturbada. La línea continua oblicua corresponde al perfil de presión de ebullición contra la profundidad (modelo BPPD de Grant et al., 1982); la línea sub-vertical corresponde a la zona dominada por vapor en la parte superior del depósito. **b)** Perfil de temperatura de estado natural del reservorio no perturbado. Modificado de (Iglesias, E. & Arellano, V.1985).

## 9. Discusión de resultados

De acuerdo a la (Figura 10) se observa que fue posible correlacionar la continuidad de la litología del modelo conceptual del lado oeste de la zona sur del campo con la litología del pozo Az-81 ubicado hacia el este del campo, en la sección mostrada. Lo anterior, debido a que la capa de unidad Riolítica de Agua Fría fue encontrada entre los 0-350 m, seguida de una secuencia con buena permeabilidad asociada a la evidencia de la falla Los Azufres entre los 1300-1400 m de profundidad de composición andesítica con intercalaciones de basalto.

Por otra parte, también se correlacionan las zonas de alteración características de este campo (Figura 11): zona I, en profundidades entre 0 a 1300 md compuesta por minerales característicos de baja temperatura como lasarcillas (esmectita), calcita, caolinita, prehnita, montmorillonita, hematita, óxidos, clorita, pirita y cuarzo con aporte de aguas meteóricas. La zona II, en profundidades de 1310 md a 1570 md en donde se define el tope del reservorio por la aparición de minerales de alta temperatura como la epidotainicia el reservorio geotérmico. Con la correlación de los estratos y alteraciones, se evidencia que el sistema geotérmico tiene continuidad en dirección hacia el Este.



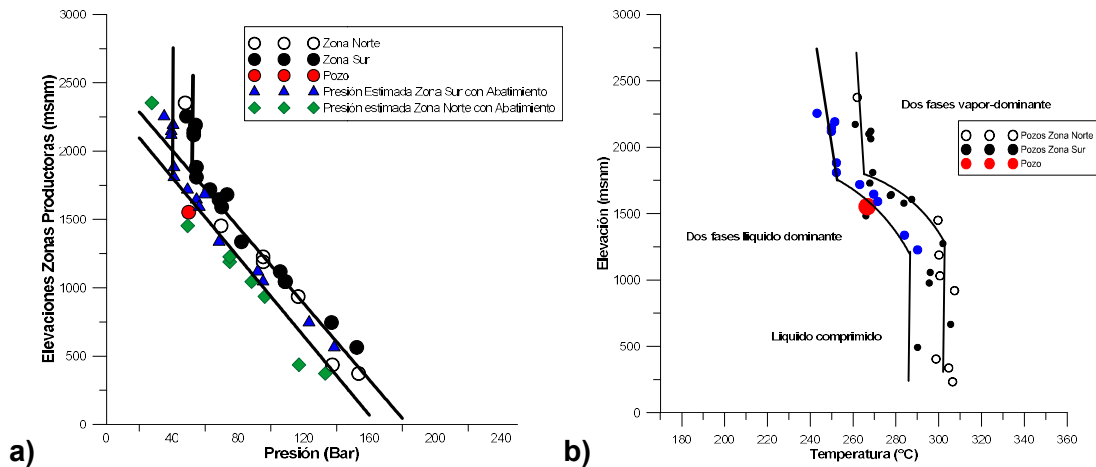
El contenido relativo de  $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ . (Giggenbach, W. 1991) para las muestras de agua del pozo (Figura 12-a) dieron como resultado agua del tipo sódica-clorurada, es decir de origen magmático profundo. De la misma manera, el diagrama para análisis de gases relación  $\text{N}/100\text{-}10\text{He-Ar}$  (Giggenbach, W. & Goguel. R. 1989) (Figura 12-b) indica que el fluido del pozo tiene origen magmático profundo y se comprueba que no ha sido afectado por la reinyección ni por agua meteórica ya que no presenta concentraciones considerables de Argón.

El trabajo realizado por (Iglesias, E. *et al.* 2011) con la reinyección de trazadores, indica que los fluidos de reinyección tienen una influencia comprobada en por lo menos 1735.3 m (pozo Az-36) y una disminución exponencial horizontal, coherente con el hecho de que el pozo Az-81 no presenta rastros de reinyección.

Por otra parte, los diagramas  $\text{Cl-B}$  (Figura 13) y  $\text{Na-K}$  (Figura 14) relacionan las muestras del pozo Az-81 en condiciones no perturbadas con muestras de diferentes pozos tomadas de (Arellano *et al.*, 2005) ubicados tanto en la zona norte como en la zona sur del campo geotérmico, dando como resultado una buena correlación lineal en ambas graficas. Por lo anterior, se infiere que el agua del pozo presenta las mismas características y concentraciones del agua del reservorio y se propone que hay continuidad del reservorio hacia la zona Este en este sector del campo geotérmico.

Se usaron diferentes geotermómetros para estimar la temperatura del reservorio: el geotermómetro de  $\text{Na-K-Mg}$  (Giggenbach, W. 1991) (Figura 15-a), indica que la muestra del pozo corresponde a un agua equilibrada y sugiere una temperatura del reservorio de  $320^\circ\text{C}$ . En el geotermómetro de  $\text{L}_{\text{HA}}\text{-L}_{\text{CA}}$  (Giggenbach, W. & Goguel. R. 1989) (Figura 15-b) solo se considera la temperatura arrojada por el  $\text{CO}_2$  debido a que es mayoritario y más estable que el  $\text{H}_2$ , obteniendo una temperatura de  $280^\circ\text{C}$ . Los geotermómetros de  $\text{Na-K}$  (Tabla 1) arrojaron un promedio de temperaturas de  $302^\circ\text{C}$  siendo la temperatura más baja de  $291.4^\circ\text{C}$ . El FT-HSH (Figura 16) indica temperaturas de  $260\text{-}270^\circ\text{C}$  en el reservorio y una fracción de vapor de 0.5. Las temperaturas arrojadas por los diferentes geotermómetros son consistentes dando como resultado temperaturas alrededor de  $290^\circ\text{C}$ . Lo anterior sugiere que el pozo se encuentra aún en área de interés geotérmico por lo cual por lo que se descarta que sea un pozo marginal.

Tomando como base las presiones en estado no perturbado, se calcula la presión actual estimada con un abatimiento de 0.38 bar/año Zona Sur y 0.58 bar/año Zona Norte (Arellano, V. M., Flores, A, *et al.* 2015) (Figura 19-a), dichas presiones coinciden en tendencia lineal con la presión medida del pozo. Con las presiones calculadas se determina la temperatura de saturación (Figura 19-b), las tendencias de los datos coinciden con la temperatura medida del pozo, por lo que se asume que existe un decremento de temperatura actual que se atribuye tanto a la explotación como a la inyección de salmuera ( $40\text{-}50^\circ\text{C}$ ) en los sectores NO y SO.



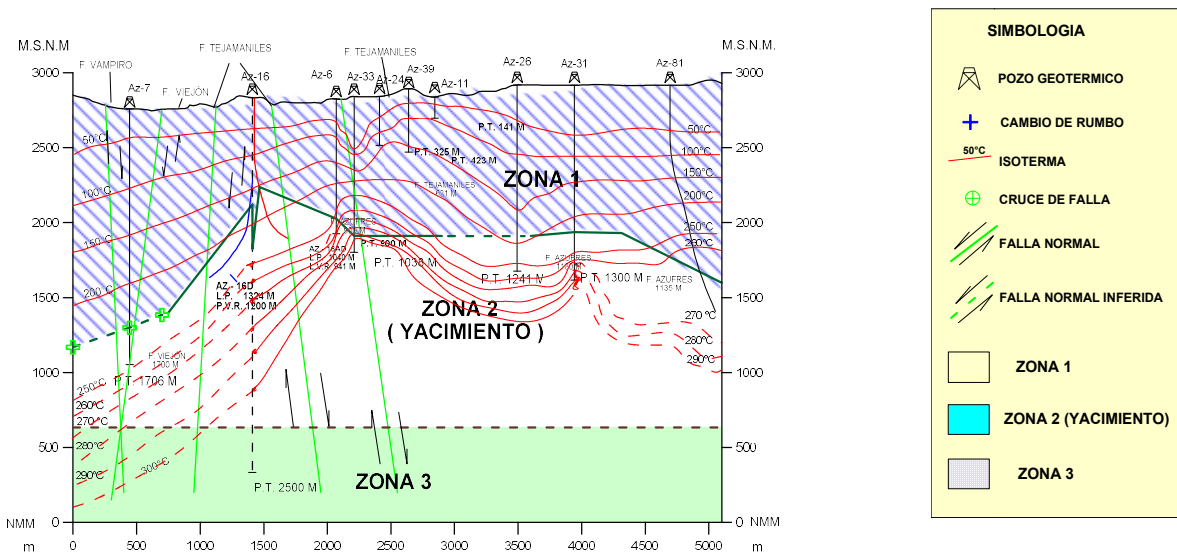
**Figura 19.** Estimación de presiones y temperaturas de acuerdo a el abatimiento de la presión. **a)** Presiones con abatimiento de 0.38 bar/año Zona Sur y 0.58 bar/año Zona Norte comparadas con estado no perturbado. **b)** Temperaturas de saturación correspondientes a las presiones con abatimiento comparadas con temperaturas en estado no perturbado.

De acuerdo a la metodología ya utilizada para la determinación del espesor del reservorio en la zona Este, también se relaciona la aparición de la epidota. En el perfil de isothermas (Figura 20) se observa que: las temperaturas medidas en el pozo Az-81 son menores a las temperaturas medidas en los pozos aledaños en condiciones no perturbadas, sin embargo, como ya se mencionó anteriormente el campo ha sido explotado por más de 30 años y ha tenido un decaimiento natural de presión y por tanto de temperatura dado que a la profundidad del pozo AZ-81 existen condiciones de saturación.

De acuerdo a (Arellano, V. *et al.* 2005), hay dos procesos presentes en el campo los cuales se sugiere son causa de la disminución de la temperatura, sin embargo, son parte del proceso de explotación. Los procesos que se mencionan son la ebullición y los retornos de inyección en la producción, procesos que se han determinado de acuerdo a los patrones químicos e isotópicos, así como a las mediciones de presión y temperatura.

Para la integración de las temperaturas a la sección observada en la (Figura 20), se utilizaron las temperaturas obtenidas por la CFE en condiciones estáticas a 59 días del término de la perforación del pozo con un  $\Delta T = 41^\circ\text{C}$  con respecto a la visualizada en zona conectiva (950 m -1560 m) en la (Figura 9-b).

El pozo Az-81 toca la isoterma de  $260^\circ\text{C}$  desde 950 m de profundidad direccional hasta el fondo del pozo. Cabe mencionar que las temperaturas del Oeste del campo fueron medidas en los inicios de la explotación del campo geotérmico (años 80's y 90's), por lo cual la disminución de la temperatura no se atribuye a que el pozo se acerque a una zona marginal sino a el abatimiento producto de la explotación mencionada anteriormente.



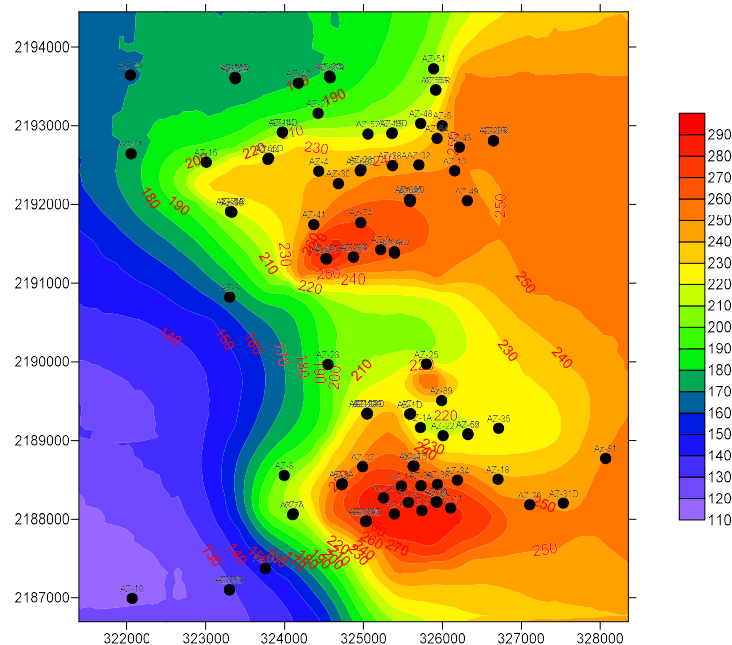
**Figura 20.** Perfil de isotermas de la zona sur del campo en dirección E-O Modificado de (Pérez, E. 2001) obtenido de la sección observada en la Figura 8.

Se realiza un diagrama en planta de las temperaturas a 1800 msnm. Como se puede observar en la (Figura 21) las zonas que se sugieren como zonas de ascenso son las de mayor temperatura, hacia la zona Este del campo hay temperaturas predominantes de 250°C a esta profundidad. Además, se observa lo que podrían ser los límites del reservorio en la parte Oeste y Norte del campo geotérmico debido a la disminución de temperaturas evidente a esta profundidad. Caso contrario ocurre en el sector Este ya que no se observan límites del reservorio de acuerdo a las temperaturas.

En la parte Este del campo se adiciona la información de temperatura actual, sin embargo, en comparación con la de los pozos aledaños se ve menor.

En la parte central se observa una disminución de la temperatura, la cual puede ser explicada tomando como referencia un posible intrusivo (Molina, M. 2013) en esta zona y teniendo en cuenta que los intrusivos son roca impermeable y no se observa evidencia de fallamiento, por esta razón se sugiere no hay presencia de fluidos calientes.

Cabe mencionar que la elevación escogida para hacer el mapa de temperaturas no es la idónea. No obstante, la información fue limitada puesto que solo se contó con las temperaturas medidas a esta elevación, para la realización de este trabajo.



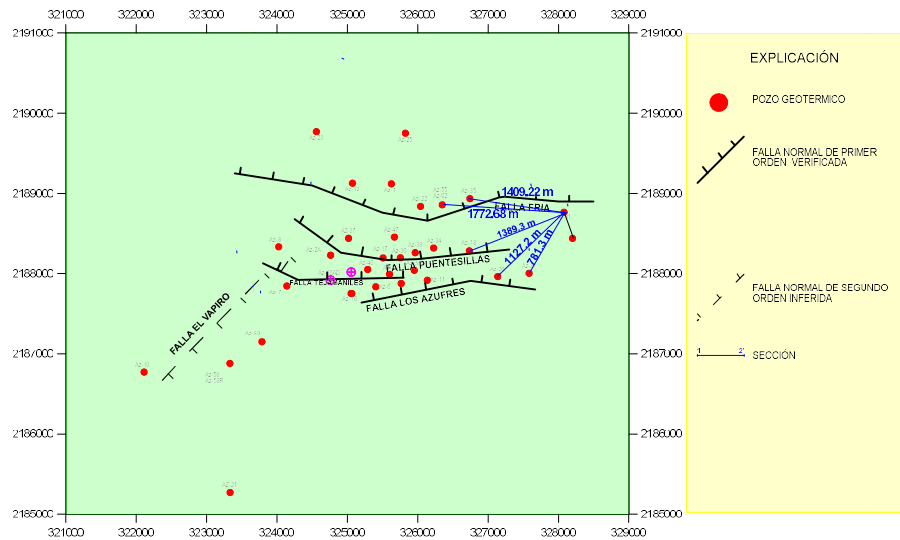
**Figura 21.** Mapa de temperaturas a 1800 msnm. Modificada de (Molina, M. 2013)

Se realiza una relación del pozo Az-81 con los pozos aledaños con el fin de correlacionar la afección vertical y horizontal que se tiene en el sector Oeste del campo geotérmico con la afección que tendría la inyección en el sector este.

De acuerdo a los estudios realizados de reinyección de trazadores el sector SO(Iglesias, E. *et al.* 2011) donde concluyen una conexión profunda de la zona de reinyección con la zona de producción a través de los canales (Fallas y fracturas) en una relación vertical del  $R = -0.960537$  y una correlación horizontal de  $R = -0.827083$ . Al comprobar la conexión se sabe que se está recargando el reservorio por la recuperación de fluidos de inyección en la zona productora, sin embargo, también se atribuye un enfriamiento en el reservorio por este proceso aunado a la explotación comercial durante más de 30 años. De acuerdo a los patrones químicos se observa la influencia de la reinyección (ejemplo Az-33) con el aumento de los cloruros y la entalpia Na / K menor que la de la sílice lo cual es característica de agua de inyección, (Arellano, V. M. *et al.* 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace una suposición de la posible respuesta de la producción ante una inyección de aguas residuales en el pozo AZ-81. Como se puede observar en la (Figura 22 y Tabla 2), la relación de distancias horizontales de afección entre la reinyección del pozo Az-8 son similares a los pozos más cercanos al pozo Az-81 que varían entre 781.31 m a 1772.69 m. La relación de distancias verticales de la zona Oeste comparadas con la Este, son mucho menores lo que indica que el fluido que se reinyectaría en el pozo Az-81, podría tener más influencia de movimiento horizontal y posiblemente no tener el tiempo de residencia necesario ni las temperaturas de formación suficientes para alcanzar las condiciones termodinámicas de la zona de producción en caso de comprobarse conexión, lo cual implicaría un enfriamiento del reservorio.

Teniendo en cuenta que el fluido en profundidad se mueve en dirección hacia el NNO en donde se ha encontrado la zona de descarga y a que las fallas del sistema E-O buzan en dirección hacia el norte, es posible decir que en el caso de usar el pozo Az-81 como reinyector los pozos que mayor influencia tendrían serían los que se encuentran ubicados hacia el NNO del pozo Az-81 es decir los pozos Az-35 y Az-62. Sin embargo, los pozos Az-18, Az-31 y Az-26 también podrían ser afectados, pero en menor proporción.



**Figura 22.** Correlación de distancias horizontales de pozo Az-81 con pozos aledaños.

**Tabla 2.** Correlación de distancias verticales y horizontales. a) Tomado de (Iglesias, E. et al. 2011). b) Correlación del pozo Az-81 con pozos aledaños.

POZO	Distancia a AZ-8 horizontal	Distancia a AZ-8 vertical
Az-16D	537.23	-177.8
Az-2A	745.43	990
Az-16AD	891.97	1367.2
Az-37	998.64	1367.9
Az-46	1295.08	13330.8
Az-06	1467.11	1416.8
Az-17	1489.41	1686.1
Az-33	1611.7	1295.4
Az-36	1735.34	1290.6

POZO	Distancia a AZ-81 horizontal	Distancia a AZ-81 vertical
AZ-18	1389.35	-224.04
AZ-31D	781.31	-213.74
AZ-26	1127.73	-274.04
AZ-35	1409.22	-235.44
AZ-62	1772.69	86.06

En el campo Geotérmico Los Azufres han sido identificados diferentes procesos derivados de la explotación del recurso. Por una parte, (Arellano, V. *et al.* 2005) indica procesos de ebullición, mientras que (Ruiz, L. 2017) menciona declinación de la producción y abatimiento de la presión. Sin embargo, se ha encontrado que la recarga artificial por medio de la reinyección ha sido exitosa en el sector Oeste ya que contribuye a reducir la declinación de la producción, y desde esta perspectiva la reinyección sería favorable para el reservorio en el sector Este.

Se calculó un índice de inyectividad para este pozo de  $92.06 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{kg}/\text{cm}^2$  el cual corrobora la gran capacidad de aceptación y permeabilidad de la formación en ese pozo. (Hernández, P. *et al.* 2017).

Al incluir al pozo Az-81 al sistema de reinyección se repartiría el caudal entre los sectores Oeste y Este, teniendo disponibles 117 t/h para el pozo Az-81 (Hernández, P. *et al.* 2017). Esto generaría beneficios, ya que la influencia de la reinyección en el Oeste se reduciría a la mitad y en el sector Este sería tan determinante debido a que, con menor cantidad de agua el calentamiento podría darse más fácilmente,

Si bien es benéfica la reinyección para generar recarga artificial al reservorio, teniendo en cuenta el movimiento de los fluidos, las distancias horizontales y la escasa diferencia de profundidades de las zonas permeables del pozo Az-81 con los pozos aledaños, se sugiere que la reinyección en el pozo Az-81 no es favorable puesto que puede generar enfriamiento en la zona productora.

## 10. Conclusiones y recomendaciones

- Se correlaciona la geología del pozo Az-81 con la geología del sistema geotérmico, dando como resultado continuidad en la litología, alteraciones y evidencias de fallamiento indicando que el pozo aún se encuentra geológicamente en el sistema productor del campo geotérmico Los Azufres.
- Los resultados de la geoquímica revelan que el fluido del pozo Az-81 tiene origen magmático y proviene de zonas profundas a alta temperatura teniendo en cuenta que las muestras de agua del pozo corresponden al tipo sódica-clorurada y a que el análisis de gases indica que el pozo no ha sido influenciado por fluidos de origen meteórico. Por otra parte, la correlación de muestras de agua del pozo con otros pozos del campo dio como resultado que el pozo presenta las mismas características del agua del reservorio. Los geotermómetros son consistentes y arrojan temperaturas alrededor de 290°C, sugiriendo que el pozo se encuentra aún en el área de interés geotérmico por lo que se descarta que sea un pozo marginal.
- El campo presenta un decremento en la presión el cual fue notorio al correlacionar las presiones y temperaturas actuales con las medidas en los inicios de la explotación.
- Se sugiere que el pozo no debe ser usado como reinector debido a que esto podría afectar la temperatura de la zona productora del campo por su poca profundidad y el patrón de flujo descrito en el análisis del modelo conceptual.
- La ubicación del pozo puede ser la adecuada para realizar la recarga del reservorio en el sector Este. Sin embargo, esta debería ser a una mayor profundidad tratando de expandir los tiempos de residencia del fluido, para posteriormente extraerlo en condiciones termodinámicas de producción.
- La actualización del modelo numérico en esta sección es un factor importante para poder realizar la simulación de comportamiento del reservorio ante la reinyección.
- Se recomienda realizar pruebas de trazadores con el fin de corroborar los tiempos de residencia, las conexiones a través de los canales y las relaciones tanto verticales como horizontales de los pozos aledaños al pozo Az-81.

## **11. Agradecimientos**

A nuestros asesores los Ingenieros Antonio Matus y Manuel Rivera por compartir sus conocimientos con nosotras, por su disponibilidad y apoyo en la elaboración de este informe.

A LaGeo, La UES y la UNU-GTP por hacer posible la elaboración de este diplomado el cual ha sido muy enriquecedor para nuestro desarrollo tanto personal como profesional.

A la Comisión Federal de Electricidad (CFE), por proporcionarnos la información que permitió el desarrollo de este trabajo, esperando sea un aporte para el Campo Geotérmico Los Azufres.



## 12. Referencias

- Arellano, V. M., Barragán, R. M., Ramirez, M., Lopez, S., Aragon, A., Paredes, A., Casimiro, E., & Reyes, L. (2015). Reservoir Processes Related to Exploitation in Los Azufres (México) Geothermal Field Indicated by Geochemical and Production Monitoring Data. *International Journal of Geosciences*, 2015, 6, 1048-1059.
- Arellano, V. M., Flores, A., Aragon, A., Mendoza, A., Barragar, R. M., Paredes, A., Lopez, S. & Ramirez, M. (2015). Caracterización dinámica del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., México usando datos de los pozos de producción-reinyección. *Geotermia - Revista Mexicana de Geoenergía*, 28(2), 16-34.
- Arellano, V. M., Torres, M. A., & Barragán, R. M. (2005). Thermodynamic evolution of the Los Azufres, Mexico, geothermal reservoir from 1982 to 2002. *Geothermics*, 34(5), 592-616.
- Barragán, R. M., Arellano, V. M., Portugal, E., & Sandoval, F. (2005). Isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. *Geothermics*, 34(4), 527-547.
- Barragán, R. M., Arellano, V. M., Mendoza, A., & Reyes, L. (2011). Chemical and isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) behavior of Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to injection as indicated by 2010 data. *Geothermal Resources Council Transactions*, 35, 603-608.
- Dobson, P. & Mahood, G., (1985). Volcanic stratigraphy of the Los Azufres geothermal area, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25(3-4), 273-287.
- Fournier, R. O. (1979). Geochemical and hydrologic considerations and the use of enthalpy-chloride diagrams in the prediction of underground conditions in hot-spring systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5(1-2), 1-16.
- Fournier, R. O., & Truesdell, A. H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5), 1255-1275.
- Giggenbach, W. (1991). Chemical techniques in geothermal exploration. Application of geochemistry in geothermal reservoir development, 11, 9-144.
- Giggenbach, W. F., & Goguel, R. L. (1989). Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. Department of Scientific and Industrial Research. *Chemistry Division Report, No. CD, 2401*.
- Grant, M.A., Donaldson, I., Bixley, P., (1982). *Geothermal Reservoir Engineering*. Academic Press, New York.
- Hernández, P., Medina, B., Ávila, A., & Sandoval, M. (2017). Definición operativa de un pozo productor y su uso estratégico para recarga en la Zona Sur del campo de Los Azufres, Mich. *XXIV Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana*. Morelia, Michoacán.
- Iglesias, E. & Arellano, V., (1985). Apoyo en ingeniería de reservorio s para el campo geotérmico de Los Azufres. Fase I. Integración de un modelo básico actualizado del reservorio . Report IIE/11/1864/I 04/F, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, 274 pp.

- Iglesias, E., Arellano, V.M., Garfias, A., Miranda, C. & Aragón, A., (1985). A one-dimensional vertical model of the Los Azúfres, Mexico, geothermal reservoir in its natural state. *Geothermal Resour. Council Trans.* 9 (part II), 331–336.
- Iglesias, R., Flores, A., Torres, R., Montes, M., Reyes, P. & Reyes D., (2011). Estudio con trazadores de líquido y vapor en el área Tejamaniles, Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, Vol. 24, No.1.
- Marini, L. (2004). Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy, UNESCO, IGG. <http://www.geothermalcommunities.eu/assets/elearning/2.3.chile.pdf>. Genova, Italia
- Medina, B., Casimiro, E. y Pérez, E. (2017). Proyecto para recarga dentro de la zona productora sur del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Memorias del XXIV Congreso Anual – Morelia, Mich., 29-31 de marzo de 2017
- Molina, M., (2013) Case history of Los Azufres conceptual modelling in a mexican geothermal field. *Revista Mexicana De Geoenergía*· ISSN 0186 5897 24(2), 3-16.
- Nieva, D., Verma, M., Santoyo, E., Barragán, R. M., Portugal, E., Ortiz, J., & Quijano, J. L. (1987). Chemical and isotopic evidence of steam upflow and partial condensation in Los Azufres reservoir (No. SGP-TR-109-36). Instituto de Investigaciones Electricas, Cuernavaca, Mor., Mexico; Comision Federal de Electricidad, Morelia, Mich., Mexico.
- Pérez. E. (2001). Current Conceptual Model of the Los Azufres, Mexico, Geothermal Field. *Transactions-Geothermal Resources Council*, 675-680.
- Pérez. E., Macías. V., Garduño. M., Arce. S., García. T., Castro. G. & Valdés, G. (2010). Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres. Mich.: *Geotermia*, 23, 51-63.
- Powell, T. (2000). A review of exploration gas geothermometry. In *Proceedings, 25th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- Ruiz, L. (2017). Manejo de fluido geotérmico y acciones para disminuir la declinación. *II Taller regional de geotermia. CECACIER*