

## **Depósitos y alteraciones hidrotermales en manantiales termales en la región de Atotonilco El Alto-Santa Rita, Jalisco**

**Josué Guadalupe Rojas<sup>1</sup>, Augusto Antonio Rodríguez Díaz<sup>2</sup>, Ruth Esther Villanueva Estrada<sup>2</sup>, Isabel Pérez Martínez<sup>3</sup>, Roberto Rocha Miller<sup>2</sup> y Rosalinda Guzmán García<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ingeniería en Geociencias, Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza, V. Carranza, Puebla. <sup>2</sup>Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

<sup>3</sup>Posgrado en Tecnología y Gestión del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, SLP. Correo: [josuegurj@gmail.com](mailto:josuegurj@gmail.com)

### **RESUMEN**

La mayor concentración de manifestaciones termales del país está en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) (Prol-Ledesma y Juárez, 1986; González-Ruiz et al., 2015) debido a sus características tectónicas y geológicas, a su vulcanismo reciente y a su ambiente extensivo. Además, en la FVT se encuentra la mayor cantidad de zonas cuyos permisos de exploración geotérmica le concedió la SENER a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para su desarrollo. Este estudio pretende identificar, caracterizar y delimitar depósitos y arreglos minerales relacionados con la actividad hidrotermal en la región de Atotonilco El Alto-Santa Rita, Jalisco, ubicada en la porción occidental de la FVT, y definir su potencial geotérmico para efectos de exploración. Las manifestaciones superficiales de la región incluyen manantiales y pozos termales con temperaturas de descarga menores de 75°C. Hay vetillas, costras y otros depósitos hidrotermales asociados a los manantiales termales.

La metodología empleada consistió en el muestreo de depósitos de alteración hidrotermal en y alrededor de Atotonilco El Alto-Santa Rita, así como su análisis mineralógico descriptivo y determinativo con petrografía y espectroscopía de reflectancia de infrarrojo cercano. Las muestras fueron sedimentos del fondo y del derredor de los manantiales termales, así como depósitos y rocas alteradas de los alrededores de la región. Los resultados geológicos preliminares indican que los manantiales termales se relacionan con un patrón de fallas de orientación NE-SW y NW-SE, producto de la zona extensional oriental del Graben de Chapala. Las asociaciones minerales consisten de zeolitas, calcita, montmorillonita y ópalo, denotando alteración argílica, silicificación y carbonatación. La presencia de estilbita, heulandita y ópalo sugiere actividad hidrotermal de baja temperatura y condiciones semi-neutrales a alcalinas de los fluidos geotérmicos, debido principalmente a la abundancia de carbonatos. Esta información contribuirá a una mejor comprensión del sistema hidrotermal y su evolución en esta región.

*Palabras clave:* Exploración, mineralogía superficial, alteración argílica, espectroscopía de reflectancia de infrarrojo cercano, análisis microscópico.

## **Hydrothermal deposits and alteration in hot springs at the Atotonilco El Alto-Santa Rita, Jalisco, region**

### **ABSTRACT**

The largest concentration of thermal manifestations in the country is distributed in the Trans Mexican Volcanic Belt (TMVB) (Prol-Ledesma and Juárez, 1986; González-Ruiz et al., 2015), due to its tectonic environment, geological characteristics, recent volcanism and extensional setting. Additionally, in the TMVB is the largest number of geothermal exploration permits awarded by SENER to the

Comisión Federal de Electricidad (CFE) for its development. The present study aims to identify, characterize and delimit deposits and mineral associations related to hydrothermal activity at the Atotonilco El Alto-Santa Rita region, Jalisco, located west of the TMVB, and define its geothermal potential for further exploration. Superficial manifestations in the region include hot springs and wells with discharge temperatures of  $<75^{\circ}\text{C}$ . Associated with the hot springs are veinlets, crusts deposits and hydrothermal alterations.

The methodology used consisted of sampling deposits and hydrothermal alteration areas into and around Atotonilco El Alto-Santa Rita, as well as its descriptive and determinative mineralogical analysis with petrography and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy. The samples were sediments from the bottom and around the hot springs, crusts and rocks altered in the surroundings of the region. Preliminary geological results indicate that the hot springs are related to a pattern of faults of NE-SW and NW-SE orientation, which are product of the eastern extensional zone of the Chapala Graben. The mineral associations consist of zeolites, calcite, montmorillonite and opal, denoting argillic alteration, silicification and carbonation. The presence of stilbite, heulandite and opal suggests low temperature hydrothermal activity and semi-neutral to alkaline conditions of thermal fluids, mainly due to the abundance of carbonates. This information will contribute to a better understanding of the hydrothermal system and its evolution in this region.

**Keywords:** Exploration, superficial mineralogy, argillic alteration, SWIR, microscopic analyses.

## Introducción

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación *P02: Mapa de provincias geotérmicas y distribución de acuíferos: Herramienta para la exploración y desarrollo de los recursos geotérmicos convencionales*, perteneciente al Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo). El presente estudio tiene como objetivo reconstruir las condiciones preexistentes durante la deposición mineral y la identificación de depósitos y alteraciones hidrotermales, para proporcionar información a futuros estudios exploratorios de la zona geotérmica de Atotonilco El Alto-Santa Rita, Jalisco (Figura 1; todas las figuras al final del texto).

La actividad termal de en esta región de Atotonilco-Santa Rita se conoce desde la época prehispánica a través de crónicas y leyendas de los purépechas, quienes utilizaban las aguas termales para sanación y rehabilitación (Orozco Vázquez, 1986).

La zona de Atotonilco El Alto-Santa Rita se ubica al noreste del Lago de Chapala, al sur de Los Altos de Jalisco y al este del Estado de Jalisco. La geología de Atotonilco El Alto-Santa Rita muestra un dominio litológico de una sucesión volcánica y piroclástica del Mioceno, con rocas andesíticas y riolíticas, y en menor medida del Plioceno, con edades de 3.3 Ma para el vulcanismo más reciente (Rosas-Elguera et al., 1989; Delgado-Granados, 1992).

La zona geotérmica se encuentra en la fosa tectónica de Chapala, que presenta fallas de tipo normal y de orientación E-W con ángulos de inclinación pronunciados. Hacia la parte septentrional de la fosa tectónica se encuentran las regiones de Ocotlán, Tototlán y Atotonilco, donde las fallas son más espaciadas, paralelas y a veces bifurcadas, con planos que se inclinan hacia el sur, formando bloques tabulares escalonados y apretados (Reyes et al., 1990).

## Metodología

La metodología utilizada consistió en la identificación de manantiales termales y el muestreo de depósitos y zonas de alteración hidrotermal en la región de Atotonilco El Alto-Santa Rita, de acuerdo a la secuencia sugerida por Rodríguez-Díaz (2015; ver Cuadro 1, al final de las figuras). Posteriormente se realizaron análisis descriptivos y determinativos de tipo mineralógico y petrográfico, para caracterizar y clasificar las rocas y asociaciones minerales de las alteraciones.

La identificación mineral y textural se realizó por medio de la microscopía óptica de luz reflejada y transmitida en secciones delgadas de rocas y minerales. La identificación y parametrización de las asociaciones minerales proporciona información importante, para caracterizar un sistema geotérmico, particularmente la interacción agua-roca, información que es relevante para la exploración. Se tomaron fotografías de puntos particulares de la lámina delgada y de la relación textural de los minerales de alteración que se observaron en las muestras analizadas.

Para complementar las observaciones mineralógicas se llevó a cabo un análisis de espectroscopía de infrarrojo cercano (SWIR), particularmente para identificar minerales de arcilla y zeolitas. El SWIR es una técnica determinativa que puede aplicarse a la exploración geotérmica (Canet et al., 2010) y minera (Herrmann et al., 2001). Con ella se logra identificar minerales de alteración que no son reconocidos en muestra de mano o en el microscopio petrográfico.

El SWIR capta la reflectancia de los minerales en el rango de longitudes de onda de 1300 a 2500 nm, la cual es causada por la vibración de las moléculas al ser irradiadas (Canet et al., 2010). Las mediciones se realizaron con los espectrómetros Orexpress y LabSpec Pro del Laboratorio de Petrografía y Microtermometría del Instituto de Geofísica de la UNAM. Para la identificación mineral se utilizó la base SpecMin, SII.

Cabe resaltar que las muestras obtenidas comprenden sedimento del fondo, depósitos alrededor de los manantiales termales, costras y rocas alteradas en la región termal.

### **Marco geológico**

La región geotérmica de Atotonilco El Alto-Santa Rita se ubica en la porción centro-oeste de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). Aflora una secuencia de rocas volcánicas y vulcanosedimentarias de composición intermedia a ácida, con edades que van del Mioceno Tardío al Plioceno, afectadas por estructuras distensivas. Regionalmente las manifestaciones termales se encuentran relacionadas con el Graben de Chapala (Figura 2). Esta fosa tectónica se extiende de oriente a poniente a lo largo de más de 110 km de longitud y con unos 35 km de anchura en su parte más ancha.

Las fallas que conforman la fosa tectónica de Chapala son numerosas, de dimensiones importantes, de tipo normal y de orientación E-W con ángulos de inclinación pronunciados. Morfológicamente se expresan traducen en escarpes muy pronunciados y espectaculares con desniveles topográficos importantes.

El límite meridional de la fosa tectónica está constituido por fallas paralelas, a veces bifurcadas, con planos que se inclinan hacia el norte, formando bloques tabulares, escalonados y apretados. Hacia la parte norte de la fosa, en la región de Atotonilco, las fallas son más espaciadas, pero no menos importantes y con planos que buzcan hacia el sur. Estas fallas constituyen las paredes de la fosa (Reyes et al., 1990).

La fosa tectónica de Chapala afecta rocas del Mioceno y del Plioceno, incluyendo algunas de las estructuras volcánicas asignadas a esta última época.

Paralelamente a la fosa tectónica de Chapala, en la porción noroccidental del sector es posible reconocer algunas fallas que cortan las mesas ignimbríticas de la parte más meridional de la región, conocida como Los Altos de Jalisco. Se trata de fallas normales que, en su conjunto, forman pilares y fosas tectónicas de dimensiones moderadas y desniveles topográficos modestos (Figura 2). De la misma manera que en la fosa tectónica de Chapala, las fallas del sistema de Los Altos de Jalisco siguen una orientación E-W, también con una ligera tendencia hacia el WNW (Reyes et al., 1990).

### Manifestaciones termales superficiales

La región termal de Atotonilco-Santa Rita comprende manantiales termales, zonas de alteración hidrotermal y pozos de agua caliente, que se presentan en las localidades de Agua Caliente, Santa Rita, La Esperanza, La Higuera y Cerro de la Culebra (Tabla 1). Estas descargas termales se utilizan localmente para fines recreativos.

Tabla 1. Manifestaciones termales identificadas en la región de Atotonilco El Alto-Santa Rita, Jalisco.

Localidad	Municipio	Tipo de manifestación	Temperatura (°C)
Santa Rita	Ayotlán	Pozo	39.9
Santa Rita	Ayotlán	Manantial	39.4
Salitrillo	--	Pozo	37.9
Agua Caliente	Atotonilco El Alto	Manantial	74.9
Agua Caliente	Atotonilco El Alto	Noria	40.9
Agua Caliente	Atotonilco El Alto	Manantial	72.2
La Higuera	--	Pozo	53.8
La Esperanza	Ayotlán	Pozo	64.2
Santa Rita	Ayotlán	Pozo	55.4
Santa Rita	Ayotlán	Manantial	41.7
Santa Rita	Ayotlán	Pozo	53.3
Santa Rita	Ayotlán	Pozo	42.2
Santa Rita	Ayotlán	Manantial en balneario	39
Santa Rita	Ayotlán	Manantial	40.2

Los manantiales termales presentan temperaturas de descarga que abarcan de los 39°C a los 75°C, con emanaciones difusas. Los dos manantiales de Agua Caliente son los que presentan las mayores temperaturas (74.9 C y 72.2°C), mientras que en la localidad La Esperanza existe un pozo perforado aproximadamente en 1983 por la Gerencia General de Estudios e Ingeniería Preliminar de la CFE, como parte de un proyecto de estudios geotécnicos e hidrológicos. El agua de este pozo presenta una temperatura de 64.2°C, que resulta ser la más alta, después de la de los manantiales de Agua Caliente. En los alrededores de Santa Rita se presenta además emanación difusa de gas de forma ocasional en las pozas (Figura 3).

Las muestras obtenidas comprenden sedimento del fondo y alrededor de los manantiales termales,

costras y rocas alteradas.

## Resultados

Los resultados geológicos preliminares indican que la distribución de los manantiales termales y pozos calientes, está relacionada con un patrón de fallas en dirección NE-SW y NW-SE (ver Figura 2), consecuentes a la zona extensional del oriente del Graben de Chapala.

Las rocas que afloran en las zonas termales son andesitas, depósitos de cenizas volcánicas, brechas volcánicas e ignimbritas. El vulcanismo más reciente es del Plioceno (~2.5-3 Ma), de tipo andesítico y está estrechamente relacionado a las estructuras regionales del graben. Las rocas adyacentes a las manifestaciones termales presentan vetillas, costras y reemplazamiento selectivo causado por alteración hidrotermal.

Las asociaciones minerales de depósito y alteración hidrotermal consisten de zeolitas, celadonita, calcita, montmorillonita y ópalo, denotando una alteración argílica, silicificación y carbonatización, restringida alrededor de los manantiales activos y en planos de fracturas y fallas relacionadas.

La identificación de las asociaciones minerales a través de petrografía (Figura 4) y espectrometría de infrarrojo (Figura 5) reveló la presencia de celadonita, zeolitas del tipo estilbita y heulandita, y ópalo. La sílice se presenta como relleno de oquedades y en vetillas, a veces asociado a montmorillonita. La calcita ocurre en vetillas, relleno de oquedades y reemplazando feldespatos. La celadonita, estilbita y heulandita rellenan poros en rocas andesíticas, mientras que la montmorillonita se presenta reemplazando feldespatos. Todo ello evidencia un fluido hidrotermal de baja temperatura. En las andesitas, por su parte, es común la presencia de hornblenda oxidada.

Como se mencionó, los resultados mineralógicos sugieren una actividad hidrotermal de baja temperatura (<100°C), con fluidos termales de composición semi-neutra a alcalina, con una relativa abundancia de carbonatos. Algunas manifestaciones fósiles se encuentran a lo largo de fallas, sugiriendo actividad hidrotermal previa y un posible sistema longevo estrechamente relacionado con la formación del graben.

## Conclusiones

La intensidad, distribución y tipos de la alteración sugieren que en el subsuelo de la zona de Atotonilco El Alto-Santa Rita puede haber un yacimiento geotérmico de mediana temperatura (por ejemplo, la presencia de sílice en depósitos superficiales). Se trataría probablemente de un sistema hidrotermal convectivo de dominio extensional, con base en el contexto geológico la zona y el contexto distensivo en la región, controlado por la evolución del graben principalmente en el Plioceno.

## Referencias bibliográficas

- Ban, M., Hasenaka, T., Delgado-Granados, H., & Takaoka, N., 1992. K-Ar ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacan-Guanajuato volcanic field, Mexico. *Geofísica Internacional*, 31(4), pp. 467-473.
- Canet, C., Arana, L., González-Partida, E., Pi, T., Prol-Ledesma, R.M., Franco, S.I. & López-Hernández, A., 2010. A statistics-based method for the short-wave infrared spectral analysis of altered rocks: An example from the Acoculco Caldera, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geochemical Exploration*, 105(1), pp. 1-10.

- Herrmann, W., Blake, M., Doyle, M., Huston, D., Kamprad, J., Merry, N., & Pontual, S., 2001. Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. *Economic Geology*, 96(5), pp. 939-955.
- Orozco Vázquez, L., 1986. Compilación de datos para la historia de Atotonilco El Alto, Jalisco. Segundo tomo, 2007.
- Reyes, J.M., & Samaniego, Á.F.N., 1990. Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 9(1), pp. 33-50.
- Rodríguez-Díaz, R., 2009. Metalogenia del Área Mineralizada en Manganese de Bahía Concepción, Baja California Sur. Inédito.
- Rodríguez-Díaz, R., 2015. Seminario Alteraciones Hidrotermales en Sistemas Geotérmicos. Ciudad de México, México.
- Rosas-Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J., & Maciel, R., 1989. Geología del extremo oriental del Graben de Chapala, breve discusión sobre su edad: zonas geotérmicas Ixtlan de Los Hervores-Los Negritos, México. *Geotermia-Revista Mexicana de Geoenergía*, 5, pp. 3-18.
- SENER, 2013. *Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027*. 230 pp.

### **FIGURAS EN LAS PÁGINAS SIGUIENTES**



Figura 1. Localización de la zona geotérmica Atotonilco El Alto-Santa Rita, Jalisco.

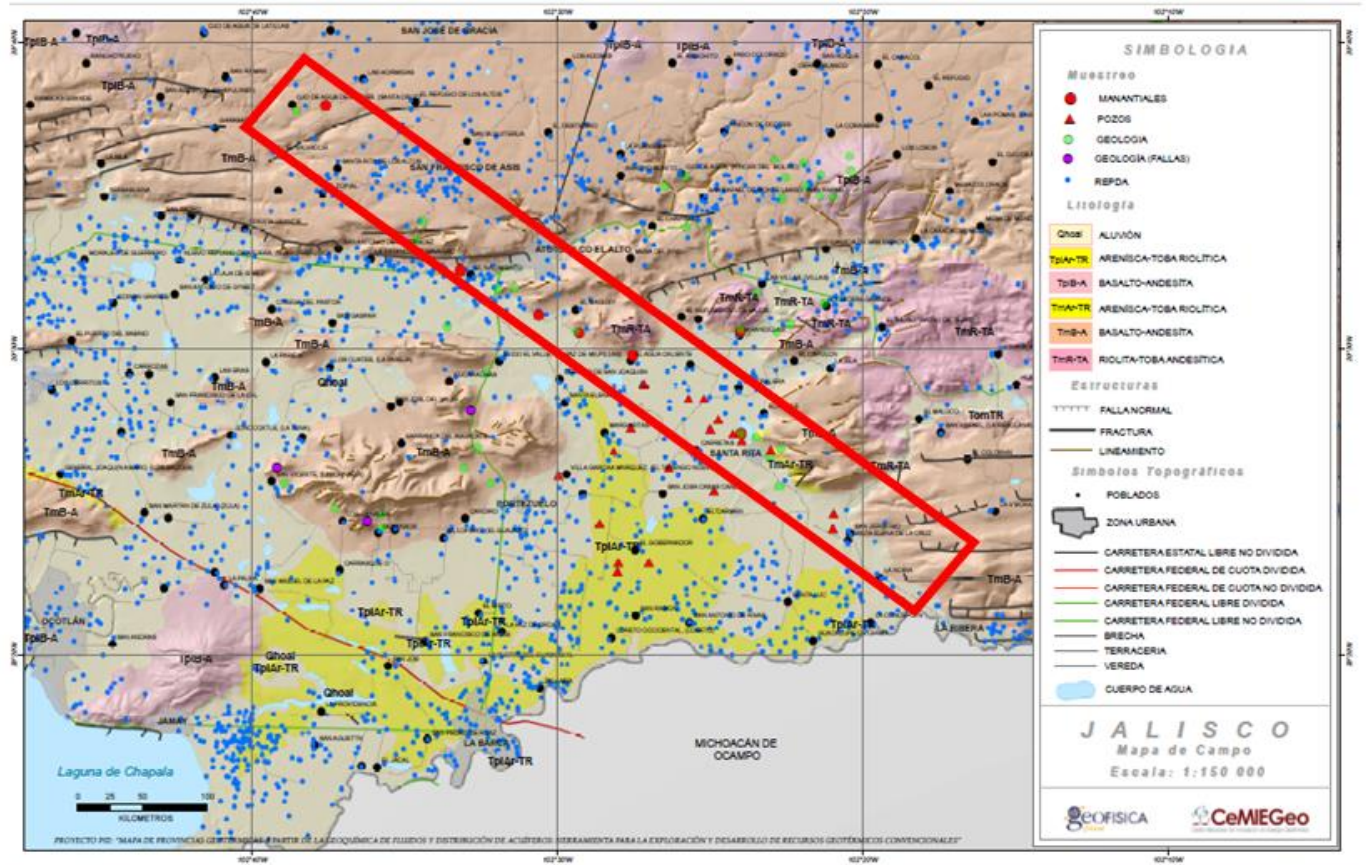


Figura 2. Mapa de campo. Los resultados geológicos preliminares indican que los manantiales termales con descargas menores a los 60°C están relacionadas con un patrón de fallas en dirección NE-SW y NW-SE (Tomado de Ruiz-Armenta, Proyecto P02 del CeMIEGeo).



Figura 3. Fotos de campo: A) Manifestación en la localidad de Agua Caliente con una temperatura de 74.9°C y emanaciones difusas de gas; B) Medición de las emanaciones difusas de gas en la manifestación termal de la localidad de Santa Rita; C) Afloramiento geológico con rocas volcánicas y piroclásticas alteradas hidrotermalmente.

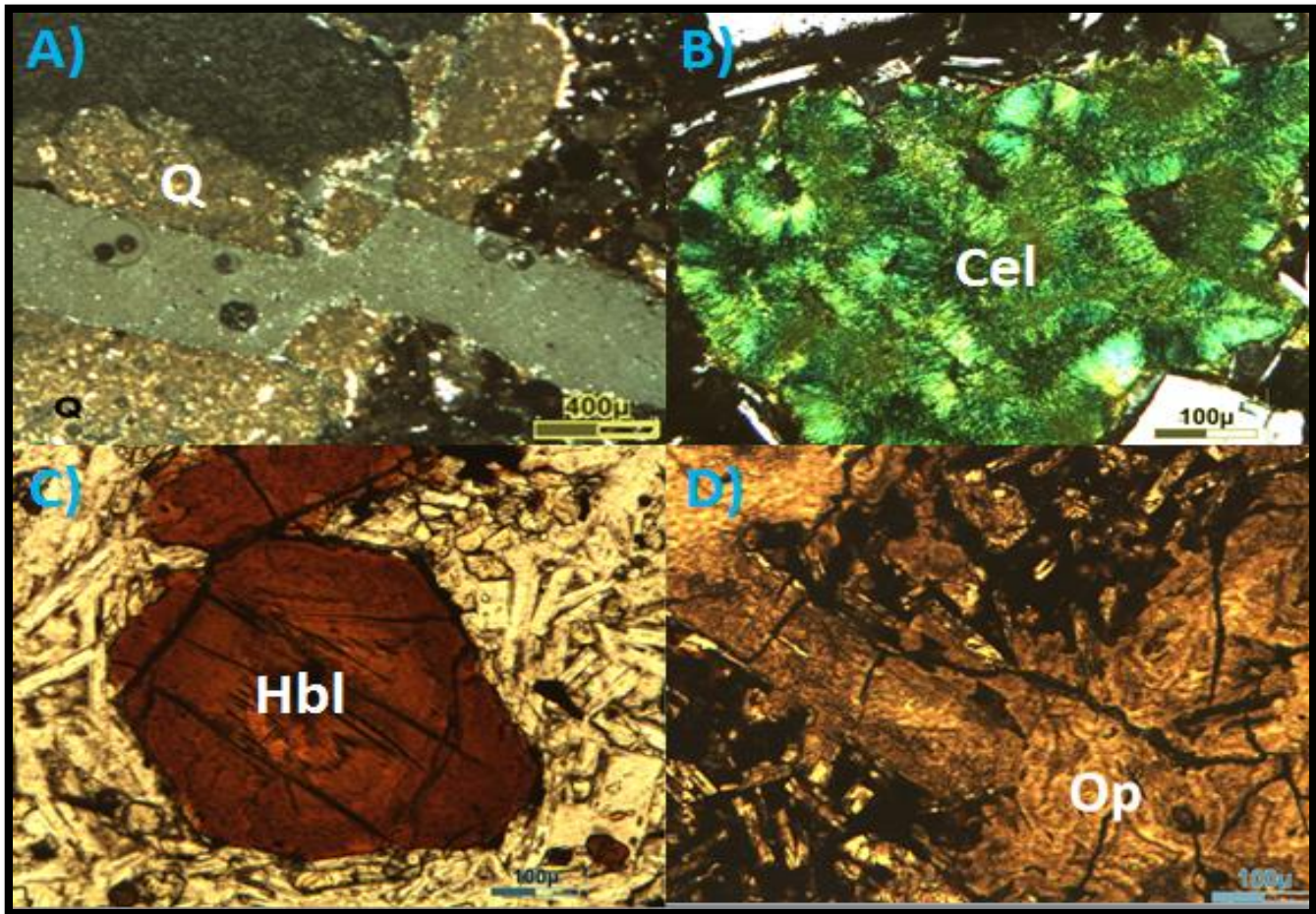


Figura 4. Secciones delgadas de minerales de alteración característicos de la zona Atotonilco El Alto-Santa Rita, vistas al microscopio óptico, nícoles cruzados. A) Relleno de oquedad y vetillas sílice, con notable fallamiento contemporáneo a la alteración. B) Mineral de celadonita relleno de oquedad en roca andesítica, evidenciando un fluido de baja temperatura. C) Presencia de fenocristales de hornblenda oxidada en matriz pilotaxítica en andesitas. D) Ópalo en vetillas en rocas andesíticas, asociado con minerales de arcilla. Q: cuarzo, Cel: celadonita, Hbl: hornblenda, Op: ópalo.

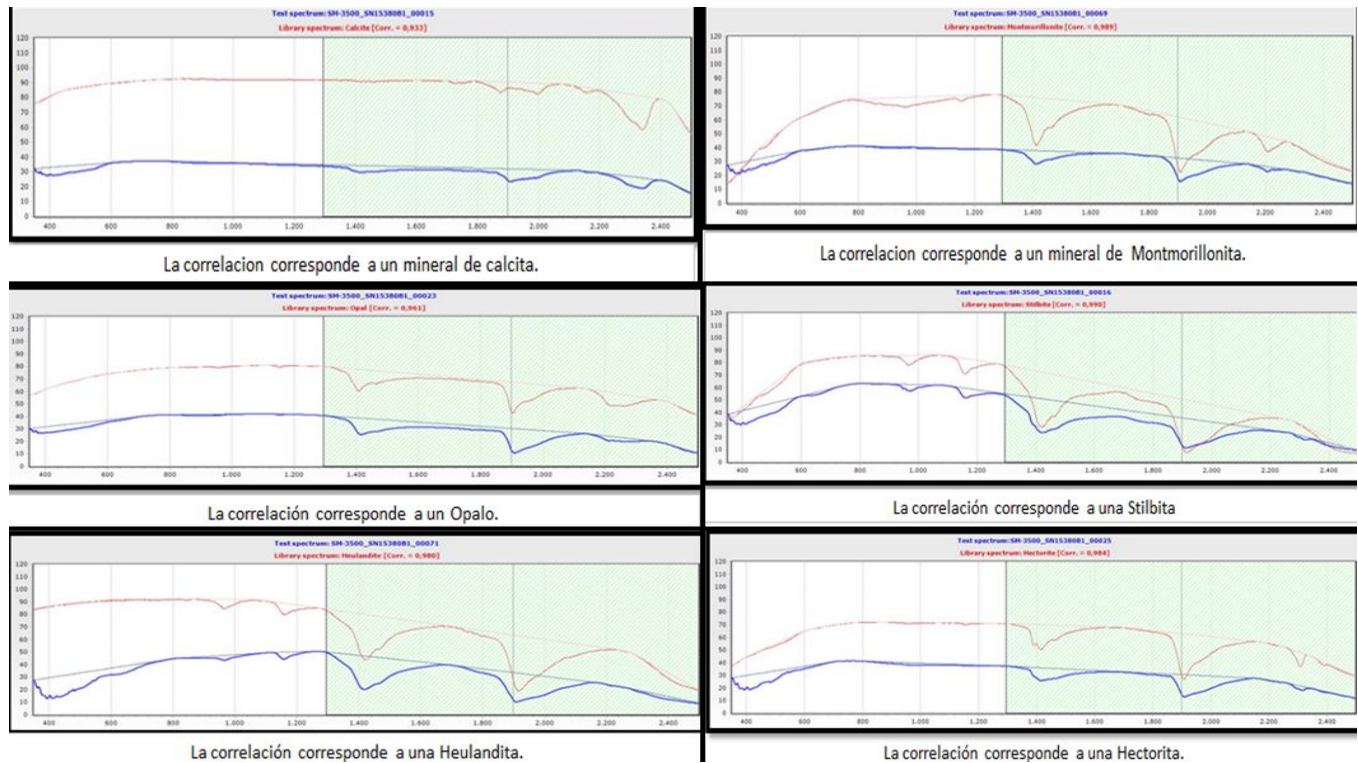
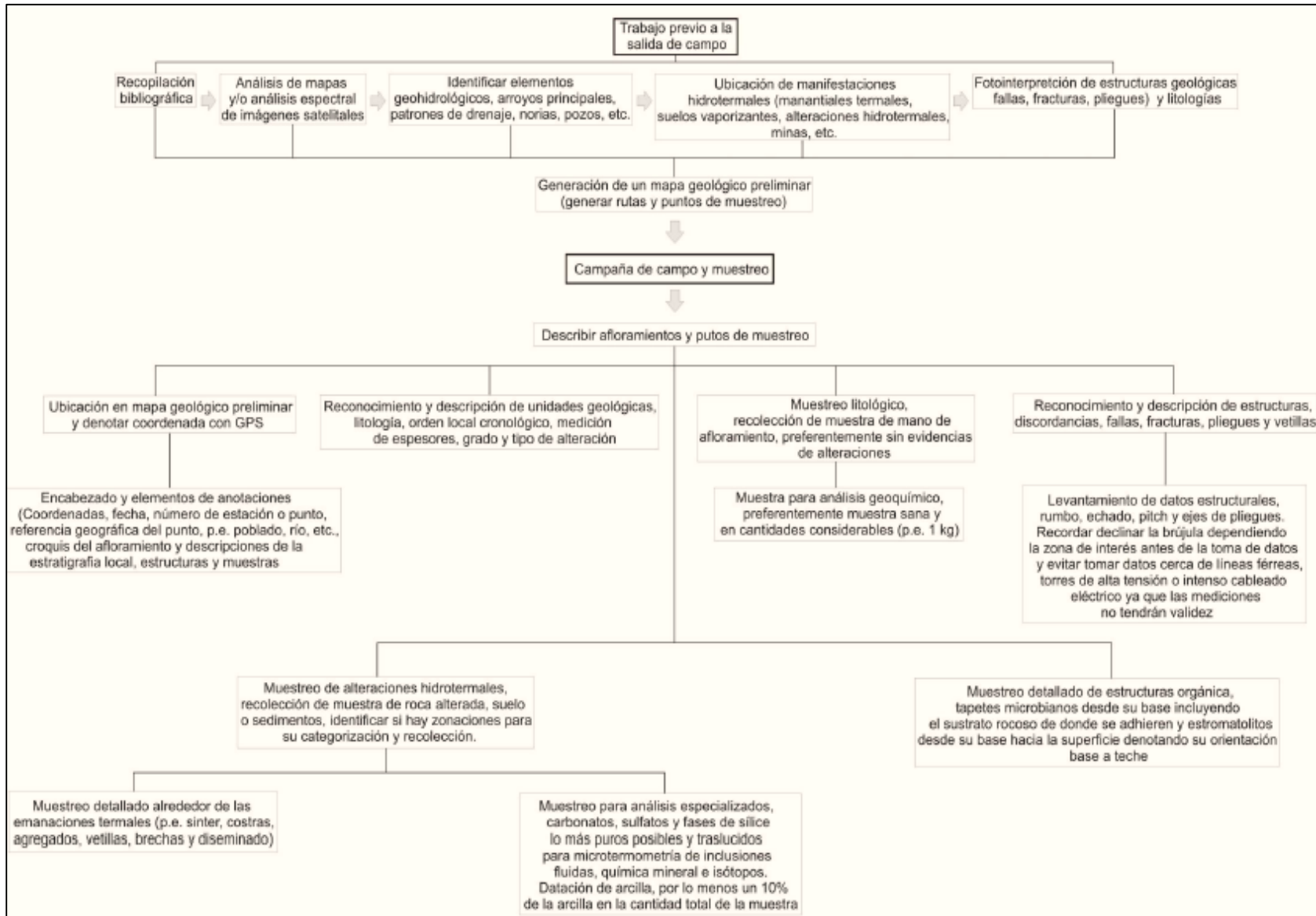


Figura 5. Resultados de análisis de SWIR en rocas alteradas. La línea azul es el espectro medido y la línea roja es el espectro relacionado con la base de datos, correspondientes a los siguientes minerales de alteración hidrotermal: calcita, montmorillonita, ópalo, estilbita, heulandita y hectorita.



Cuadro 1. Cuadro conceptual de la secuencia del trabajo geológico de campo en zonas termales (Rodríguez-Díaz, 2015).