

## **Explosiones freáticas y génesis de las manifestaciones termales en la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores, Michoacán, México**

**Tania Lucía Gaspar Patarroyo y Víctor Hugo Garduño Monroy**

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) - Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo). Correo: [taniapatarroyo@gmail.com](mailto:taniapatarroyo@gmail.com)

### **Resumen**

La zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores está ubicada en el sector noroccidental del estado de Michoacán, México, cerca del límite con el estado de Jalisco. Comprende los poblados de Ixtlán de los Hervores y El Salitre y se enmarca en el extremo oriental del Graben de Chapala, que resulta ser el brazo E-W del punto triple al occidente de la Faja Volcánica Transmexicana. La zona presenta más de 160 manifestaciones hidrotermales como manantiales calientes, pequeños géiseres, fumarolas y volcanes de lodo, con temperaturas que oscilan entre 35 y 92°C, alineados en una tendencia NW-SE en concordancia con la Falla Ixtlán-Encinal, la cual representa el límite norte del Graben de Chapala. A su vez, todas las manifestaciones se ubican al occidente de la Falla Nogales, una estructura regional normal de dirección NE-SW que intersecta ortogonalmente a la anterior y que actúa como frontera geológica de las expresiones termales superficiales. Se plantea la existencia de una zona de relevo y que la falla Ixtlán-Encinal está segmentada. También se indica que hay procesos de auto-sellamiento por precipitación de sílice, lo que provoca eventuales erupciones freáticas que permiten liberar el exceso de presión del vapor y que dan origen a nuevas manifestaciones termales. La ocurrencia de estos eventos freáticos es común como lo demuestra erupción freática reportada en mayo de 2000, y el nacimiento de un volcán de lodo en enero de 2016 (reportado en este trabajo), ambas en el poblado El Salitre.

*Palabras clave:* Falla Ixtlán-Encinal, Falla Nogales, zona de relevo, segmentos de falla, manifestaciones hidrotermales, erupción freática, auto-sellamiento.

## **Phreatic eruptions and genesis of thermal manifestations in the Ixtlán de los Hervores geothermal area, Michoacán, Mexico**

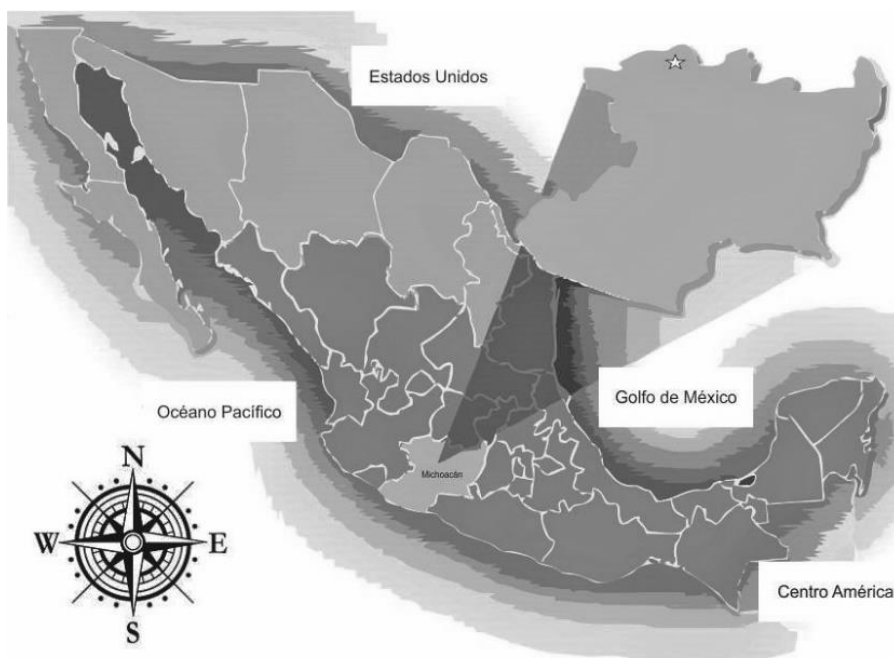
### **Abstract**

The Ixtlán de los Hervores geothermal area is located in the northwestern sector of the state of Michoacán, Mexico, near its border with the state of Jalisco. It encompasses the towns of Ixtlán de los Hervores and El Salitre. It is part of the eastern limit of the Chapala Graben, which is the E-W leg of the triple junction at the western Mexican Volcanic Belt. There are more than 160 thermal manifestations as hot springs, small geysers, steam vents and mud volcanoes. Their temperatures ranges between 35 and 92°C with a NW-SE trend in accordance with the normal Ixtlán-Encinal fault, which represents the northern border of the Chapala Graben. All thermal manifestations are located at the west of the Nogales fault, a NE-SW normal regional structure that intersects orthogonally the Ixtlán-Encinal fault and seems to be the geological limit for these surface thermal manifestations. We propose the existence of a breached relay zone that structurally control the alignments of thermal manifestations. We also propose there are self-sealing processes at some of those faults due to precipitation of silica, resulting in eventual phreatic eruptions to release the vapor pressure, which in turn produce new thermal manifestations. The occurrence of phreatic explosions is common in this area, as evidenced by a reported phreatic eruption on May 2000 and by the birth of a new mud volcano on January 2016 (reported in this paper), both occurred at El Salitre village.

*Keywords:* Ixtlán-Encinal fault, Nogales fault, breached relay zone, thermal manifestations, phreatic eruptions, self-sealing.

## 1. Introducción

La zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores está ubicada en el sector noroccidental del estado de Michoacán, México (Figura 1), cerca del límite con el estado de Jalisco y comprende los poblados de Ixtlán de los Hervores y El Salitre; se encuentra a 27 kilómetros en dirección NE de la zona geotérmica de Los Negritos.



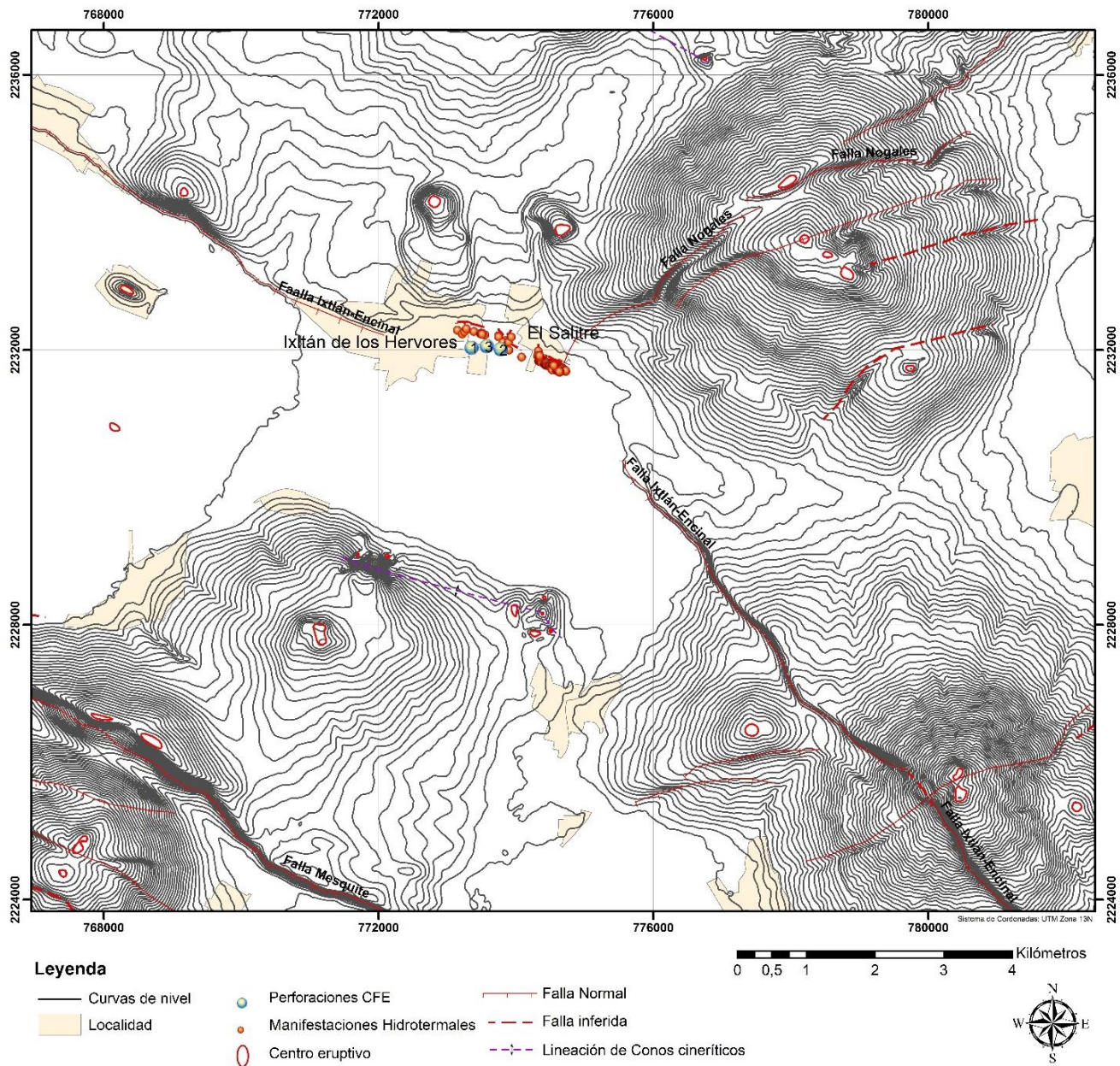
**Fig. 1. Mapa de México y estado de Michoacán con la localización de la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores (estrella blanca).**

Entre 1956 y 1957 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) perforó el Pozo 1. Este pozo presentó un comportamiento impredecible y permaneció inactivo por aproximadamente 51 años hasta el día 10 de abril de 2006 que presentó una actividad vigorosamente inusual al arrojar bloques de roca y cristales de minerales como calcita y pirita. También presentó actividad en los años 2011, 2013 y 2014, y actualmente presenta un comportamiento esporádico que suele consistir de emanaciones pasivas de vapor y/o agua.

Posteriormente, entre 1957 y 1958 la CFE perforó el Pozo 2, pero al llegar a los 49.5 metros de profundidad empezó a fluir agua caliente y el pozo se convirtió en el atractivo turístico conocido actualmente como “Géiser de Ixtlán”, el cual tuvo un flujo ininterrumpido de agua durante 35 años (Viggiano-Guerra & Gutiérrez-Negrín, 2007; Torres-Cervantes, 2009).

Entre octubre de 2004 y enero de 2005 se perforó el Pozo 3 con el objetivo de mantener un flujo continuo de agua a presión que reemplazara al “Géiser de Ixtlán”; con las muestras de canal procedentes de esta perforación fue realizado un estudio petrográfico y de alteración hidrotermal por Viggiano-Guerra & Gutiérrez-Negrín en 2007.

En este trabajo se muestra el conteo preliminar de las manifestaciones termales superficiales que aparecen en la zona y su interpretación estructural. Asimismo se plantea que esas manifestaciones termales se han originado a través del tiempo mediante explosiones freáticas, como las ocurridas en 2000 y 2016 en el poblado El Salitre.



**Fig. 2. Mapa con las principales estructuras (fallas normales) y manifestaciones termale en la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores.**

## 2. Antecedentes

La zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores se localiza en el extremo oriental del Graben de Chapala, que resulta ser el brazo E-W del punto triple al occidente de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y en el límite NW del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) (Rosas-Elguera *et al.*, 1989).



Para inicios de 1968 el área de Ixtlán de los Hervores fue estudiada a nivel geológico, geofísico y geoquímico por el Instituto de Investigación para la Industria Eléctrica, que era entonces parte de la CFE (Banwell & Gómez Valle, 1970). Esta zona geotérmica también ha sido investigada por la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) con imágenes obtenidas por aviones NP3A que la sobrevolaron el 9 y 11 de abril de 1969 como parte de la Misión 91, cubriendo un área de 900 km<sup>2</sup>. La interpretación fotogeológica reveló que las manifestaciones geotérmicas superficiales corresponden a pequeños géiseres y respiraderos de vapor alineados con una tendencia NW-SE (Gómez Valle *et al.*, 1970; Hickel & Pecora, 1970; Banwell & Gómez Valle, 1970).

Los rasgos tectónicos más relevantes del área son la Falla Ixtlán-Encinal, con dirección NW-SE, que intersecta a la Falla Nogales, de dirección NE-SW. Ambas son fallas normales (Fig. 2). La Falla Ixtlán-Encinal es parte del flanco norte del Graben de Chapala y controla el cauce del Río Duero. Funciona como el conducto de ascenso de fluidos hidrotermales, como lo indica el hecho de que las manifestaciones termales se encuentran con la misma tendencia de esta estructura. La falla tiene aproximadamente 30 km de longitud y una inclinación de 80° al SW (Viggiano-Guerra & Gutiérrez-Negrín, 2006).

A nivel litológico predominan rocas volcánicas, seguidas por sedimentos lacustres asociados a la antigua extensión del Lago de Chapala. En 1992 Rosas Elguera y Urrutia-Fucugauchi realizaron un estudio de magnetoestratigrafía volcánica y dataciones K-Ar mostrando que el vulcanismo intenso que caracteriza a esta zona se desarrolló desde el *Cron 8* (Mioceno Tardío, fechamiento K-Ar de  $8.8 \pm 0.8$  Ma) hasta el *Cron Brunches* (Reciente).

De las muestras de canal procedentes de la perforación del Pozo 3, realizada entre 2004 y 2005, se llevó a cabo un detallado estudio litológico y de alteración hidrotermal, concluyendo que el subsuelo de esta zona geotérmica corresponde probablemente a una zona de fractura ancha, relacionada a un segmento de la falla Ixtlán-Encinal, con una asociación mineralógica hidrotermal en facies de zeolitas y temperaturas de bajas a altas (125-225°C) (Viggiano-Guerra & Gutiérrez-Negrín, 2007).

En esta zona los fluidos hidrotermales han permitido la precipitación de minerales de sílice, encontrándose espesores de hasta 1.5 m de sínter con varias tonalidades de gris a blanco, sobreyaciendo sedimentos lacustres también alterados hidrotermalmente, según reportan Rosas y Olguín en 1981 (en Viggiano-Guerra & Gutiérrez-Negrín, 2007).

En la zona se han reportado erupciones freáticas. Una de ellas ocurrió el 19 de mayo de 2000, arrojando agua y lodo hasta 10 metros de altura. Dio lugar a una serie de cinco cráteres alineados con dirección NE-SW de hasta 3 metros de diámetro, donde brotó agua y lodo a 90°C de temperatura. El evento duró aproximadamente 45 minutos (Casarrubias, 2000).

### 3. Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es analizar la relación entre las fallas Ixtlán-Encinal y Nogales con la actividad hidrotermal superficial existente entre las poblaciones de Ixtlán de los Hervores y El Salitre. Esto se llevó a cabo mediante una cartografía detallada de las manifestaciones termales, acompañada de una medición de su temperatura. Al mismo tiempo, se pretende comprender la relación existente entre las explosiones freáticas ocurridas en la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores y las manifestaciones termales. Finalmente, este trabajo reporta la explosión hidrotermal ocurrida el día 12 de enero de 2016 en el poblado de El Salitre, que generó un nuevo volcán de lodo.

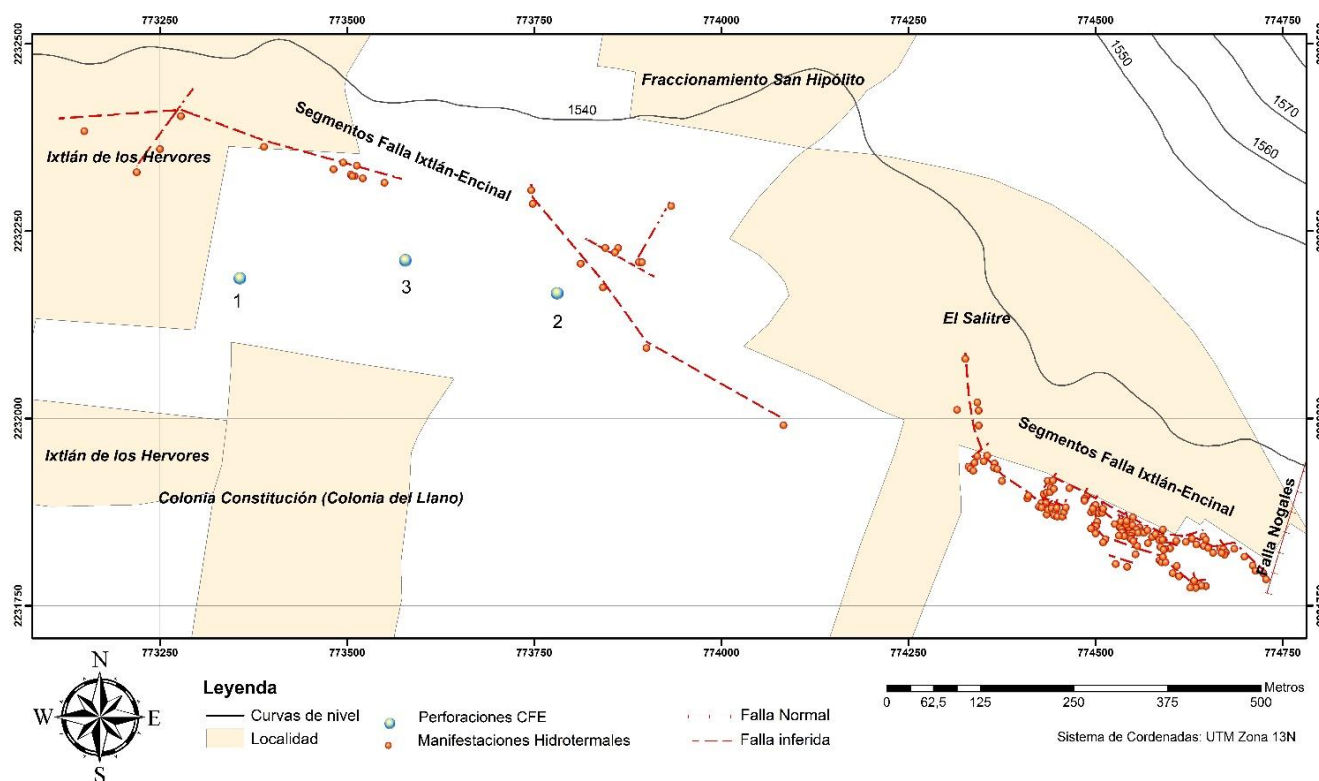
### 4. Metodología

Las manifestaciones hidrotermales del área se cartografiaron utilizando el sistema de coordenadas *UTM (Universal Transversal Mercator)* y con el apoyo de un *GPS Trimble Nomad 1050 LE*. Ubicada la manifestación, se midió su temperatura en grados Celsius mediante un pirómetro infrarrojo marca *TITAN* con precisión de  $\pm 2\%$ ; el rayo infrarrojo fue proyectado sobre la manifestación hidrotermal a una distancia menor de un metro.

De cada manifestación se reportaron características como color del agua, presencia de gases (burbujeo), vapor, escorrentía, contenido de materia vegetal, presencia o no de depósitos de sinter, diámetro de la fuente termal y dirección del eje principal de la manifestación, para identificar posibles tendencias estructurales. Finalmente los datos fueron compilados sobre una base de datos Excel y georreferenciados en el software *ArcGIS V.10.2*.

Para comprender la relación entre la actividad hidrotermal y las principales estructuras regionales, se procedió al reconocimiento de estas estructuras con apoyo de un modelo de elevación digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) e imágenes satelitales. Posteriormente la localización de las manifestaciones hidrotermales se plasmó en el software *ArcGIS V.10.2* y se procedió a analizar su relación con las fallas y a identificar posibles lineaciones entre las manifestaciones superficiales.

## 5. Resultados



**Fig. 3. Mapa de detalle con la localización de las 160 manifestaciones hidrotermales identificadas en la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores.**

En la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores se contabilizaron un total de 160 manifestaciones hidrotermales individuales, con temperaturas superficiales entre 35 y 92° C. Se presume que puede haber más, que podrían ubicarse dentro de los terrenos de casas y predios particulares del poblado El Salitre, donde se hacen más numerosas (ver Tabla 1 y Figura 3).

La distribución espacial de esta actividad hidrotermal superficial presenta muestra una tendencia general NW-SE que concuerda con el rumbo de la Falla Ixtlán-Encinal. También resulta evidente que la totalidad de las manifestaciones termales identificadas, sean manantiales calientes, pequeños géiseres, fumarolas y volcanes de lodo, brota al occidente de la Falla Nogales. Se pueden inferir algunos pequeños segmentos de la Falla Ixtlán-Encinal mediante las alineaciones de las manifestaciones hidrotermales (Figura 3).

Aunque en general todas las manifestaciones hidrotermales tienen un patrón NW-SW paralelo al trazo de la Falla Ixtlán-Encinal, se observa también un cierto desplazamiento con respecto al trazo conocido de la falla. En algunos casos ese desplazamiento llega a ser hasta de 1 kilómetro en dirección norte, lo que permite inferir que esta distancia puede corresponder a la zona de relevo entre los diferentes segmentos de la misma.

También se logró identificar algunos alineamientos donde se puede inferir transferencia de la deformación lo que ha dado lugar a segmentos más pequeños de la Falla Ixtlán-Encinal. Esta transferencia parece propiciar la aparición eventual de nuevas manifestaciones hidrotermales.

En general, las manifestaciones hidrotermales presentaron una temperatura superficial que oscilaba entre 39 y 92°C. En aquellas en las que fue posible establecer una orientación preferencial de alargamiento, este fue NW-SE, que corresponde a la misma tendencia de la Falla Ixtlán-Encinal. La mayoría de las manifestaciones presentaron depósitos de sínter asociados. La Tabla 1 presenta un resumen de las manifestaciones hidrotermales más relevantes por su tamaño o bien por su temperatura más alta, e incluye una breve descripción de sus características.

### **Reporte de erupción hidrotermal**

El 12 de enero de 2016 ocurrió una erupción freática en la población de El Salitre, según lo comentado por personas de la localidad.

La erupción formó un volcán de lodo que arrojó inicialmente lodo y agua, con episodios de actividad de tipo géiser intermitentes, de acuerdo con las descripciones de los pobladores. La temperatura superficial medida en campo el 24 de enero de 2016, es decir doce días después del evento, fue de 86°C (Fig. 4).

Esta nueva manifestación hidrotermal se localiza en a las coordenadas *UTM* X: 774342 y Y: 2232030, y se ubica igualmente en la franja de tendencia NW-SE, en donde se ha desarrollado la actividad hidrotermal en esta zona geotérmica.

Un factor interesante es que este volcán de lodo emergió en un terreno que próximamente se pavimentará, y que antes de la erupción hubo una excavación superficial. Esto puede indicar que la erupción fue detonada por el aligeramiento de una porción sellada y/o impermeable ubicada a una profundidad muy somera, que cubría el acuífero termal del subsuelo. Esta porción puede ser de formación local y debida a procesos de auto-sellamiento por el depósito de minerales hidrotermales a lo largo de fracturas o zonas originalmente abiertas y permeables.

Número de Manifestación (nombre local)	Coordenadas		Temperatura (°C)	Observaciones
	X	Y		
42	774406	2231902	43	Manifestación a nivel del suelo, aparente cráter de explosión, sin flujo de agua, no presenta ni sinter, ni vapor y con dos metros de diámetro.
48	774428	2231889	48	Manifestación a nivel del suelo, cráter de explosión, sin flujo de agua, sin depósito de sinter, gas dominante y con 30 cm de diámetro.
49	774435	2231880	48	Manifestación a nivel del suelo, cráter de explosión, sin flujo de agua, con sinter y de 3 metros de diámetro
69	774484	2231904	90	Manifestación a nivel del suelo, intermitente, con pequeña capa de sinter (2cm de espesor) y sin flujo de agua. Con dirección N110.
109	774574	2231850	88	Manifestación a nivel del suelo, con flujo de agua, sinter y 40 cm de diámetro.
113	774584	2231848	89	Manifestación a nivel del suelo, intermitente, sin flujo de agua y con sinter.
128	774607	2231844	92	Manifestación a nivel del suelo, gas dominante, agua hirviendo, sin flujo de agua y sin sinter
132 (Pozo Verde)	774610	2231810	75	Manifestación hidrotermal a nivel del suelo, con flujo de agua, líquido dominante y con gran desarrollo de sinter. Posible cráter de explosión, presenta una fractura con dirección N340, posible influencia tectónica reciente y con 4,9 metros de diámetro.
140	774647	2231846	88	Manifestación a nivel del suelo, sin flujo agua, gas dominante y con sinter.
141	774651	2231833	88	Manifestación a nivel del suelo, sin flujo agua, gas dominante, intermitente y con poco sinter.
152	774728	2231792	90	Manifestación a profundidad mayor a 1m, sin flujo de agua, gas dominante y sin sinter
159 (Pozo Loco)	773845	2232183	75	Manifestación hidrotermal con agua clara, tonalidad verde por profundidad, vapor y burbujeo intermitente en cierto sector, sin olor. Presenta una relación directa con el pozo 2 o “Géiser de Ixtlán”, dado que su erupción afecta el nivel de agua de esta manifestación al disminuirlo.
160	774342	2232030	86	Manifestación hidrotermal, producto de la explosión hidrotermal del 12 de enero de 2016, con comportamiento intermitente estilo géiser, se clasificó como volcán de lodo.

**Tabla 1. Resumen de las manifestaciones hidrotermales más relevantes por su tamaño o por su temperatura alta.**





**Fig. 4. Restos del volcán de lodo formado el 12 de enero de 2016. Obsérvese el flujo de lodo emitido por la manifestación, localizada sobre una calle del poblado El Salitre que se pretende pavimentar. Las rocas sobre la manifestación fueron colocadas por pobladores como protección, dado que el lodo que permanecía en su interior casi dos semanas después (el 24 de enero) presentaba una temperatura de 86°C. La escala blanca colocada en la parte inferior derecha de la foto mide 20 centímetros de longitud**

## **6. Conclusiones**

- Las manifestaciones termales superficiales en Ixtlán de los Hervores consisten en manantiales calientes, pequeños géiseres, fumarolas y volcanes de lodo, cuya temperatura oscilan entre 39 y 92°C.



- Todas esas manifestaciones se distribuyen espacialmente en dirección NW-SE y están asociadas a la Falla Ixtlán-Encinal de la misma dirección.
- Algunas de esas manifestaciones aprovecharon de segmentos de falla generados mediante transferencia de la deformación en las zonas de relevo de la Falla Ixtlán-Encinal.
- La mayor parte de las manifestaciones hidrotermales está relacionada con explosiones freáticas que se han presentado a través del tiempo, las cuales suelen dejar nuevas manifestaciones. Una de esas explosiones es la reportada en este trabajo, ocurrida el 12 de enero de 2016, que dio lugar al nacimiento de un volcán de lodo en una calle del poblado de El Salitre.
- Se concluye que los segmentos de la Falla Ixtlán-Encinal son conductos de ascenso de los fluidos hidrotermales y que presentan una tendencia al auto-sellamiento debido a la precipitación de sílice en su interior. Por lo tanto, las explosiones freáticas ocurren como respuesta al exceso de presión de vapor, y eventualmente dan origen a nuevas manifestaciones hidrotermales.
- Las manifestaciones afloran únicamente al occidente de la Falla Nogales, lo que parece indicar que esta actúa como una frontera geológica que probablemente pone en contacto una unidad litológica impermeable, impidiendo el brote de manifestaciones en su porción oriental.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al equipo de CeMIE-Geo, Proyecto 17, en especial a los ingenieros geólogos Gerardo Bermejo, Emmanuel Olvera García y Jorge Alejandro Guevara Alday. Asimismo expresan su gratitud hacia Fomento Turístico de Michoacán (FORTUMICH) y el ayuntamiento de Ixtlán de los Hervores, en sus departamentos de Presidencia, Protección Civil y Policía Municipal, por las facilidades prestadas para el desarrollo del trabajo de campo.

## Referencias

- Banwell, C.J. & Gómez Valle, R., 1970. Geothermal exploration in Mexico 1968–1969. *Geothermics*, 2, pp.27–40.
- Casarrubias, Z., 2000. *Explosión Freática en El Salitre, municipio de Ixtlán de los Hervores, Michoacán*, Informe técnico CFE. Inédito.
- Gómez Valle, R., et al., 1970. Photogeologic and thermal infrared reconnaissance surveys of the Los Negritos-Ixtlán de los Hervores geothermal area, Michoacán, Mexico. *Geothermics*, 2(2), pp.381–398.
- Hickel, W.J. & Pecora, W.T., 1970. United States Geological Survey Professional Paper 700A. In *United States Geological Survey Professional Paper*. Washington: U.S. Government Printing Office, p. 419.
- Rosas Elguera, J., y Urrutia-Fucugauchi, J., 1992. Magnetoestratigrafía volcánica de la zona geotérmica Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Michoacán, México: Resultados preliminares. *Geofísica*

*Internacional*, 31(4), pp.431–442.

Rosas-Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J., y Maciel Flores, R., 1989. Geología del extremo oriental del graben de Chapala, breve discusión sobre su edad: zonas geotérmicas de Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, México. *Geotermia*, 5(1), pp.3–18.

Torres-Cervantes, M.A., 2009. *Historia Ilustrada de Ixtlán de los Hervores*, Ixtlán de los Hervores, México.

Viggiano-Guerra, J.C., y Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 2007. Estudio petrográfico y modelo conceptual preliminar de la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores, Michoacán, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(4), pp.61-73.

Viggiano-Guerra, J.C. & Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 2006. Lithology and Hydrothermal Mineralogy of the Well Ixtlán 2, Ixtlán de los Hervores, México. *Geothermal Resources Council*, 30, pp. 45–48.