Special Section
Volcanism and Geothermal Energy

Geofísica Internacional (2026) **65-3**: 2399- 2413

Modelo de favorabilidad geotérmica mediante *Play Fairway Analysis* de la zona geotérmica dentro del Complejo Caldera de Acoculco (Puebla, México)

Emmanuel Olvera-García[1,*], Jorge Alejandro Ávila-Olivera[2], Ángel Figueroa-Soto[1], Denis-Ramón Avellán[3], Martha Gabriela Gómez-Vasconcelos[1], Ruth Villanueva[4] y Domenico Liotta[5]

Abstract

This article presents the results of a Play Fairway Analysis conducted in the geothermal area located within the Acoculco Volcanic Caldera Complex. In this study, considering the proven existence of a geothermal anomaly in the subsurface (identified by deep exploratory wells of >1.5 km depth), geoscientific data from previous studies were considered as proxies for permeability and used to generate a geothermal favorability model. This Play Fairway Analysis has an expert-driven approach, as there are no wells with proven geothermal resources to perform a data-driven Play Fairway Analysis. The data used in this analysis included the location of faults, CO_2 efflux, springs, soil temperature, opal deposits, and hydrothermal eruption craters. The datasets were managed and integrated using QGIS® software. The results highlight two areas with higher geothermal favorability, located approximately 200 m northwest of the exploration well EAC-1, and in the area known as Alcaparrosa. In this article, thanks to data compilation, it is also discussed why the Acoculco geothermal area could be a convective geothermal system and how the resulting areas of higher geothermal favorability are those with the greatest potential for hosting geothermal fluids.

Key words: Geothermal exploration, geoscientific data, proxies, geothermal fluids.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de un *Play Fairway Analysis* realizado en la zona geotérmica localizada dentro del Complejo Caldera de Acoculco. En este estudio, considerando la existencia probada de una anomalía geotérmica en el subsuelo (identificada con pozos de >1.5 km de profundidad), se han utilizado datos geocientíficos de estudios previos considerados como indicadores o *proxies* de permeabilidad para generar el modelo de favorabilidad geotérmica. Este *Play Fairway Analysis* tiene un enfoque de expertos (*expert-driven*), debido a que no existen pozos con recursos geotérmicos probados para realizar un *Play Fairway Analysis* basado en datos (*data-driven*). Los datos empleados en este análisis fueron la ubicación de las fallas, del flujo de CO_2, de los manantiales, de la temperatura del suelo, de los depósitos de ópalo y de los cráteres de erupciones hidrotermales. Las capas de los datos (evidence layers) fueron manejadas e integradas usando el *software* QGIS®. Los resultados muestran dos zonas con mayor favorabilidad geotérmica, ubicadas a aproximadamente 200 m al noroeste del pozo exploratorio EAC-1 y en la zona conocida como Alcaparrosa. En este trabajo, gracias a la recopilación de datos, también se discute por qué la zona geotérmica de Acoculco podría ser un sistema geotérmico convectivo y cómo las zonas con mayor favorabilidad geotérmica resultantes son las que tienen mayor potencial para alojar fluidos geotérmicos.

Palabras clave: Exploración geotérmica, datos geocientíficos, *proxies*, fluidos geotérmicos.

Received: September 19, 2025; Accepted: April 21, 2026; Published on-line: July 1, 2026. https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2026.65.3.1918

Editorial responsibility: Dra. Susana Osorio Ocampo, Universidad de Caldas-Colombia.

* Corresponding author: Emmanuel Olvera García, eolveragar@outlook.com
[1] Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, SECIHTI - Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Morelia, México.
[2] Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Morelia, México.
[3] Universidad Nacional Autónoma de México, SECIHTI – Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Morelia, México.
[4] Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Morelia, México.
[5] Università degli Studi di Bari, Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Bari, Italia.
ORCID: [a]0000-0002-2478-5717, [b]0000-0003-4103-0524, [c]0000-0001-8464-0117, [d]0000-0002-9536-934X, [e]0000-0001-9722-4198, [f]0000-0003-2575-0556, [g]0000-0003-2533-3584

CC BY NC SA

1. Introducción

El Complejo Caldera de Acoculco (CCA) se localiza en el sector oriental del Arco Volcánico Trans-Mexicano. El CCA, desde el Plioceno tardío hasta el Pleistoceno tardío (2.7 – 0.016 Ma), ha presentado un vulcanismo con una composición que varía desde basáltico a dominantemente félsico (Avellán *et al.*, 2019, 2020). Dentro de este complejo volcánico, se ha presentado actividad hidrotermal a lo largo de su evolución (González-Partida *et al.*, 2024), de la cual la actividad superficial actual es limitada en extensión y temperatura. Dicha actividad hidrotermal se encuentra representada por la presencia de algunos manantiales termales, manantiales ácidos, cráteres de erupciones hidrotermales, emisiones de gas y alteración hidrotermal (Canet *et al.*, 2015a; López-Hernández *et al.*, 2009; Peiffer *et al.*, 2014; Santos-Raga *et al.*, 2021).

La actividad hidrotermal en el CCA ha llamado la atención de geocientíficos y la industria por su potencial geotérmico, particularmente por su relación con un sistema magmático y las altas temperaturas estimadas con geotermómetros (Peiffer *et al.*, 2014; Sanjuan *et al.*, 2020; Santos-Raga *et al.*, 2021). En el área se han realizado actividades de exploración, incluyendo dos pozos exploratorios con profundidades de 1810 y 1900 m, realizados por la Comisión Federal de Electricidad (Figura 1). Las temperaturas de fondo de los pozos son de 307 y 267 °C, respectivamente (López-Hernández *et al.*, 2009), lo cual representa un gradiente geotérmico anómalo de ~150 °C/km.

A pesar de las altas temperaturas identificadas en los pozos, no se encontraron fluidos geotérmicos en el subsuelo (López-Hernández *et al.*, 2009). Esta falta de fluidos geotérmicos ha sido asociada a la reducción de permeabilidad por la mineralización secundaria. De hecho, algunos investigadores interpretan esta zona geotérmica como un potencial sistema de roca seca caliente (*hot dry rock*) (p.ej., Pulido *et al.*, 2011) y candidato a desarrollarse como un Sistema Geotérmico Mejorado (Peiffer *et al.*, 2014; Pulido *et al.*, 2011).

El *Play Fairway Analysis* (PFA) es una metodología creada para la exploración de hidrocarburos y que ha sido utilizada recientemente (*ca.* 2014) en la exploración geotérmica (p.ej., Faulds *et al.*, 2016; Forson *et al.*, 2015). El PFA aplicado a la geotermia se basa en: i) identificar los elementos necesarios para que se forme un sistema geotérmico (p.ej., anomalía de calor, permeabilidad), ii) seleccionar los datos geocientíficos que sirvan como indicadores o *proxies* de estos elementos necesarios, e iii) integrar los datos (*proxies*) según su importancia (Faulds *et al.*, 2016; Lautze *et al.*, 2017; Siler *et al.*, 2017; Shervais *et al.*, 2020; Lindsey *et al.*, 2021; Pauling *et al.*, 2023; Olvera-García *et al.*, 2024, 2025a, 2025b).

El modo de integrar los datos geocientíficos en los PFA puede separarse en *expert-driven* o *data-driven*. En el *expert-driven* se basa en el juicio de los expertos y conocimiento actual sobre los sistemas geotérmicos para determinar la importancia de cada tipología de dato y determinar la potencial área de influencia de estos (p.ej., Lindsey *et al.*, 2021; Olvera-García *et al.*, 2023, 2024). En el *data-driven* se realizan análisis estadístico-espaciales entre la ocurrencia de los recursos probados y los datos utilizados, esto para determinar la importancia de cada tipo de dato (Faulds *et al.*, 2016; Olvera-García *et al.*, 2025a).

Las limitaciones del *data-driven* se refieren a que se necesita una gran cantidad de recursos probados y son pocas las zonas con estas características (Faulds *et al.*, 2016; Olvera-García *et al.*, 2025a). Un ejemplo donde se aplicó exitosamente un PFA *data-driven* en México fue en el campo geotérmico de Los Humeros (Olvera-García *et al.*, 2025a), debido a la gran cantidad de pozos de explotación, los cuales representan recursos probados y, por ende, *training sites*. Estos últimos podrían definirse como los puntos (sites) con los que se puede hacer un análisis espacial de correlación entre los recursos probados y el área que cubren los datos. Esto sirve como ejercicio de entrenamiento (training) o ilustración para determinar qué datos aportan la información más relevante sobre el sistema geotérmico, además de que permiten validar modelos.

En este trabajo, se presentan los resultados de un PFA de tipo *expert-driven* a escala local, realizado en la zona geotérmica localizada dentro del CCA. En este PFA, considerando la anomalía geotérmica identificada en el subsuelo con la información de los pozos profundos, se utilizaron datos que sugieren la presencia de permeabilidad para obtener el modelo de favorabilidad geotérmica (p.ej., Bólos *et al.*, 2022; Canet *et al.*, 2015a; Liotta *et al.*, 2023; Pérez-Zárate *et al.*, 2024; Santos-Raga *et al.*, 2021). Los datos utilizados se integraron con diferentes pesos usando la calculadora ráster en el *software* QGIS® (versión 3.40 LTR) para crear el modelo final de favorabilidad geotérmica.

2. Contexto geológico

Las rocas más antiguas que afloran en la región de Acoculco están conformadas por una secuencia de rocas calizas de edad Cretácica (Figura 1), que forman parte de la Sierra Madre Oriental, y afloran en la región norte, oriente y sureste del CCA (Avellán *et al.*, 2019, 2020). Sobre estas rocas se encuentra una secuencia de flujos de lavas de composición basáltica conocidas como Zacatlán (Avellán *et al.*, 2020). Según su posición estratigráfica, estas rocas de edad Mioceno inferior cubren una gran región al noreste, oriente y sureste del CCA (Figura 1). Sobreyaciendo estas rocas se encuentra un complejo de domos de lava de composición dacítica (Peñuela) con edades entre 13 y 10 Ma (Avellán *et al.*, 2020). Sobreyaciendo estas rocas se encuentra

el CCA, el cual se construyó cronológicamente en cinco fases eruptivas (Figura 1): pre-caldera, *syn*-caldera, *post*-caldera temprana, *post*-caldera tardía y vulcanismo extra-caldera (Avellán *et al.*, 2019, 2020).

El vulcanismo pre-caldera está conformado por domos de lava de composición dacítica y edades entre 4 y 3 Ma (Avellán *et al.*, 2019; 2020). Posteriormente, la erupción que dio origen a la ignimbrita Acoculco ocurrió hace 2.7 Ma, provocando el colapso del techo de la cámara de magma y la formación de una caldera en superficie de 18 × 16 km de diámetro (Figura 1). La erupción formadora de caldera es de composición andesítica y la erupción emitió hasta un volumen total de ignimbrita de 127 km^3 (Avellán *et al.*, 2019, 2020). Posterior a esto, la actividad *post*-caldera temprana se caracterizó por un vulcanismo que se centró al interior de la caldera (Figura 1), produciendo erupciones dominantemente efusivas de flujos y domos de lava de composición traquiandesita-basáltica a basáltica con una edad entre 2.6 y 2.1 Ma (Avellán *et al.*, 2019, 2020). Luego, la actividad *post*-caldera tardía migró a lo largo del anillo de falla de la caldera, emplazando domos, flujos de lava e ignimbritas de composición dominantemente riolítica con edades entre 2 y <0.016 Ma (Avellán *et al.*, 2019, 2020). Finalmente, la actividad volcánica extra-caldera está relacionada a la actividad del vulcanismo distribuido del campo volcánico Apan-Tezontepec (Avellán *et al.*, 2019, 2020). Varias de las erupciones de este campo volcánico se encuentran intercaladas con el vulcanismo asociado a la caldera de Acoculco, y han sucedido desde hace 2.4 Ma hasta < 16 ka (Ref?).

En el área de CCA, las rocas están afectadas por dos sistemas de fallas regionales (NO-SE, NE-SO) y otro menor encontrado solo en el interior de la caldera (E-O) (Figura 1). El sistema de fallas de rumbo NO-SE contiene estructuras regionales como los ejes de pliegues y las fallas de cabalgadura de la orogenia Laramide en la Sierra Madre Oriental (Lermo *et al.*, 2009; Rocha *et al.*, 2006; Suter, 1984). Este sistema estuvo activo desde mediados hasta finales del Mioceno, y comprende fallas de tipo

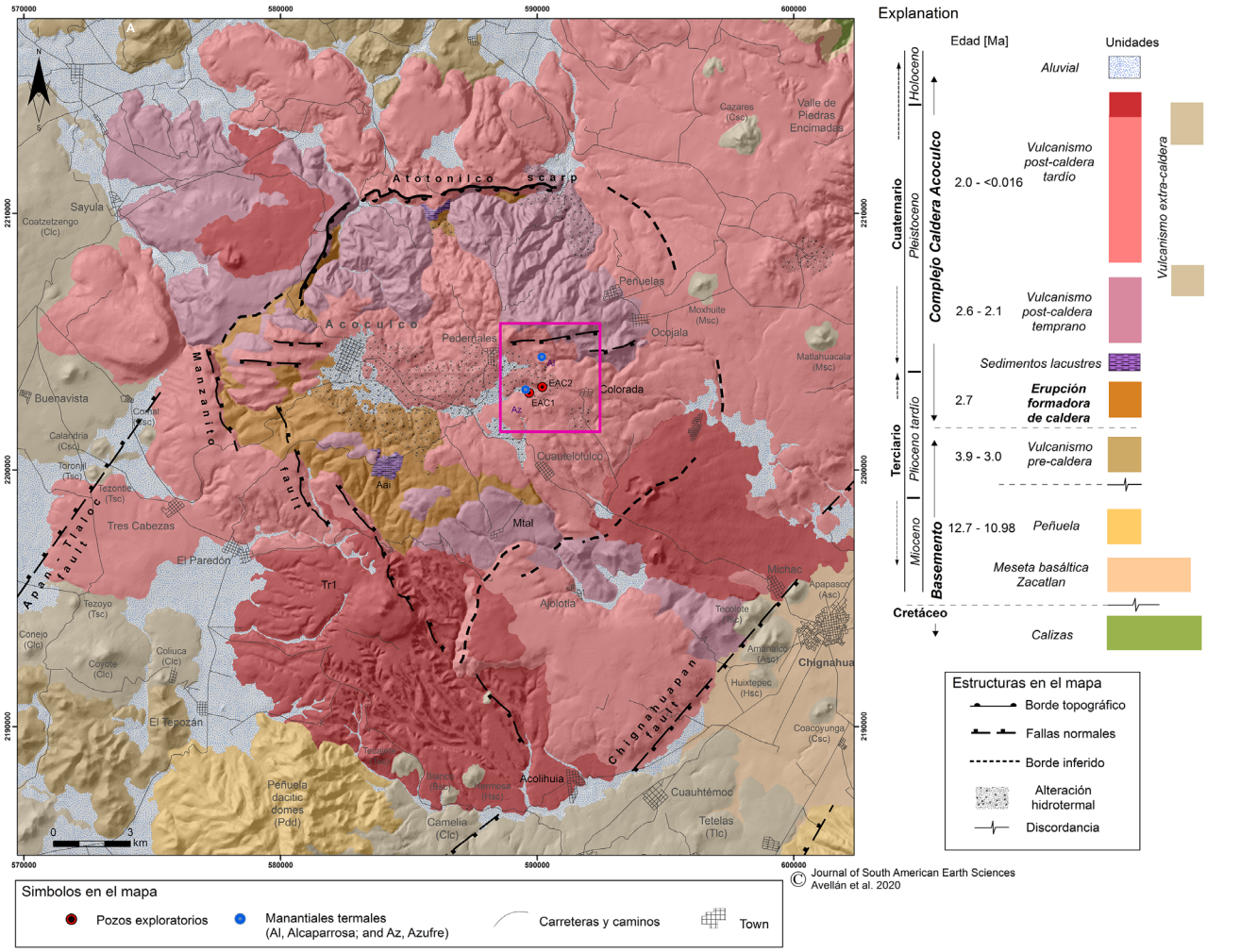

Figura 1. Mapa geológico simplificado del Complejo Caldera de Acoculco, modificado de Avellán *et al.* (2020). El rectángulo color rojo representa la extensión y ubicación del área de estudio.

normales con rumbo NO-SE y fallas de rumbo lateral derecho que son sincrónicas con el vulcanismo regional (Andreani *et al.*, 2008). Las fallas de rumbo NE-SO pertenecen al sistema de fallas Apan-Tenochtitlan y han estado activas desde el Mioceno hasta la actualidad (García-Palomo y Macías, 2000; García-Palomo *et al.*, 2002, 2018). Este sistema está constituido por fallas normales con componente lateral izquierda, las cuales presentan dos generaciones de estrías (*ca.* 30 y 80°) (García-Palomo *et al.*, 2018; Avellán *et al.*, 2020). En cuanto a los sistemas de fallas con rumbo E-O, están representadas por al menos 10 segmentos de fallas normales con rumbo E-O (*ca.* N085°) y buzamiento hacia el S (Avellán *et al.*, 2020). Solo se observan dentro del CCA, afectando principalmente el vulcanismo *post*-caldera en la parte central (Avellán *et al.*, 2020).

3. Descripción de datos utilizados

Los datos geocientíficos que se utilizaron en este PFA fueron obtenidos de trabajos previos. En esta sección se justifica el uso de cada dato en este trabajo, se describen sus características y se presenta la fuente bibliográfica. Los datos utilizados fueron fallas geológicas, flujo de CO_2, manantiales, temperatura del suelo, depósitos de ópalo y cráteres de erupciones hidrotermales (Tabla 1).

Se han clasificado estos grupos de datos en elementos geotérmicos activos y elementos geotérmicos fósiles. Donde los elementos activos son las fallas geológicas, el flujo de CO_2, manantiales y la temperatura del suelo. Mientras que los elementos fósiles son los depósitos de ópalo y cráteres de erupciones hidrotermales.

3.1. *Elementos geotérmicos activos*

3.1.1. Fallas

En este estudio, se consideraron las fallas como indicador de permeabilidad por su estrecha relación con los sistemas geotérmicos convectivos (Barton *et al.*, 1997; Brogi *et al.*, 2005; Curewitz and Karson, 1997; Faulds *et al.*, 2004; Faulkner *et al.*, 2010; Olvera-García *et al.*, 2020a; Rowland y Sibson, 2004). Además, por la presencia de estas en la zona de estudio y la relación que presentan con los elementos hidrotermales activos y fósiles.

En el área se han identificado dos sistemas de fallas principales (Bólos *et al.*, 2022; Liotta *et al.*, 2023), los cuales se consideran contemporáneos y potencialmente activos (Liotta *et al.*, 2023): un sistema de fallas con rumbo NO-SE y otro con rumbo NE-SO (Figura 2a) (Calcagno *et al.*, 2022; Liotta *et al.*, 2023). El sistema NO-SE presenta dos movimientos superpuestos: una primera fase con movimiento de cinemática lateral a oblicuo. Seguido por una segunda fase dominada por una componente normal (Liotta *et al.*, 2023). El sistema NE-SO muestra un movimiento normal dominante.

En la zona también se ha identificado actividad sísmica local a partir de una red local que operó el consorcio GEMex durante un año (Esquivel-Mendiola *et al.*, 2022; Perton *et al.*, 2022; Maldonado-Hernández, 2025). Particularmente, en la zona de estudio se localizó un sismo que ocurrió el 18 de septiembre del 2018 con una profundidad de 3.2 km (Figura 2a). El mecanismo focal del sismo fue determinado a partir de análisis de polaridades de primeros arribos de la onda P, el cual, presentó soluciones de strike, dip, slip de 120.00°/ 61.00°/ 28.00° para el primer plano auxiliar y de 15.55°/ 65.76°/ 147.8° para el segundo plano (Figura 2a). La primera solución se puede asociar al sistema de fallas lateral (de lateral a oblicuo) de dirección NO-SE.

3.1.2. Flujo de CO_2

Valores elevados de CO_2, relacionados con sistemas geotérmicos y/o magmáticos, se relacionan con canales permeables en la corteza superior que permiten el ascenso de gases profundos hasta la superficie (p.ej., Jentsch *et al.*, 2020; Pérez-Martínez *et al.*, 2021). Por este motivo, los datos de CO_2 se usan en este análisis como *proxies* de permeabilidad.

Tabla 1. Datos utilizados en este análisis (Bólos *et al.*, 2022; Canet *et al.*, 2015a; Liotta *et al.*, 2023; Pérez-Zárate *et al.*, 2024; Santos-Raga *et al.*, 2021). Para cada dato se indica también el búfer y el peso correspondientes, determinados mediante criterio de expertos.

Dato	Tamaño de búfer	Peso utilizado
Fallas	140	1
Flujo de CO_2	70	1
Manantiales	70	1
Temperatura del suelo	140	1
Depósitos de ópalo	140	0.5
Cráteres de erupciones hidrotermales	140	0.5

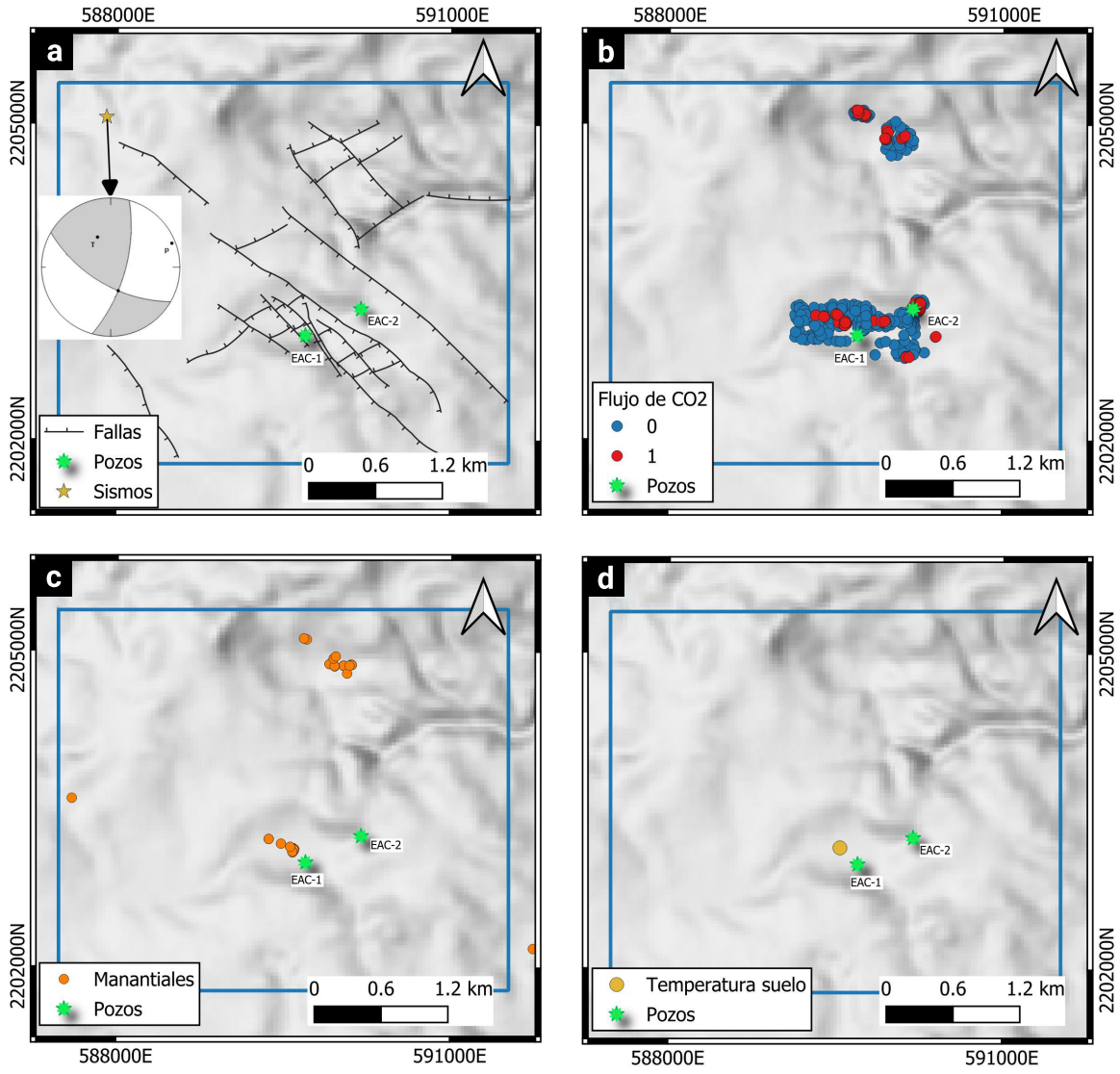

Figura 2. Localización de parte de los datos utilizados en este trabajo. a) Distribución de las fallas y localización de un evento sísmico; b) distribución de los datos de flujo de CO_2, donde los que se presentan en rojo (1) presentan valores superiores a 29 g m^{-2} d^{-1}, mientras que los azules presentan valores inferiores (0). Los valores de 1 y 0 son los pesos que usarán para la creación del modelo de favorabilidad; c) distribución de los manantiales; d) ubicación de la zona con temperaturas anómalas del suelo. El rectángulo azul representa el área de estudio.

Los datos de flujo de CO_2 utilizados en este trabajo fueron obtenidos y publicados por Pérez-Zárate *et al.* (2024). En dicho estudio, se documenta la medición del flujo de CO_2 utilizando el método de cámara de acumulación de gases con detector infrarrojo, los cuales fueron medidos en más de 1,200 puntos en la superficie del suelo en seis diferentes áreas de la CCA. Los valores de flujo de CO_2 variaron desde 1 hasta 26,000 g m^{-2} d^{-1}, mientras que los flujos con valores <29 g m^{-2} d^{-1} se establecieron como la línea base de desgasificación (Pérez-Zárate *et al.*, 2024). En este trabajo se emplean los datos correspondientes a las áreas donde Pérez-Zárate *et al.* (2024) identificaron valores anómalos, localizadas en la parte central y norte del CCA (Figura 2b).

3.1.3. Manantiales

Los manantiales se forman cuando fluidos del subsuelo encuentran zonas permeables que les permiten ascender a la superficie (p.ej., Keegan-Treloar *et al.*, 2022). Normalmente, estas zonas permeables pueden estar asociadas con estructuras geológicas (p.ej., fallas, fracturas, contactos litológicos). Por este motivo, en este trabajo se utilizan los manantiales como *proxies* de permeabilidad (e.g., Lindsey *et al.*, 2021; Olvera-García *et al.*, 2023).

Dentro de la zona de estudio, Santos-Raga *et al.* (2021) identificaron 54 manantiales (Figura 2c), los cuales se usan en

este análisis. La información sobre estos manantiales como; coordenadas geográficas, altitud, temperatura, pH, entre otras, se encuentra en la Tabla 1 del artículo mencionado. Estos manantiales presentan temperaturas que van desde los 9.8 hasta los 26.1 °C (la temperatura media anual es de 12.7 °C). Por otro lado, el pH de los manantiales va desde muy ácido hasta ligeramente alcalino (p.ej., Botero-Gómez *et al.*, 2025), con valores que van desde 1.62 hasta 8.85.

3.1.4. Temperatura del suelo

Las temperaturas termales anómalas del suelo pueden ser indicadores de canales permeables que permiten que flujos hidrotermales convectivos calienten el mismo. Por este motivo, los datos de temperaturas anómalas del suelo se utilizaron en este trabajo como indicadores de permeabilidad.

Bolós *et al.* (2022) realizaron varias mediciones de temperatura del suelo en diferentes puntos en el área de estudio, utilizando un termómetro digital con una sensibilidad de 0.1 °C. Cada medición se llevó a cabo a una profundidad de 30 cm ± 1 cm. Las temperaturas anómalas sólo se detectaron en la parte central de la zona de estudio, registrando un máximo de 34 °C (Figura 2d).

3.2. *Elementos geotérmicos fósiles*

3.2.1. Depósitos de ópalos

En Acoculco existen rocas alteradas hidrotermalmente y depósitos minerales expuestos en la superficie. El ópalo es un mineraloide amorfo de sílice hidratada ($SiO_2 \cdot nH_2O$) que presenta una estructura parcialmente cristalina (Curtis *et al.*, 2019; Olvera-García *et al.*, 2020b, 2020c). El ópalo presente en zonas alteradas hidrotermalmente es de origen hidrotermal. El ópalo de origen hidrotermal se deposita en conductos permeables o cerca de ellos, y por este motivo se utiliza como un indicador de permeabilidad en este trabajo.

Canet *et al.* (2015b) realizaron estudios de espectroscopía de reflectancia en las rocas alteradas dentro del CCA, identificando que el ópalo es el mineral hidrotermal más abundante en la zona de estudio. En este trabajo se utilizó la localización de 18 puntos dentro de la zona de estudio donde Canet *et al.* (2015b) identificaron los depósitos de ópalo (Figura 3a). La localización de los depósitos de ópalo en algunos casos coincide con la de depósitos de sínter de sílice identificados en la zona por Liotta *et al.* (2023). El sínter de sílice es una roca sedimentaria química compuesta de ópalo y que se forma a partir de manantiales termales. La distinción que se hace en este trabajo entre el ópalo y el sínter se debe a que el sínter se forma exclusivamente en la superficie terrestre, ligada a manantiales termales, mientras que el ópalo puede depositarse en el subsuelo. En el caso de Acoculco, este último se encontró mayormente en rocas exhumadas.

3.2.2. Cráteres de erupciones hidrotermales

Las erupciones hidrotermales son eventos explosivos que eyectan material sólido (al menos en parte) y cuya energía proviene exclusivamente de la pérdida de calor y las transiciones de fase en un sistema convectivo (hidrotermal), dominado por agua caliente o vapor de agua (Browne y Lawless, 2001; Montanaro *et*

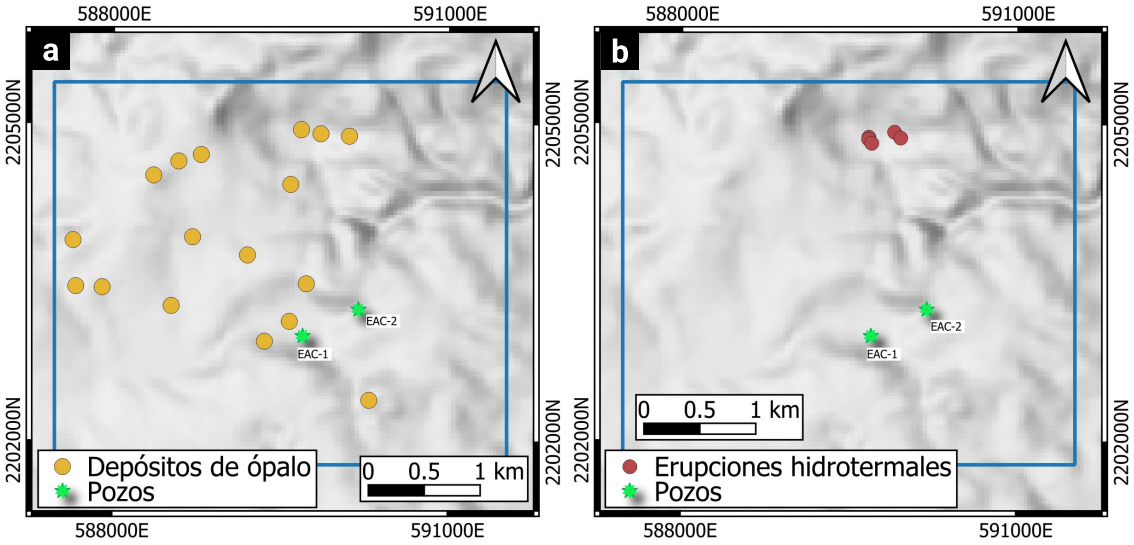

Figura 3. Mapas que muestran la localización de parte de los datos utilizados en este trabajo; a) depósitos de ópalo; b) cráteres de erupciones hidrotermales. El rectángulo azul representa el área de estudio.

al., 2022). Los cráteres de erupciones hidrotermales son comunes en muchos sistemas geotérmicos convectivos y por su relación con los fluidos hidrotermales profundos se consideran un *proxy* de permeabilidad en este trabajo.

Canet *et al.* (2015a) identificaron cráteres de erupciones hidrotermales en Acoculco. Los cráteres identificados en Acoculco son seis y se encuentran exclusivamente en la parte norte de la zona de estudio, muy cercanos entre sí, formando un clúster (Figura 3b). Los cráteres identificados se formaron durante el Holoceno, con edades absolutas determinadas por datación de Carbono 14 que oscilan entre ~5,000 y ~500 años antes del presente (Canet *et al.*, 2015a).

4. Metodología

Este PFA aplicado a la zona geotérmica de Acoculco cubre un área de 200 km^2 y, debido a la falta de datos de recursos probados (p.ej., pozos de explotación), está basado en el criterio de expertos (*expert-driven*). Este PFA se puede separar en tres etapas: 4.1. recopilación de datos, 4.2. procesamiento individual de datos y 4.3. integración y modelo final. Estas etapas se describen a continuación.

4.1. *Recopilación de datos*

A partir de información publicada previamente, se seleccionaron datos que pudieran servir como *proxies* para este análisis. Se creó un polígono rectangular para definir el tamaño y los límites del área de estudio basados en la distribución de los elementos hidrotermales activos.

4.2. *Procesamiento individual de datos*

En la segunda etapa, dado que todos los conjuntos de datos consisten en puntos y líneas, se determinó la distancia de los búferes para los datos originales. Los búferes representan las potenciales áreas de influencia de los datos (e.g., Olvera-García *et al.*, 2023). Posteriormente, se transformaron los archivos de forma (*shapefiles*) en archivos ráster, los cuales representan las capas de evidencia. Se generaron los archivos ráster con un tamaño de celda de 10×10 m, asignando un valor de 1 a los elementos del *shapefile* (p.ej., fallas) y 0 a las áreas sin datos. Para el tamaño de celda, se consideró menor que los valores de búfer, con el fin de obtener buena resolución y evitar un aspecto pixelado.

Este procedimiento de la etapa 2 se explica con detalle para cada dato.

4.2.1. Fallas

Para las fallas, inicialmente se creó un búfer de 140 m de radio para las líneas que representan las fallas. Posteriormente, las fallas con el búfer se convirtieron en un archivo ráster (capa de evidencia) asignando un peso de 1 a la zona de las fallas con el búfer y 0 al resto del área (Figura 4a).

Para las fallas, temperatura del suelo, depósitos de ópalo y cráteres de erupciones hidrotermales se usaron 140 m de búfer porque corresponde a la distancia mínima registrada entre un pozo productor y uno no productor en el campo geotérmico de Los Humeros (p.ej., Jentsch *et al.*, 2020). Este valor se optó bajo el razonamiento de que representa la distancia mínima conocida a partir de la cual ya no se tienen recursos explotables (pozo no productor) respecto de un pozo productor. Se usó como referencia para este trabajo el campo geotérmico de Los Humeros, ya que se encuentra en un ambiente tectónico, geológico y estructural similar al de la zona de estudio, además de que Los Humeros dispone de una gran cantidad de datos de pozos.

4.2.2. Flujo de CO_2

Para el flujo de CO_2, se determinaron los valores límite a partir de los cuales los valores superiores se podrían considerar anómalos; para esto se utilizó el valor de 29 $g\,m^{-2}\,d^{-1}$ estimado por Pérez-Zárate *et al.* (2024) como valor de fondo. Después, se creó un búfer de 70 m de radio para cada medición de CO_2. Posteriormente, los puntos de CO_2 con el búfer se convirtieron en archivo ráster (capa de evidencia). Consecutivamente, con la calculadora ráster se asignó un peso de 1 a los puntos con el búfer con valores >29 $g\,m^{-2}\,d^{-1}$ (porque se consideran anomalía) y 0 a los puntos con valores inferiores al valor de fondo y al resto del área (Figura 4b).

Se utilizó como radio para el búfer el valor de 70 m que representa la mitad de la distancia mínima registrada entre un pozo productor y uno no productor en el campo geotérmico de Los Humeros. Se utilizó solo la mitad de dicho valor debido a la alta densidad de puntos en algunas zonas de esta capa de datos.

4.2.3. Manantiales

Para los manantiales, se creó un búfer de 70 m de radio para los puntos que representan manantiales debido a la gran densidad de datos en algunas zonas. Posteriormente, los manantiales con el búfer se convirtieron en archivo ráster (capa de evidencia) asignando un peso de 1 a cada manantial con el búfer y 0 al resto del área (Figura 4c).

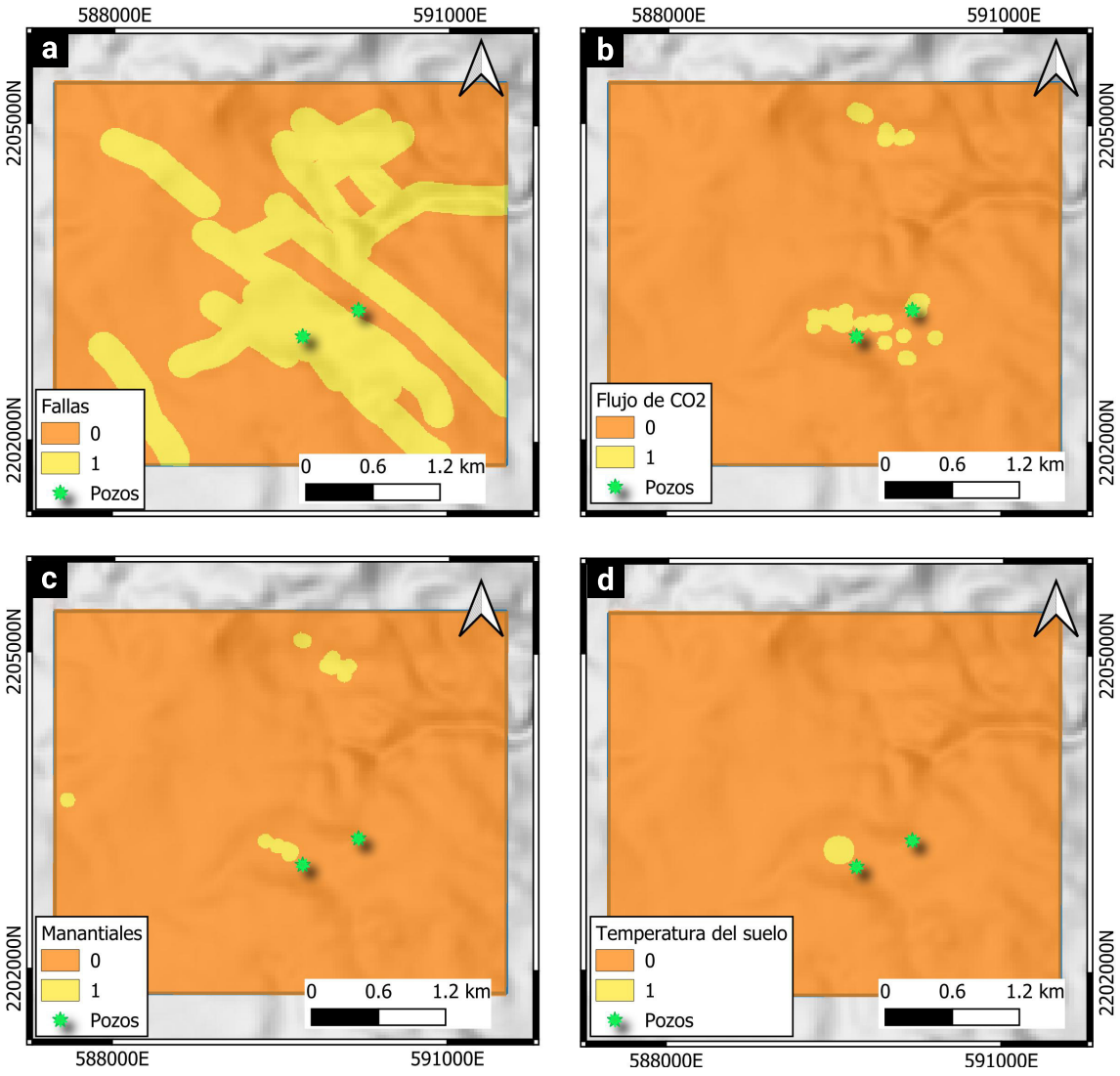

Figura 4. Capas de evidencia de parte de los datos utilizados en este trabajo; a) fallas; b) flujo de CO_2; c) manantiales; d) temperatura del suelo.

4.2.4. Temperatura del suelo

Para la temperatura del suelo, primero se creó el búfer para el punto que representa una anomalía en el área de estudio. Posteriormente, la temperatura con el búfer se convirtió en archivo ráster (capa de evidencia) asignando un peso de 1 a la zona de temperatura con el búfer y 0 al resto del área (Figura 4d).

4.2.5. Depósitos de ópalo

Para los depósitos de ópalo, primero se creó el búfer para cada punto que representa la ubicación de los depósitos de ópalo. Posteriormente, el *shapefile* con los puntos y el búfer se convirtió en archivo ráster (capa de evidencia) asignando un peso de 1 a los puntos con el búfer y 0 al resto del área (Figura 5a).

4.2.6. Cráteres de erupciones hidrotermales

Para los cráteres de erupciones hidrotermales, primero se creó el búfer para cada punto que representa la ubicación de los cráteres de erupciones hidrotermales. Posteriormente, el *shapefile* con los puntos y el búfer se convirtió en un archivo ráster (capa de evidencia) asignando un peso de 1 a los puntos con el búfer y 0 al resto del área (Figura 5b).

4.2.7. Integración y modelo final

Finalmente, en la tercera y última etapa se creó el modelo de favorabilidad geotérmica. Este modelo se creó a través de una suma ponderada de los *proxies* de permeabilidad usados, seguida de la normalización a 1. Para la suma ponderada se asignó un

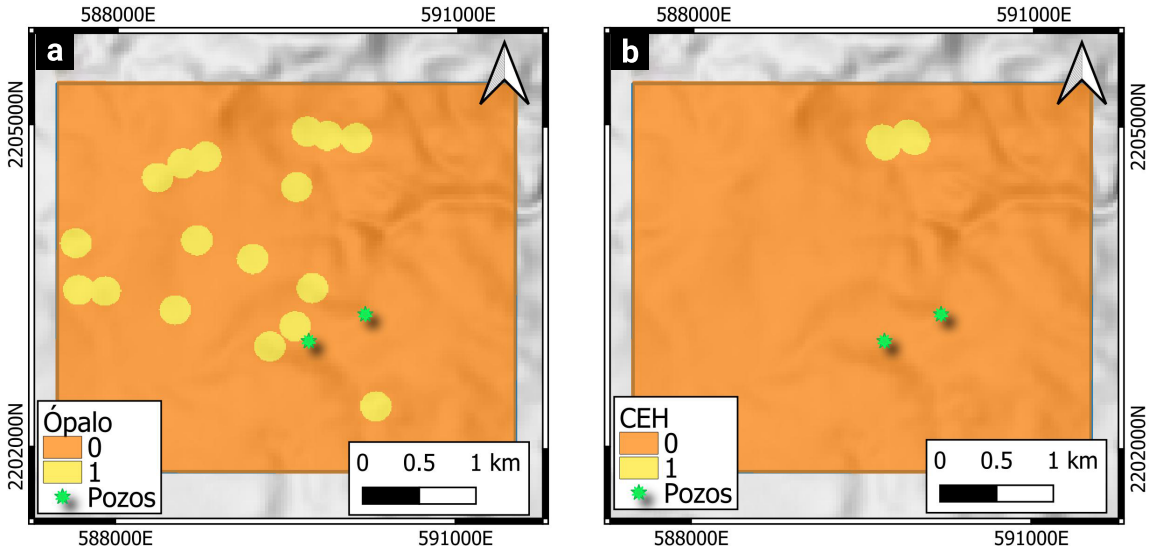

Figura 5. Capas de evidencia de parte de los datos utilizados en este trabajo; a) depósitos de ópalo; b) cráteres de erupciones hidrotermales (CEH).

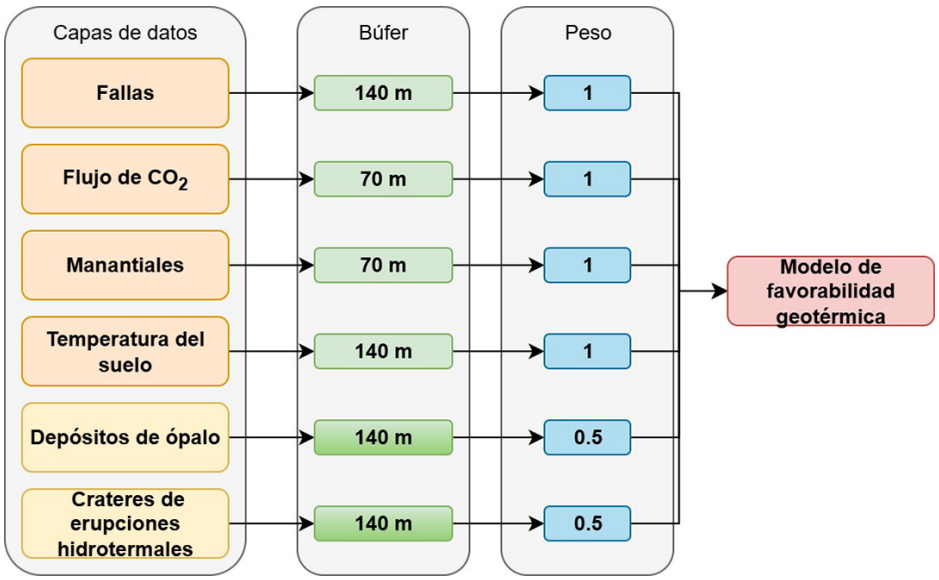

Figura 6. Diagrama de flujo con la metodología de integración de los datos usados.

peso de 1 a los elementos geotérmicos activos, de 0.5 a los elementos geotérmicos fósiles (Figura 6) y de cero a las zonas que se considera que no tienen anomalías, así como para el resto del área sin datos. Para la normalización a 1, se dividieron los resultados de la suma entre el número de elementos sumados. Para dicho procedimiento se utilizó la calculadora ráster en QGIS®.

5. Resultados

Los resultados de este trabajo son las capas de evidencia para cada dato y el modelo de favorabilidad geotérmica. Las capas de evidencia se crearon a partir de cada dato, determinando anomalías para algunos datos y creando una potencial área de influencia para estos (Figura 4 y 5). El área de influencia para los datos fue basada en expertos y el conocimiento actual sobre los sistemas geotérmicos. Las capas de evidencia muestran las zonas con potenciales efectos positivos en la permeabilidad (Figura 4 y 5) y, por ende, en el modelo final de favorabilidad geotérmica.

Las capas de evidencia se separan en capas de elementos geotérmicos activos y elementos geotérmicos fósiles. Las capas

de elementos activos incluyen datos que evidencian procesos hidrotermales o tectónicos actuales, tales como manantiales, flujo de CO_2, fallas del Holoceno y temperaturas anómalas del suelo, lo que indica que, si el sistema existe, se encuentra en funcionamiento. Las capas de elementos fósiles incluyen evidencias de actividad geotérmica pasada pero geológicamente reciente (Holoceno), como son cráteres de erupciones hidrotermales y depósitos de ópalo. Esto indica que el sistema estuvo activo en el pasado reciente y podría seguir activo en la actualidad (p.ej., Campbell *et al.*, 2015).

Las capas de evidencia se integraron con diferentes pesos (Figura 6) para crear el modelo de favorabilidad geotérmica. El modelo de favorabilidad geotérmica obtenido para la zona de estudio muestra dos áreas discretas y aisladas entre sí con la mayor favorabilidad geotérmica (Figura 7). Estas zonas con mayor favorabilidad geotérmica se encuentran ubicadas en la parte central y norte del área de estudio, al noroeste del pozo de exploración EAC-1 y en la zona de Alcaparrosa, y se encuentran representadas por las letras A y B en la Figura 7. Estas zonas representarían las zonas con mayor potencial de alojar fluidos hidrotermales en el subsuelo.

6. Discusión

Los componentes necesarios para la formación de un sistema geotérmico convectivo son una anomalía de calor, la permeabilidad y la presencia de fluidos (Moeck, 2014; Jolie *et al.*, 2021). En Acoculco se sabe de la existencia de una anomalía de calor (López-Hernández *et al.*, 2009). Asimismo, se asume

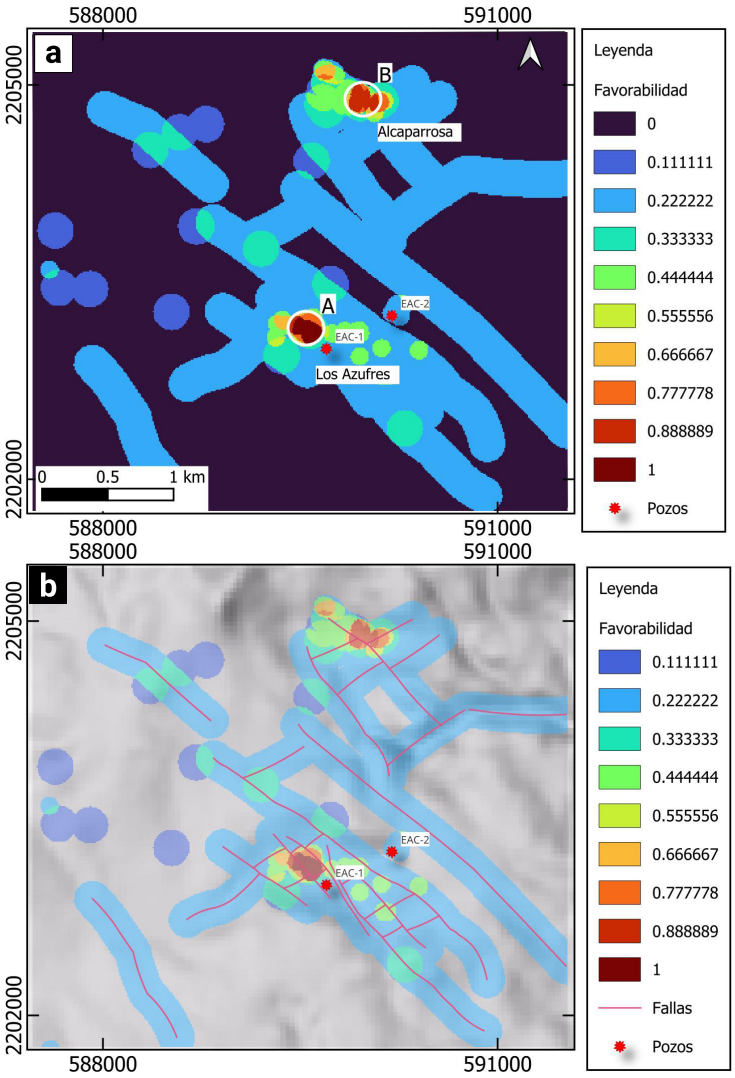

Figura 7. a) Modelo de favorabilidad geotérmica. A y B representan anomalías identificadas. Los colores rojizos representan mayor favorabilidad; b) Modelo de favorabilidad geotérmica de la zona. Se muestran las fallas y pozos para referencia espacial.

que existe disponibilidad de fluidos por la elevada tasa anual de lluvia (entre 1,000 y >2,000 mm); de hecho, la tasa de lluvia en Acoculco es muy superior a la de Los Humeros, el cual tiene más de 35 años en operación. Cabe mencionar que >90% de los fluidos explotados en los campos geotérmicos convencionales son de origen meteórico (Truesdell y Hulston, 1980; Sillitoe y Brogi, 2021). Por último, hasta ahora la permeabilidad en Acoculco se considera inexistente. Sin embargo, en este trabajo se sugiere que podría existir permeabilidad en la zona debido a: 1) la actividad reciente de las fallas (Holoceno), las cuales son consideradas activas por Liotta *et al.* (2023), sugiere que estas presentan potencial para actuar como conductos permeables para la circulación de fluidos. 2) Existe actividad tectónica local en el área representada por sismos (la actividad tectónica es la que mantiene la permeabilidad en las zonas geotérmicas). 3) Se identificaron sismitas del Holoceno en el área de estudio (Liotta *et al.*, 2023). 4) Los cráteres de erupciones hidrotermales y el sínter están asociados a sistemas geotérmicos convectivos (lo implica la presencia de permeabilidad), y los identificados en la zona han ocurrido en el Holoceno (último hace ~500 años). 5) Los manantiales y los elevados valores de flujos de CO_2 se ubican en zonas con permeabilidad. Todo lo anterior apoya la posible existencia de permeabilidad localizada.

En este sentido, este PFA incluye solamente datos geocientíficos que sugieren la presencia de permeabilidad para determinar el modelo de favorabilidad geotérmica. Este enfoque es similar al realizado por Faulds *et al.* (2016), aunque dicho trabajo es a escala regional. En el trabajo de Faulds *et al.* (2016) se utilizaron principalmente *proxies* de permeabilidad para determinar el modelo de favorabilidad geotérmica en el centro de Nevada (EUA), ya que consideran que el calor está ampliamente distribuido en la región y no es una limitante para la formación de sistemas geotérmicos. Por la anomalía geotérmica encontrada en Acoculco mediante los pozos profundos, también se considera que el calor no sería una limitante para la formación de un sistema geotérmico convectivo en Acoculco. Ya que en caso de que existiese permeabilidad, esta permitiría que los fluidos meteóricos se filtren, se calienten y formen el sistema geotérmico.

El modelo de favorabilidad geotérmica evidencia las zonas donde se encuentra la sobreposición de la mayor cantidad de datos considerados como *proxies* para la permeabilidad (Figura 7). Lo que sugiere las zonas, con base en la disponibilidad de datos, con mayor potencial para alojar fluidos geotérmicos en el subsuelo en caso de que existan (p.ej., Lindsey *et al.*, 2021). El modelo de favorabilidad geotérmica de la zona de estudio muestra dos zonas principales de favorabilidad. Dichas zonas con favorabilidad se encuentran localizadas a aproximadamente 200 m al noroeste del pozo EAC-1 y en la zona de Alcaparrosa (Figura 7).

Por otra parte, debido a la anomalía geotérmica, la edad reciente de los elementos hidrotermales fósiles (Holoceno), el origen de los mismos elementos fósiles (convectivo), la actividad geotérmica actual (p.ej., manantiales, flujo de CO_2, temperaturas del suelo), y la actividad tectónica activa, se considera que en la zona podría existir un sistema geotérmico activo de tipo convectivo. Sin embargo, este presenta escasas y tenues manifestaciones hidrotermales en la superficie debido a; 1) el sistema en este momento se encuentra sellado en la parte superior del sistema por la mineralización y alteración intrínseca a los sistemas convectivos (p.ej., ejerciendo de capa sello, pero ligada a mineralización y alteración). Esta alteración y mineralización se observó en los pozos exploratorios (López-Hernández *et al.*, 2009); 2) es un sistema geotérmico ciego (*blind geothermal system*); o 3) es un sistema de tipo *Kaipohan*. Este último se puede definir como sistemas geotérmicos sin manantiales termales pero que se identifica por su alteración hidrotermal intensa y emisiones difusas y frías de gases activos (Bogie *et al.*, 1987). Estos últimos tres puntos se desarrollan con más precisión en los siguientes párrafos.

1) El sellado de las fracturas en la parte superior del sistema es un fenómeno común y se genera debido a que los fluidos geotérmicos son muy salinos y tienden a depositar los minerales en la parte superior del sistema a causa del descenso de la temperatura, sellando los conductos (Cox *et al.*, 2001; Liotta *et al.*, 2010). 2) Los sistemas geotérmicos ciegos se pueden formar debido a que las fallas que controlan los sistemas comúnmente forman cuencas sedimentarias que permiten la acumulación de sedimentos arcillosos en la superficie que sirven de capa sello (p.ej., Craig *et al.*, 2021), lo cual evita que estos tengan una clara y ampliamente distribuida área con manifestaciones hidrotermales (p.ej., Rea-Downing *et al.*, 2026; Zheng *et al.*, 2026). Esto podría estar ocurriendo en Acoculco con los sedimentos lacustres encontrados en los alrededores del pozo EAC-1 (López-Hernández *et al.*, 2009; Liotta *et al.*, 2023).

3) La zona geotérmica de Acoculco presenta características similares a los sistemas de tipo *Kaipohan* (Bogie *et al.*, 1987; Prol-Ledesma *et al.*, 2025), como ha sido previamente propuesto por otros autores (López-Hernández *et al.*, 2009; Peiffer *et al.*, 2014). Estos sistemas se encuentran en zonas de alto relieve, se caracterizan por significativas emisiones frías de gases (dominadas por CO_2) y la presencia de alteración argílica (Bogie *et al.*, 1987). Acoculco cumple con estos criterios de manera notable: i) está situado a una elevación de ~2900 msnm, ii) registra un importante flujo de CO_2 (Bólos *et al.*, 2022; Pérez-Zárate *et al.*, 2024) y iii) exhibe alteración argílica (Canet *et al.*, 2015b).

La migración vertical de fluidos de Acoculco, evidenciada por los elementos hidrotermales en superficie, estaría sujeta al proceso clásico de sellamiento periódico de los conductos

permeables por precipitación de minerales y la alteración hidrotermal (aunado a que los sedimentos lacustres también actúan como capa sello). Dicho sellamiento es contrarrestado ocasionalmente por la actividad tectónica. Adicionalmente, el relieve topográfico favorecería una significativa migración lateral de fluidos a lo largo de estructuras y otros niveles permeables. De hecho, las descargas termales más notables, como los manantiales de Chignahuapan (hasta 49 °C; López-Hernández *et al.*, 2009; Santos-Raga *et al.*, 2021), Agua Salada y Madroño (Prol-Ledesma *et al.*, 2025), se localizan en la periferia de la caldera, a elevaciones menores (ver Figura 1), lo que respalda este modelo de flujo lateral más que vertical. La elevación a la que se encuentra la actividad hidrotermal en el centro de la caldera es de 2840 msnm, la elevación de Agua Salada y Madroño es de aproximadamente 2400 msnm, mientras que la de Chignahuapan es de 2290 msnm.

Finalmente, las zonas con mayor favorabilidad para alojar fluidos geotérmicos en el subsuelo serían las zonas con mayor favorabilidad identificadas en el modelo de este trabajo (Figura 7). De hecho, mediante un pozo exploratorio somero (132 m), donde se midió la temperatura a diferentes profundidades, se determinó que la zona de Alcaparrosa presenta temperaturas anómalas a profundidad con características convectivas (Prol-Ledesma *et al.*, 2025), lo cual da importante sustento a los resultados de este trabajo. El perfil de temperatura en pozos con características convectivas se caracteriza por presentar valores superiores al gradiente geotérmico medio (30 °C/km) y, a partir de cierta profundidad, tiende a estabilizarse, manteniendo la temperatura constante.

7. Conclusiones

El modelo de favorabilidad geotérmica de la zona de Acoculco muestra dos zonas principales, localizadas a aproximadamente 200 m al noroeste del pozo exploratorio EAC-1 y en la zona de Alcaparrosa (Figura 7). Si existiese un sistema hidrotermal activo en Acoculco, las zonas con mayor favorabilidad para alojar fluidos geotérmicos en el subsuelo serían las zonas identificadas en este trabajo con mayor favorabilidad geotérmica. En este sentido, se considera que, debido a la anomalía geotérmica existente, la edad reciente y el origen convectivo de los elementos hidrotermales fósiles, así como por la actividad hidrotermal actual y la actividad tectónica activa, en la zona de Acoculco podría existir un sistema geotérmico activo de tipo convectivo. La zona geotérmica de Acoculco debe continuar siendo explorada como un sistema convencional. Finalmente, para confirmar el potencial de las áreas favorables y continuar la exploración, se recomienda la perforación de pozos exploratorios de tipo TGH (*Temperature Gradient Holes*) dentro de las zonas con favorabilidad obtenidas en este trabajo.

8. Referencias

Andreani, L., Rangin, C., Martínez-Reyes, J., Le Roy, C., Aranda-García, M., Le Pichon, X., & Peterson-Rodriguez, R. (2008). The Neogene Veracruz fault: evidences for left-lateral slip along the southern Mexico block. Bulletin de la Société Géologique de France, 179 (2), 195–208. **https://doi.org/10.2113/gssgfbull.179.2.195**

Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Cisneros, G., Sánchez-Núñez, J. M., Gómez-Vasconcelos, M. G., Pola, A., Sosa-Ceballos, G., García-Tenorio, F., Reyes Agustín, G., Osorio-Ocampo, S., García-Sánchez, L., Mendiola, I. F., Marti, J., López-Loera, H., & Benowitz, J. (2018). Geology of the late Pliocene – Pleistocene Acoculco caldera complex, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México). *Journal of Maps*, 14 (2), 1–11. **https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1531075**

Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G., Gómez-Vasconcelos, M. G., Cisneros-Máximo, G., Sánchez-Núñez, J. M., Martí, J., García-Tenorio, F., López-Loera, H., Pola, A., & Benowitz, J. (2020). Eruptive chronology of the Acoculco caldera complex - A resurgent caldera in the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México). *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102482. **https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102412**

Barton, C. A., Hickman, S., Morin, R. H., Zoback, M. D., Finkbeiner, T., Sass, J., & Benoit, D. (1997). *Fracture permeability and its relationship to in-situ stress in the Dixie Valley, Nevada, geothermal reservoir* [Conference presentation]. Proceedings of the 22nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, CA, United States.

Bogie, I., Lawless, J. V., & Pornuevo, J. B. (1987). Kaipohan: an apparently nonthermal manifestation of hydrothermal systems in the Philippines. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31 (3-4), 281–292. **https://doi.org/10.1016/0377-0273(87)90072-2**

Bolós, X., Del Ángel, V., Villanueva-Estrada, R. E., Sosa-Ceballos, G., Boijseauneau-López, M., Méndez, V., & Macías, J. L. (2022). Surface hydrothermal activity controlled by the active structural system in the self-sealing geothermal field of Acoculco (Mexico). *Geothermics*, 101, 102372. **https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102372**

Botero-Gómez, L. A., Murcia, H., Sánchez, J. J., Gómez-Vasconcelos, M. G., & López-Palacio, J. (2025). Métodos de exploración y sistemas geotérmicos en Colombia con énfasis en el volcán Nevado del Ruiz, proyecto geotérmico Valle de Nereidas. *Boletín de Geología*, *47*(1), 63-91. **https://doi.org/10.18273/revbol.v47n1-2025003**

Brogi, A., Capezzuoli, E., Moretti, M., Olvera-García, E., Matera, P. F., Garduno-Monroy, V. H., & Mancini, A. (2018). Earthquake-triggered soft-sediment deformation structures (seismites) in travertine deposits. *Tectonophysics*, 745, 349–365. **https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.08.021**

Brogi, A., Lazzarotto, A., Liotta, D., Ranalli, G., & CROP18 Working Group. (2005). Crustal structures in the geothermal areas of southern Tuscany (Italy): insights from the CROP 18 deep seismic reflection lines. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148 (1-2), 60–80. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.03.014

Browne, P. R. L., & Lawless, J. V. (2001). Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere. *Earth-Science Reviews*, 52 (4), 299–331. https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00030-1

Calcagno, P., Trumpy, E., Gutiérrez-Negrín, L. C., & Liotta, D. (2022). A collection of 3D geomodels of the Los Humeros and Acoculco geothermal systems (Mexico). *Scientific Data*, 9 (1), 280. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01327-0

Campbell, K. A., Guido, D. M., Gautret, P., Foucher, F., Ramboz, C., & Westall, F. (2015). Geyserite in hot-spring siliceous sinter: Window on Earth's hottest terrestrial (paleo) environment and its extreme life. *Earth-Science Reviews*, 148, 44–64. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.009

Canet, C., Hernández-Cruz, B., Jiménez-Franco, A., Pi, T., Peláez, B., Villanueva-Estrada, R. E., & Salinas, S. (2015b). Combining ammonium mapping and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy to constrain a model of hydrothermal alteration for the Acoculco geothermal zone, Eastern Mexico. *Geothermics*, 53, 154–165. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.05.012

Canet, C., Trillaud, F., Prol-Ledesma, R. M., González-Hernández, G., Peláez, B., Hernández-Cruz, B., & Sánchez-Córdova, M. M. (2015a). Thermal history of the Acoculco geothermal system, eastern Mexico: Insights from numerical modeling and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 305, 56–62. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.019

Cox, S. F., Knackstedt, M. A., & Braun, J. (2001). Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems. *Reviews in Economic Geology*, 14, 1–24. https://doi.org/10.5382/Rev.14.01

Craig, J. W., Faulds, J. E., Hinz, N. H., Earney, T. E., Schermerhorn, W. D., Siler, D. L., & Deoreo, S. B. (2021). Discovery and analysis of a blind geothermal system in southeastern Gabbs Valley, western Nevada, USA. *Geothermics*, 97, 102177. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102177

Curewitz, D., & Karson, J. A. (1997). Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79 (3-4), 149–168. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(97)00027-9

Curtis, N. J., Gascooke, J. R., Johnston, M. R., & Pring, A. (2019). A review of the classification of opal with reference to recent new localities. *Minerals*, 9 (5), 299. https://doi.org/10.3390/min9050299

Esquivel-Mendiola, L. I., Calò, M., Tamelli, A., & Figueroa-Soto, A. (2022). Optimization of local scale seismic networks applied to geothermal fields: The case of the Acoculco caldera, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 119, 103987. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103995

Faulds, J. E., Coolbaugh, M., Blewitt, G., & Henry, C. D. (2004). Why is Nevada in hot water? Structural controls and tectonic model of geothermal systems in the northwestern Great Basin. *Geothermal Resources Council Transactions*, 28, 649–654.

Faulds, J. E., Hinz, N. H., Coolbaugh, M. F., Siler, D. L., Shevenell, L. A., Queen, J. H., dePolo, C. M., Hammond, W. C., & Kreemer, C. (2016). Discovering geothermal systems in the Great Basin region: An integrated geologic, geochemical, and geophysical approach for establishing geothermal play fairways. In *Proceedings of the 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* (p. 15). Stanford University.

Faulkner, D. R., Jackson, C. A. L., Lunn, R. J., Schlische, R. W., Shipton, Z. K., Wibberley, C. A. J., & Withjack, M. O. (2010). A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32 (11), 1557–1575. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.06.009

Forson, C., Swyer, M. W., Schmalzle, G. M., Czajkowski, J. L., Cladouhos, T. T., Davatzes, N., Norman, D. K., & Cole, R. A. (2015). Geothermal play-fairway analysis of Washington State prospects. *Geothermal Resources Council Transactions*, 39, 701–710.

García-Palomo, A., & Macías, J. L. (2000). *The Apan region, Central Mexico: Volcanic stratigraphy and structural geology* [Abstract]. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, CA, United States.

García-Palomo, A., Macías, J. L., Jiménez, A., Tolson, G., Mena, M., Sánchez Núñez, J. M., Arce, J. L., Layer, P. W., Santoyo, M. Á., & Lermo Samaniego, J. (2018). NW-SE Pliocene-Quaternary extension in the Apan-Acoculco region, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349, 240–255. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.11.005

García-Palomo, A., Macías, J. L., Tolson, G., Valdez, G., & Mora, J. C. (2002). Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, 41 (2), 133–150.

González-Partida, E., Camprubi, A., Díaz-Carreño, E., Lopez-Hernandez, A., Pandarinath, K., & Santoyo, E. (2024). Overlapping events in the Acoculco geothermal system, Puebla, Mexico. *Geothermics*, 118, 102907. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102907

Jentsch, A., Jolie, E., Jones, D. G., Taylor-Curran, H., Peiffer, L., Zimmer, M., & Lister, B. (2020). Magmatic volatiles to assess permeable volcano-tectonic structures in the Los Humeros geothermal field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 394, 106820. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106820

Jolie, E., Scott, S., Faulds, J., Chambefort, I., Axelsson, G., Gutiérrez-Negrín, L. C., & Zemedkun, M. T. (2021). Geological controls on geothermal resources for power generation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2 (5), 324–339. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00154-y

Keegan-Treloar, R., Irvine, D. J., Solórzano-Rivas, S. C., Werner, A. D., Banks, E. W., & Currell, M. J. (2022). Fault-controlled springs: A

review. *Earth-Science Reviews*, 230, 104058. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104058

Lautze, N., Thomas, D., Hinz, N., Apuzen-Ito, G., Frazer, N., & Waller, D. (2017). Play fairway analysis of geothermal resources across the State of Hawaii: 1. Geological, geophysical, and geochemical datasets. *Geothermics*, 70, 376–392. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.02.001

Lermo, J., Antayhua, Y., Bernal, I., Venegas, S., & Arredondo, J. (2009). Monitoreo sísmico en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla, México. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, 22 (1), 40–58.

Lindsey, C. R., Ayling, B. F., Asato, G., Seggiaro, R., Carrizo, N., Larcher, N., & Coolbaugh, M. F. (2021). Play fairway analysis for geothermal exploration in north-western Argentina. *Geothermics*, 95, 102128. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102128

Liotta, D., Brogi, A., Wheeler, W. H., Bastensen, E., Garduño-Monroy, V. H., Macias, J. L., & Zucchi, M. (2023). Tectonic-magmatic-hydrothermal interactions in a hot dry rock geothermal system: The role of the transfer and normal faults in the Acoculco caldera (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 444, 107963. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107963

Liotta, D., Ruggieri, G., Brogi, A., Fulignati, P., Dini, A., & Nardini, I. (2010). Migration of geothermal fluids in extensional terrains: the ore deposits of the Boccheggiano-Montieri area (southern Tuscany, Italy). *International Journal of Earth Sciences*, 99 (3), 623–644. https://doi.org/10.1007/s00531-008-0411-3

López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., & Quijano-León, J. L. (2009). Hydrothermal activity in the Tulancingo–Acoculco Caldera Complex, central Mexico: exploratory studies. *Geothermics*, 38 (3), 279–293. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.05.001

Maldonado-Hernández, L. T. (2025). *Exploración sísmica de la caldera de Acoculco, Puebla* [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].

Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867–882. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.032

Montanaro, C., Mick, E., Salas-Navarro, J., Caudron, C., Cronin, S. J., de Moor, J. M., ... & Strehlow, K. (2022). Phreatic and hydrothermal eruptions: from overlooked to looking over. *Bulletin of Volcanology*, *84*(6), 64. https://doi.org/10.1007/s00445-022-01571-7

Olvera-García, E., Ávila-Olivera, J. A., Figueroa-Soto, Á., Coolbaugh, M., & Liotta, D. (2025a). Data-driven Play Fairway Analysis applied to Los Humeros geothermal field, Mexico. *Geothermics*, 130, 103337. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2025.103337

Olvera-García, E., Ávila-Olivera, J. A., Figueroa-Soto, Á., Coolbaugh, M., & Liotta, D. (2025b). Response to comments by Rosa María Prol-Ledesma on the manuscript: Data-driven Play Fairway Analysis applied to Los Humeros geothermal field, Mexico. *Geothermics*, 131, 103384. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2025.103384

Olvera-García, E., Simbe, S., Mangahas, L., Marbello, A., Mandig, A., Alcantara, C. S., & Fronda, A. (2024). Expert-driven geothermal play fairway analysis for low to medium temperature hidden systems in northwestern Luzon Island, Philippines. *Geothermics*, 123, 103130. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103130

Olvera-García, E., Ayling, B. F., Rueda-Gutiérrez, J. B., Rivera, A. M. M., Rodríguez-Rodríguez, G. F., Malo, J., & Alfaro-Valero, C. M. (2023). Expert-driven play fairway analysis applied to the Azufral Volcano Geothermal Area in southwestern Colombia. *Geothermics*, 115, 102827. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102827

Olvera-García, E., Garduño-Monroy, V. H., Liotta, D., Brogi, A., Bermejo-Santoyo, G., & Guevara-Alday, J. A. (2020a). Neogene-Quaternary normal and transfer faults controlling deep-seated geothermal systems: The case of San Agustín del Maíz (central Trans-Mexican Volcanic Belt, México). *Geothermics*, 86, 101791. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101791

Olvera-García, E., Garduño-Monroy, V. H., Ostrooumov, M., Gaspar-Patarroyo, T. L., & Nájera-Blas, S. M. (2020b). Structural control on hydrothermal upwelling in the Ixtlán de los Hervores geothermal area, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 399, 106888. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106888

Olvera-García, E., Garduño-Monroy, V. H., Ostrooumov, M., Bermejo-Santoyo, G., Guevara-Alday, J. A., Brogi, A., & Liotta, D. (2020c). Litofacies y mineralogía de los depósitos de sínter de la zona geotérmica de San Agustín del Maíz, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(3), 212–223.

Pauling, H., Taverna, N., Trainor-Guitton, W., Witter, E., Kolker, A., Warren, I., & Rhodes, G. (2023). *Geothermal Play Fairway Analysis Best Practices* (No. NREL/TP-5700-86139). National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Peiffer, L., Bernard-Romero, R., Mazot, A., Taran, Y. A., Guevara, M., & Santoyo, E. (2014). Fluid geochemistry and soil gas fluxes (CO2–CH4–H2S) at a promissory Hot Dry Rock Geothermal System: The Acoculco caldera, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 284, 122–137. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.07.019

Pérez-Martínez, I., Villanueva-Estrada, R. E., Rodríguez-Díaz, A., Canet, C., García, R., Ramos-Leal, J. A., García, D., & Cambrón, J. F. (2021). Diffuse gases in soil of Araró-Simirao geothermal system, Michoacán, México. *Andean Geology*, 48 (3), 496–513. http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV48n3-3327

Pérez-Zárate, D., Santoyo, E., Jácome-Paz, M. P., Guevara, M., Guerero, F., Yánez-Dávila, D., & Santos-Raga, G. (2024). Soil CO2 fluxes measured in the Acoculco Geothermal System, Mexico: Baseline emissions from a long-term prospection programme. *Geochemistry*, 84 (2), 126112. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126112

Perton, M., Hernández, L. M., Figueroa-Soto, A., Sosa-Ceballos, G., Amador, J. D. J., Angulo, J., & Calò, M. (2022). The magmatic plumbing system of the Acoculco volcanic complex (Mexico) revealed by

ambient noise tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 432, 107704. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107704

Prol-Ledesma, R. M., de la Cruz, J. C., Jácome-Paz, M. P., Pérez-Zárate, D., & González-Romo, I. A. (2025). Updated conceptual model of the hydrothermal system in the Acoculco Caldera, Mexico. *Geothermics*, 131, 103381. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2025.103381

Pulido, C. L., Armenta, M. F., & Silva, G. R. (2011). Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Acoculco, Pue. *Geotermia*, 24 (2), 17–25.

Rea-Downing, G. H., Glen, J. M., Peacock, J., Witter, J., Hardwick, C., Szymanski, E., ... & Faulds, J. Characterizing the geothermal potential at Lund North, UT using 2D and 3D geophysical and geologic models.

Rocha, S., Jiménez, E., & Palma, H. (2006). *Propuesta para dos pozos exploratorios en el proyecto geotérmico de Acoculco, Puebla* (Internal Report No. OGL-ACO-03/06) [Unpublished manuscript]. Comisión Federal de Electricidad.

Rowland, J. V., & Sibson, R. H. (2004). Structural controls on hydrothermal flow in a segmented rift system, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geofluids*, 4 (4), 259–283. https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2004.00091.x

Sanjuan, B., Gal, F., & Alfaro, R. (2020, February). *Developments of auxiliary chemical geothermometers (Na-Li, Na-Cs) applied to the Los Humeros and Acoculco high-temperature geothermal fields (México)* [Conference presentation]. H2020-GEMex Final Conference - Superhot Geothermal Systems and the Development of Enhanced Geothermal Systems, Potsdam, Germany. HAL hal-03022569.

Santos-Raga, G., Santoyo, E., Guevara, M., Almirudis, E., Pérez-Zárate, D., & Yáñez-Dávila, D. (2021). Tracking geochemical signatures of rare earth and trace elements in spring waters and outcropping rocks from the hidden geothermal system of Acoculco, Puebla (Mexico). *Journal of Geochemical Exploration*, 227, 106798. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106798

Shervais, J. W., Glen, J. M., Siler, D., Liberty, L. M., Nielson, D., Garg, S., Dobson, P., Gasperikova, E., Sonnenthal, E., Newell, D., Evans, J., DeAngelo, J., Peacock, J., Earney, T., Schermerhorn, W., & Neupane, G. (2020). Play fairway analysis in geothermal exploration: The Snake River Plain volcanic province. In *Proceedings of the 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University.

Siler, D. L., Zhang, Y., Spycher, N. F., Dobson, P. F., McClain, J. S., Gasperikova, E., & Cantwell, C. (2017). Play-fairway analysis for geothermal resources and exploration risk in the Modoc Plateau region. *Geothermics*, 69, 15–33. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.04.003

Sillitoe, R. H., & Brogi, A. (2021). Geothermal systems in the northern Apennines, Italy: Modern analogues of Carlin-style gold deposits. *Economic Geology*, 116 (7), 1491–1501. https://doi.org/10.5382/econgeo.4883

Suter, M. (1984). Cordilleran deformation along the eastern edge of the Valles–San Luis Potosí carbonate platform, Sierra Madre Oriental fold-thrust belt, east-central Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 95 (12), 1387–1397.

Suter, M., Carrillo-Martínez, M., & Quintero-Legorreta, O. (1996). Macroseismic study of shallow earthquakes in the central and eastern parts of the trans-Mexican volcanic belt, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (6), 1952–1963. https://doi.org/10.1785/BSSA0860061952

Truesdell, A. H., & Hulston, J. R. (1980). Isotopic evidence on environments of geothermal systems. In P. Fritz & J. C. Fontes (Eds.), *Handbook of environmental isotope geochemistry* (Vol. 1, pp. 179–226). Elsevier.

Zheng, F., Thibaut, R., Liang, Z., Yu, J., & Pollack, A. Thermal Gradient Signatures of Fault-Controlled Hydrothermal Systems: Insights from Conceptual Models and Field Data.