



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis de mercurio en suelos, aire y líquenes  
de la Caldera Acoculco, Pue., como un posible  
indicador para una zona de interés geotérmico**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Geóloga**

**P R E S E N T A**

Karen Citlali Rodríguez Robles

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Carles Canet Miquel



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021**

Para Alejandro Rodríguez, Graciela Robles  
y Alejandra Rodríguez.

¡GRACIAS!

## **Agradecimientos**

A mi alma mater la Universidad Nacional Autónoma de México y a mi Facultad de Ingeniería, por haberme formado académica y profesionalmente.

Al proyecto denominado "COOPERACIÓN MÉXICO-EUROPA PARA LA INVESTIGACION DE SISTEMAS GEOTÉRMICOS MEJORADOS Y SISTEMAS GEOTÉRMICOS SUPERCALIENTES (GEMex)", en el Paquete de Trabajo 4.7 "Geoquímica del mercurio en zonas geotérmicas EGS". A la Dra. Aída López Hernández, por el apoyo y gestión en la elaboración de la tesis.

Al Dr. Carles Canet Miquel, por brindarme la oportunidad de ser participante de este proyecto.

A la Dra. Ofelia Morton Bermea y a la M. C. T. Elizabeth Hernández Álvarez, por el tiempo dedicado al trabajo de este proyecto, por los comentarios y sugerencias con el escrito. A la M. en C. María Flor Soledad Navarrete Cisneros, por las facilidades proporcionadas en el Laboratorio de Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) del Instituto de Geofísica, UNAM.

Al Ing. Marco Antonio Rubio Ramos, por compartir su conocimiento con paciencia y dedicación.

Al Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz, por sus observaciones, consejos y por el apoyo en el proyecto.

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem y a la Dra. Christina D Siebe Grabach, por compartir su conocimiento en la práctica de edafología.

A la Dra. Lucy Natividad Mora Palominio y a la M. en C. Maricarmen Salazar Ledesma, por haberme proporcionado el apoyo en el Laboratorio de Edafología Experimental del Instituto de Geología, UNAM.

Al Biól. Luis Enrique Juárez Sotelo por su ayuda con el análisis de datos.

## Dedicatoria

A mis padres, Alejandro y Graciela, por estar presentes siempre. Gracias por su apoyo incondicional.

A mi hermana, Ale, mi compañera de vida, por ser tan linda siempre, por estar conmigo en las buenas y en las malas. Que afortunada de tenerte en mi vida.

A mis abuelos, por ser mi ejemplo a seguir. Gracias por todo lo que, con mucho cariño, nos han enseñado.

A mi prima, Karlita, gracias por las risas y por acompañarme en cada locura, me hace muy feliz tenerte en mi vida.

A mis tías, por ser quiénes me motivan a seguir siempre hacia adelante. Por todo el apoyo que me brindan, muchas gracias. De aquí hasta el cielo.

A Ceci Gaytán, por crear y compartir tantas historias juntas, por ser mi apoyo en todos estos años dentro y fuera de la cancha, por ser siempre mi psicóloga (literal). A Karen Castro, porque a pesar de todo me sigues acompañando en cada etapa. A Verónica Rodríguez y a Jaqueline Salvador, por estar conmigo siempre, dentro y fuera de la facultad. Por hacer más bonita y divertida esta etapa de mi vida. A Victor Vargas, por ser mi mejor brigada en campo. A mi amiga Dany Salazar por el apoyo incondicional que siempre me ha brindado. A Alex Torres por el apoyo con el vehículo en campo, que buena anécdota. A Omar Ramos, por tan bonita amistad. A Ray Pérez, por los consejos y el apoyo que me brindas siempre. A mi amigo Arturo Cuevas, gracias por tanto en tan poco tiempo. A David Martínez, por todo el apoyo y las porras a la distancia. A Luis Enrique por haberme motivado y por haber estado conmigo en la última etapa.

A Donají y a Jaziel, porque sin su apoyo este proyecto no hubiera sido posible. Gracias *compis* por brindarme su sincera amistad. Por el conocimiento, las historias y tiempo que compartimos y que nos faltan por compartir.

## Resumen

En la Zona Geotérmica de Acoculco, localizada en la porción oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, se realizaron análisis para determinar las anomalías de mercurio (Hg) en tres compartimentos ambientales: suelo, aire y líquenes. La zona geotérmica incluye dos áreas de interés que presentan manifestaciones superficiales (manantiales fríos con burbujeo de CO<sub>2</sub>) y desarrollan alteración hidrotermal por fluidos tipo ácido sulfatado: Los Azufres y Alcaparrosa. Las rocas que afloran son volcánicas ácidas e intermedias.

La anomalía en suelos se obtuvo a partir de muestras de los primeros horizontes (Ay B) y se analizó por espectrometría mediante el equipo RA-915M con pirolizador (PYRO-915+). Se obtuvo una anomalía de Hg de 9996 ng/g para el horizonte A y de 10379 ng/g para el horizonte B. El valor de fondo es de alrededor de 30 ng/g, localizado en la periferia, al NE de la zona de estudio. Se realizaron análisis de las propiedades del suelo como pH, M.O. y conductividad. De acuerdo al análisis estadístico, no hay correlación entre la concentración de Hg y ninguno de los parámetros del suelo en la Zona Geotérmica de Acoculco. Sin embargo, el coeficiente de correlación ( $r^2$ ) entre el Hg del horizonte A y el horizonte B es positivo (0.62), lo que propone que la distribución espacial del Hg es regida por el enriquecimiento primario de Hg en las rocas como consecuencia de la actividad hidrotermal.

Para determinar las anomalías de Hg en aire se tomaron lecturas con un espectrómetro unielemental de Hg (Lumex). Las concentraciones más altas (146 ng/m<sup>3</sup>, agosto de 2018; 670 ng/m<sup>3</sup>, noviembre de 2018) están espacialmente relacionadas con minas de caolín y de arenas silíceas. En cuanto a los líquenes, la anomalía alcanzó valores de Hg de hasta 1540 ng/g, mientras que el valor de fondo fue de 182 ng/g. Las anomalías en suelo y líquenes coinciden con la zona de los Azufres.

## Abstract

In the Acoculco Geothermal Zone, located in the eastern portion of the Trans-Mexican Volcanic Belt, analyses were carried out to determine mercury (Hg) in three environmental compartments: soil, air and lichens. The geothermal zone includes two areas of interest that present superficial manifestations (warm springs whit bubbling CO<sub>2</sub>) and develop hydrothermal alteration by sulfate acid-type fluids: Los Azufres and Alcaparrosa. The rocks that crop out are silicic to intermediate volcanic.

Mercury in soil was obtained from samples of the first horizons (A and B) and was analyzed by spectrometry using the RA-915M equipment whit a pyrolyzer (PYRO-915+). A Hg anomaly of 9996 ng/g was obtained from the A horizon and 10379 ng/g from the B horizon. The background value is around 30 ng/g, located in the periphery, to the NE of the zone study. Analysis of soil included properties such as pH, organic mater and conductivity. According to the statistical analysis, there is no correlation between the Hg concentration and any of the soil parameters. However, the correlation coefficient ( $r^2$ ) between Hg of the horizon A an of the horizon B is positive (0.62), which suggests that the spatial distribution of Hg is governed by the primary enrichment of Hg in the rocks as a consequence of the hydrothermal activity.

To determine Hg anomalies in air, analyses were taken with a single-element Hg spectrometer (Lumex). The highest concentrations (146 ng/m<sup>3</sup>, August 2018; 670 ng/m<sup>3</sup>, November 2018) are spatially related to kaolin and silica sand mines. Regarding lichens, the anomaly reached Hg values up to 1540 ng/g , while the background value was 182 ng/g. The anomalies in soil and lichens spatially co-occur in Los Azufres.

# ÍNDICE

Agradecimientos .....	II
Dedicatoria .....	III
Resumen.....	IV
Abstract .....	V
1. Introducción .....	1
1.1 Justificación .....	2
1.2 Planteamiento del problema .....	2
1.3 Objetivo general .....	3
1.4 Objetivos particulares .....	3
1.5 Hipótesis .....	3
2. Marco teórico .....	4
2.1 Generalidades.....	4
2.2 Geología regional .....	5
2.3 Geología local .....	7
2.4 Sistema Geotérmico .....	9
2.4.1 Sistema Geotérmico de Acoculco.....	10
2.5 Geoquímica del mercurio.....	13
2.5.1 Mercurio en suelo .....	15
2.5.2 Mercurio en líquenes .....	17
2.5.3 Mercurio en el ambiente atmosférico .....	18
2.6 Mercurio en el Sistema Geotérmico .....	18
3. Metodología Analítica .....	20
3.1 Trabajo de campo.....	20
3.2 Hg en el ambiente atmosférico.....	20
3.3 Laboratorio .....	22
3.3.1 Suelos .....	22
3.3.2 Líquenes .....	23
4. Resultados.....	27
5. Discusión.....	38
6. Conclusiones y recomendaciones .....	40
Referencias .....	42
Anexos.....	48

## 1. Introducción

La energía geotérmica se define como la energía calorífica que se encuentra, de manera natural, contenida en la masa de la corteza, el manto y el núcleo que se encuentra a altas temperaturas (Toth y Bobok, 2015). Es una energía renovable, prácticamente inagotable. Debido a que sus emisiones se componen principalmente de vapor de agua, su uso no representa un riesgo ambiental para nuestro planeta.

México cuenta actualmente con una capacidad geotermoeléctrica instalada de 965 megawatts. Esta producción representa alrededor de 2.97% de generación por fuente. (Comisión Federal de Electricidad, 2010). En el país existe un potencial muy alto de recursos geotérmicos y experiencia en su explotación, sin embargo, es prioritario continuar con investigaciones y desarrollo de tecnologías, sobre todo, de los sistemas de roca seca disponibles del país. Algunos problemas que presenta la explotación de energía geotérmica durante la fase de exploración y desarrollo de nuevos proyectos geotérmicos, es que implican riesgos relativamente altos por incertidumbre y fuertes inversiones para lograr la localización correcta de sitios de interés. (Santoyo, E. & Barragán-Reyes, 2019).

Determinados métodos de exploración geotérmica se basan en la búsqueda de cantidades anómalas de elementos volátiles/ semi-volátiles en suelo o en aire (Varekamp-Buseck, 1983). La distribución de los elementos volátiles tiene una estrecha correlación con las estructuras (fracturas y fallas) que pueden comunicar con el sistema geotérmico subyacente (Wright, 1980). El análisis de la geoquímica del mercurio volátil (Hg) (GEM's, Gaseous Emission Mercury) puede servir como un método rápido y económico en la exploración regional de sistemas geotérmicos (Murray, 1997). Con base en lo anterior, el presente trabajo de investigación fue realizado con el objetivo de implementar el análisis de las anomalías de Hg como un vector hacia zonas de circulación hidrotermal actuales o fósiles en zonas superficiales de interés geotérmico.

La Zona Geotérmica de Acoculco (ZGA) se encuentra alojada en el Complejo Calderico de Acoculco (CCA), en el sector oriental de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), entre los estados de Puebla e Hidalgo (Avellán et al., 2019). El área de estudio fue propuesta y estudiada por primera vez por la Comisión Federal



de Electricidad (CFE) en 1983. La superficie del área exploratoria tiene aproximadamente 150 km<sup>2</sup>, y solo existen dos pozos exploratorios perforados: EAC-1 con 1810 m de profundidad, en 1995, y EAC-2 a 1900 m de profundidad, en el 2006. Datos de estos pozos indicaron temperaturas por encima de los 300 °C en su nivel más profundo (Viggiano-Guerra et al., 2011). Pulido et al. (2011) clasificaron la ZGA como un Sistema Geotérmico de Roca Seca Caliente (HDR, por sus siglas en inglés), con base en las mediciones de altas temperaturas (264 °C y 307 °C) y la poca o casi nula permeabilidad de las litologías del sistema.

En la ZGA existen escasas manifestaciones superficiales, estas consisten en descargas de gases ricos en CO<sub>2</sub> y manantiales ácido sulfatados de baja temperatura. Alrededor de la zona se presenta alteración hidrotermal de sílice, la cual se extiende por varios kilómetros cuadrados. (Sánchez Córdova *et al.*, 2020) La silificación afecta a las rocas volcánicas superficiales, principalmente tobas y brechas. (Canet et al., 2015). Los resultados previos por medio de geotermómetros químicos (iónicos), la abundancia de CO<sub>2</sub>, y la firma isotópica (<sup>18</sup>O) consecuencia de la interacción fluido-roca a altas temperaturas respaldan el potencial geotérmico de la ZGA.

## **1.1 Justificación**

El contenido de Hg en los suelos puede ser utilizado como una herramienta geoquímica en la exploración de sistemas geotérmicos (Varekamp-Buseck, 1983). La metodología propuesta es práctica, útil y económica para la exploración de las zonas geotérmicas que presentan pocas o casi nulas manifestaciones térmicas superficiales (Klusman-Landress, 1978). La interpretación se reforzará con el análisis del Hg en líquenes y aire en la ZGA. Actualmente esta zona representa un área con alto interés geotérmico, susceptible a ser explotado mediante la instalación a futuro de una planta geotermoeléctrica (Santos Raga, 2019) (GEMex, 2020).

## **1.2 Planteamiento del problema**

El yacimiento geotérmico de Acoculco exhibe características que sugieren su baja permeabilidad; por otro lado, las escasas manifestaciones termales de tipo acuoso complican su evaluación geotérmica, por lo que la implementación de técnicas que analizan gases son una herramienta que podrá evaluar las zonas de mayor interés para la etapa de exploración más avanzada (perforación), con base a criterios

integrados de permeabilidad que incluyan o sean correlacionables con lineamientos estructurales y anomalías de Hg.

### **1.3 Objetivo general**

Cuantificar la concentración de Hg en materiales ambientales y geológicos tomados en la zona de la Caldera de Acoculco, Puebla. La finalidad consiste en identificar concentraciones anómalas superficiales para que puedan ser usadas como criterios alternos de exploración geotérmica.

### **1.4 Objetivos particulares**

- Analizar la concentración de Hg en tres matrices ambientales, suelos, líquenes y aire, por medio del equipo Lumex-915® y su adaptador PYRO-915+
- Realizar mapas georeferenciados de la distribución espacial de las anomalías de Hg de las tres matrices ambientales.

### **1.5 Hipótesis**

En la zona geotérmica, si se encuentran datos anómalos de Hg (>80 ng/g (Rollinson, 2014), se encontrarán áreas con temperaturas altas que favorecen su volatilización, indicando la existencia de una anomalía geotérmica a profundidad.

De acuerdo a Rollinson (2014), el contenido de Hg en la Corteza Terrestre es de 80 ng/g, dicho metal es liberado al medio ambiente por diversas causas naturales, como la actividad volcánica e hidrotermal, o la erosión de las rocas e intemperismo de minerales. El Hg se caracteriza química y físicamente, por ser una metal pesado y denso (13534 kg/m<sup>3</sup>), con baja temperatura de ebullición (356.7 °C) y por ser muy volátil (Bagnato 2009; Gray 2003). Esta última propiedad favorece procesos de movilidad por las temperaturas elevadas dentro de un sistema geotérmico y su flujo en la fase de vapor permitiendo que migre verticalmente hacia la superficie a través de zonas permeables (Wright, 1980). Es precisamente esta volatilidad del Hg en sistemas sellados lo que permite, evidenciar las zonas “ocultas” (blind) con mayor permeabilidad. Además, como lo señalan Varekamp-Buseck (1983) y Van Kooten (1987), las anomalías de Hg proporcionan información sobre la presencia y la geometría de patrones de circulación hidrotermal, así como, la extensión de un

sistema geotérmico. Estas anomalías también se relacionan con el ambiente geológico y tectónico de la zona. Por lo que la importancia que tiene relacionar estas anomalías con estructuras y litologías, podrá aportar información para regionalizar y jerarquizar zonas con mayor potencial dentro del campo de Acoculco.

Los parámetros del suelo (como pH, conductividad y contenido de materia orgánica) tienen una influencia significativa en la retención o movilidad del Hg en los suelos, por lo que deberá ser tomados en cuenta en la interpretación de las anomalías (Klusman-Landerss, 1978).

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Generalidades**

La zona es única en México ya que se tiene un gradiente geotérmico alto (49 °C) pero pocas manifestaciones termales (Viggiano-Guerra, 2009). El área de estudio se caracteriza por presentar manifestaciones térmicas particulares. Cuenta con una superficie de 1290 Km<sup>2</sup> y 39 manantiales (Viggiano-Guerra et al., 2011) y algunas emanaciones frías de gas (CO<sub>2</sub>, principalmente). La manifestación más caliente tiene apenas 49 °C y se localiza a unos 18 km al SE de Los Azufres-El Potrero. Esta manifestación se localiza bastante distante del sitio de perforación, ya que se tienen en evidencia pocas manifestaciones térmicas superficiales. Los estudios realizados por Tello-Hinojosa (1994) pusieron de manifiesto el interés geotérmico de Acoculco, ya que se identificaron las siguientes características:

- Los fluidos son de tipo ácido-sulfatado y son producto de la mezcla de H<sub>2</sub>S de origen geotérmico con agua meteórica superficial.
- El enriquecimiento del CO<sub>2</sub> en los gases de la zona de Acoculco, corresponde a lo esperado en un ambiente geotérmico de regiones volcánicas
- Enriquecimiento de <sup>18</sup>O en el agua de los manantiales, reflejando procesos de interacción salmuera-roca a alta temperatura.

#### *Ubicación*

La ZGA se localiza en el centro-oriente de México a 85 km al NE de la Ciudad de Puebla y 130 km al NE de la Ciudad de México (López-Flores, 2016). El acceso a la zona es a través de una serie de caminos de terracería que se conectan con las

carreteras federales 199 y 132. Las poblaciones más importantes que rodean el área son: Zacatlán, Chignahuapan y Huauchinango, del estado de Puebla, y Tulancingo y Apan, del estado de Hidalgo (Figura 1).

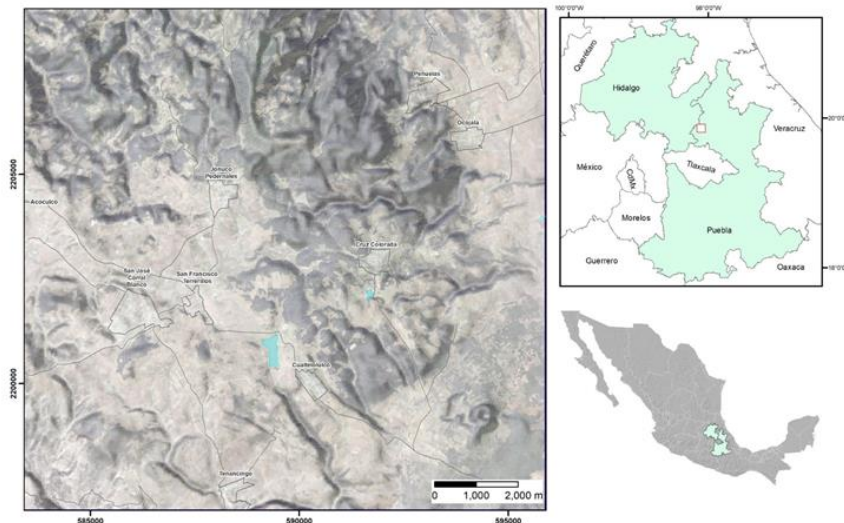


Figura 1. Mapa de localización de la zona geotérmica de Acoculco, Puebla, México.

## 2.2 Geología regional

La Faja Volcánica Trans Mexicana (FVTM) es una provincia geológica que tiene una disposición este-oeste atravesando el territorio de México en su porción meridional, desde el Oeste de la República Mexicana (Ferrari, 2000). Su extensión abarca los estados de Jalisco y Colima al occidente, atravesando el centro del país por los estados de Michoacán, Estado de México, Ciudad de México, Tlaxcala, Hidalgo, terminado en los estados de Puebla y Veracruz al oriente. Esta provincia geológica es considerada uno de los arcos volcánicos más complejos y variados del mundo (Aguirre-Díaz et al., 1998). Algunos rasgos particulares de la FVTM son: (a) oblicuidad respecto a la trinchera; (b) una notable variación del ancho de arco (tiene un ancho variable entre un máximo de 200 km en la región del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato y un mínimo de 65 km en las regiones de Chapala y Morelia; (c) gran variabilidad del estilo volcánico y composición química a lo largo del arco, y; (d) la presencia de un vulcanismo alcalino con afinidad de intraplaca OIB (asimilado a los *Ocean Island Basalt*), especialmente asociado al vulcanismo dominante relacionado a la subducción (Ferrari, 2000). En la FVTM se tuvieron dos episodios de vulcanismo, los cuales fueron controlados por los sistemas de fallas relacionados con

el proceso de subducción en el Pacífico. En el primer episodio, más antiguo al complejo, se encuentran centros volcánicos importantes como el de Pachuca, Apan y Cerro Grande. Está alineado en dirección NW-SE, su edad varía de 13.4 a 9 Ma. El siguiente episodio se inició después de un hiatus volcánico de 4-5 Ma, se mantuvo activo entre 4.6 y 0.2 Ma, comprende edificios cuya principal composición andesita-basáltica. El emplazamiento fue controlado por un sistema de fallas dirección NE-SW (López-Hernández, 2009).

De acuerdo con sus características volcánicas, petrológicas y estructurales, la FVTM ha sido dividida en tres sectores principales, occidental, central y oriental (Figura 2), (Aguirre et al., 1998; Pasqueré et al., 1991). El sector oriental al este del Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende, donde se localiza el área de estudio, y que está caracterizado por la presencia de estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición de andesítica a riolítica (Ferrari, 2000).

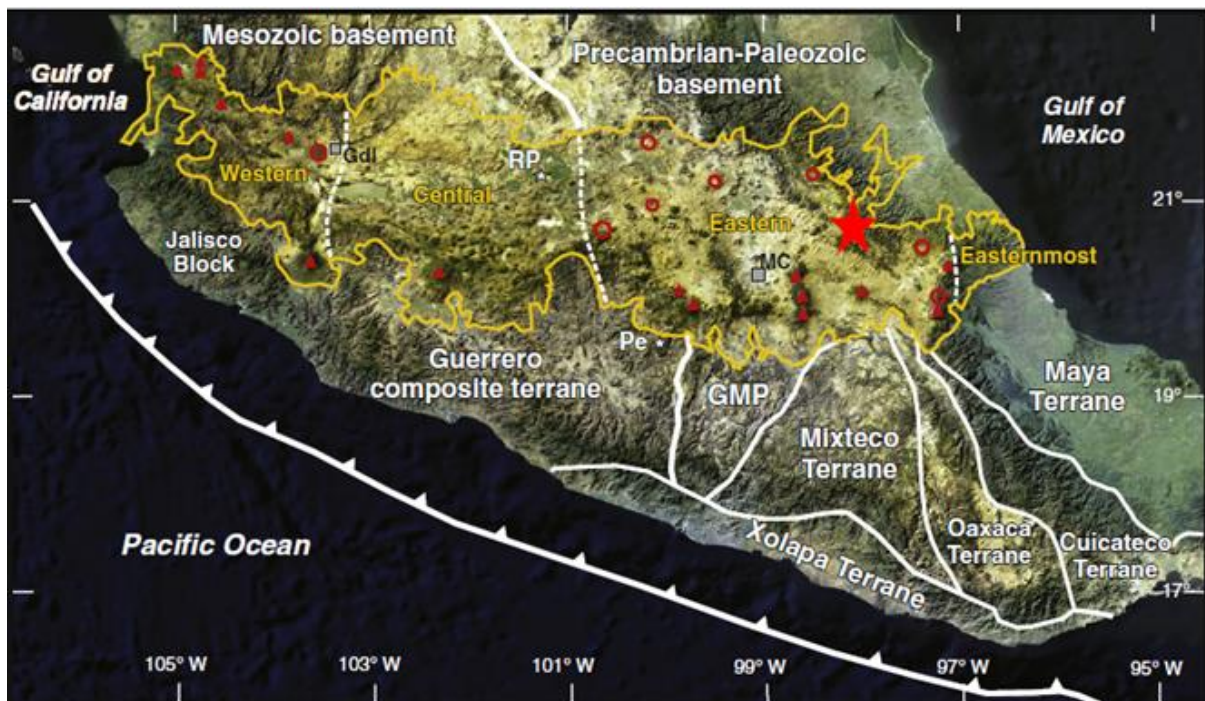


Figura 2. Imagen satelital del centro de México delineando la FVTM (línea amarilla) con la zona geotérmica de Acapulco (estrella roja), los principales estratovolcanes (triángulos rojos) y calderas (círculos rojos), así como la división de los tres principales sectores: sector occidental, central y oriental. (Tomado de Ferrari et al., 2012).

### 2.3 Geología local

En el Complejo Calderico Acoculco (CCA) se formó durante dos ciclos volcánicos: el más antiguo, denominado Complejo Volcánico Tulancingo-Acoculco, tiene una edad del Plioceno (3.0-2.7 Ma) y el más reciente, de edad Pleistocénica (activa entre 1.7 a 0.24 Ma). Por la composición química, las rocas pertenecen a una serie calcoalcalina a subalcalina, e incluyen basaltos, andesitas basálticas, dacitas y riolitas (López-Hernández, 2009). Estudios recientes colocan el inicio de la actividad del CCA en el Plioceno (Avellán et al., 2019), dividiéndolo en cinco fases diferentes:

- Pre-caldera
- Sin-caldera
- Tempranas post-caldera
- Tardías post-caldera
- Extra-caldera

De acuerdo con Avellán et al. (2019), las rocas más antiguas de la región son calizas Cretáceas de la Sierra Madre Oriental, expuestas en la parte noreste, este y sureste de los poblados de Chignahuapan y Zacatlán. Aunque estas rocas no están expuestas dentro del CCA, fueron encontradas en los dos pozos exploratorios a profundidades de aproximadamente 1,200 m y 350-450 m. A estas calizas le sobreyace una meseta de lava de composición basáltica. Un complejo de domos de composición dacítica (13-10 Ma) está expuesto al sur del CCA y son las rocas más antiguas de las unidades de Pre-Caldera.

Fisiográficamente el CCA tiene una traza semicircular con un diámetro aproximado de 18 km. Se encuentra en una región altamente tectonizada y afectada por estructuras con orientaciones NW-SE, NE-SW y E-W (Figura 3). El sistema de fallas NW-SE, está representado por varias fallas mayores normales y oblicuas (componente lateral derecha), creando estructuras tipo *horst* y *graben*. Los sistemas de falla más importantes son: el Sistema de Falla Apan-Tlaloc, el Sistema de Fallas Tenochtitlán-Apan, ambos sistemas con orientación NE-SW. Y el sistema de Fallas Tulancingo-Taxco con orientación NW-SE (Avellán et al., 2019).



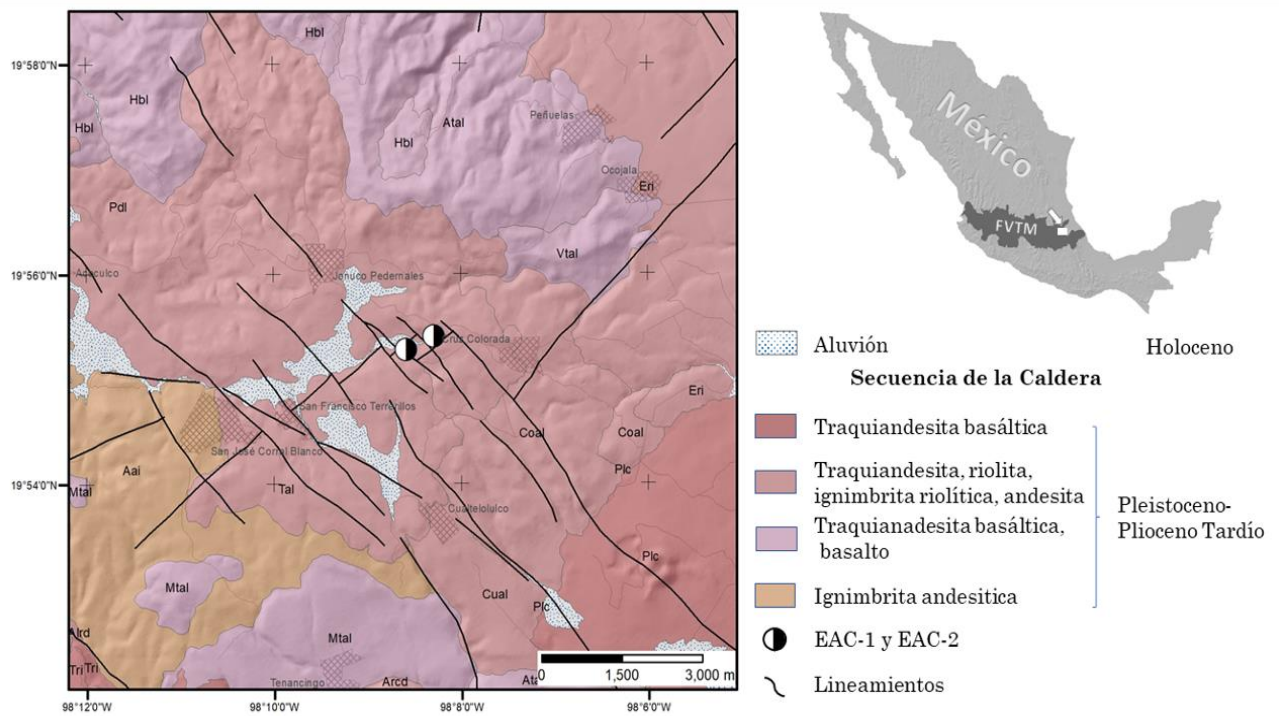


Figura 3. Mapa geológico local del Complejo Calderico de Acoculco (tomado de Avellán et al., 2020).

En la Tabla 1, se representan las unidades antes mencionadas del Complejo Calderico de Acoculco, la edad de cada unidad, así como las formaciones que estas contienen y su litología.

Tabla 1. Estratigrafía de la Caldera de Acoculco (Compilado de: Avellán, D.R., et. al., 2020)

Unidad	Formación	Litología	Edad (Ma)
Extra Caldera	Tuliman	Lava basáltica	~2.4-0.19
	La Paila	Traquiandesita	
	Moxhuite	Andesita	
	Tetilla	Domo riolítico	
	Tecoloquillo	Traquiandesita	
Tardias Post-Caldera	Tetelas	Traquiandesita	~2.6--2.1 Ma
	Minilla	Domo Coulée	
	Maguey	Piroclastos	
	Ailitla	Domo Coulée	
	Tejaquete	Cono de escoria	
	Blanco	Cono de escoria	
	Cabezas	Lava riolítica	
	Encimadas	Ignimbrita	
	Arco	Domo riolítico	
	Canoas	Domo riolítico	
	Togo	Domo Coulée	
	Ahuacatla	Domo Coulée	
	La Chica	Domo Coulée	
	Amolo	Domo Coulée	
La Colorada-d	Dique basáltico		
Pedernal	Lava riolítica		

	Cuautelolulco	Traquiandesita	
	Terrerillos-sc	Cono de escoria	
	Lobera	Domo riolítico	
	Terrerillos	Lava andesítica	
	Altamira	Domo riolítico	
	La Colorada	Lava andesítica	
	Camelia	Lava andesítica	
	Ajolota	Domo traquiandésitico	
	Manzanito	Traquiandesitas	
	Del viejo	Lavas basálticas	
	Ananalco	Escoria basáltica	
	Aguila	Flujos de lava	
	Sayula	Flujos de lava	
	Huistongo	Flujos de lava basáltica	
<b>Syn-caldera</b>	Acoculco	Ignimbrita andesítica	~2.7
	Terreritos	Dacita	
<b>Pre-Caldera</b>	Puente	Andesita	~3.9-3
	Peñuela	Dacitas	~13 a 10

## 2.4 Sistema Geotérmico

Los sistemas geotérmicos son regiones en la superficie terrestre donde ocurre de manera natural la transferencia del flujo de calor y masa a través de cualquier tipo de roca (Axelsson, 2016). Esto es debido a los grandes volúmenes de magma que se acumulan en la corteza y a determinada profundidad. Los sistemas geotérmicos se encuentran distribuidos alrededor del mundo, aunque la mayoría están localizados principalmente a lo largo de márgenes de placas convergente o divergente y, predominantemente en zonas con vulcanismo activo o reciente.

A mayor profundidad los cuerpos intrusivos que se encuentran en proceso de enfriamiento, pueden funcionar como una fuente de calor para el sistema geotérmico debido a las altas temperaturas. La temperatura ideal para poder explotar los sistemas geotérmicos para la producción de electricidad, a escala industrial, es por encima de los 300 °C (Barbier, 2002). En el caso de México los sistemas geotérmicos registran temperaturas promedio superiores a los 150°C (Gutiérrez-Negrín et al., 2010). El sistema geotérmico explotable debe tener las condiciones de temperatura necesaria, así como una permeabilidad alta en la roca; esta permeabilidad, mediante las fisuras, puede conectar y transferir directamente los fluidos a la superficie, permitiendo así la recarga vertical del reservorio. El sistema debe estar rodeado de una capa de roca no permeable, la cual funciona como una barrera aislante con el medio exterior (García-Hernández, 2020).



Los sistemas geotérmicos se pueden clasificar respecto a la naturaleza de formación geológica (Axelsson, 2016). De acuerdo a esta clasificación, los sistemas geotérmicos son:

- Sistemas geotérmicos magmáticos
- Sistemas geotérmicos sedimentarios
- Sistemas geotérmicos geopresurizados
- Sistemas geotérmicos marinos
- Sistemas geotérmicos radiogénicos
- Sistemas geotérmicos supercríticos
- Sistemas geotérmicos hidrotermales

De acuerdo a la evaluación de los recursos térmicos del país, México cuenta actualmente con cinco campos geotérmicos activos, los cuales son: Cerro Prieto en Baja California, Los Azufres en Michoacán, Los Humeros en el límite entre Puebla y Veracruz, Las Tres Vírgenes en Baja California Sur y Cerritos Colorados, Nayarit. Las reservas geotérmicas probadas en los campos antes mencionados, han sido estimadas en unos 430 MW (CeMIEGeo, 2018). Adicionalmente se tiene el registro de la Zona Geotérmica de La Primavera, Jalisco. Con excepción del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, todos los demás están alojados en la FVTM.

Los sistemas geotérmicos no convencionales, como los sistemas de roca seca caliente (HDR; por sus siglas en inglés), representan un potencial energético muy grande. Tienen como principal característica disponer de una fuente de calor en rocas poco permeables a escasa profundidad (menos de 10 km) de bajo de la corteza terrestre y sin ningún tipo de disponibilidad de fluido para almacenar o transportar calor (Santos Raga, 2019).

#### **2.4.1 Sistema Geotérmico de Acoculco**

El sistema geotérmico de Acoculco presenta muy pocas manifestaciones superficiales que incluye 39 manantiales, en su mayoría “fríos” (Tello-Hinojosa, 1994) y algunas emanaciones o mofetas también frías de CO<sub>2</sub>; sin embargo, existen otros

indicios la actividad térmica. Estas evidencias incluyen: (a) el CO<sub>2</sub> es el gas predominante; y (b) la relación isotrópica <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He alcanza valores de hasta 8.5; este valor se encuentra entre los más altos reportados para todo la FVTM y sugiere a profundidad una fuente magmática activa (Polak et al., 1985). El sistema geotérmico de Acoculco tiene una extensa alteración hidrotermal que se extiende por un área de varios kilómetros cuadrados desde el centro del sistema geotérmico, afectando tobas, brechas y lavas (Canet et al., 2015). El tipo de alteración con mayor extensión es la alteración silícica. Ocurre como un reemplazo generalizado de los depósitos piroclásticos por un ensamblaje de ópalo, tridimita y anatasa, desarrollado en condiciones de temperaturas por debajo de los 150 °C y pH casi neutro. La alteración argílica avanzada tiene una distribución mucho más limitada, ocurriendo principalmente cerca de manifestaciones de gas activas (Figura 4). Se identifica por el conjunto de minerales secundarios ricos en caolinita y sulfatos (alunita y amoniojarosita) producto de fluidos calentados con vapor (Canet et al., 2015).

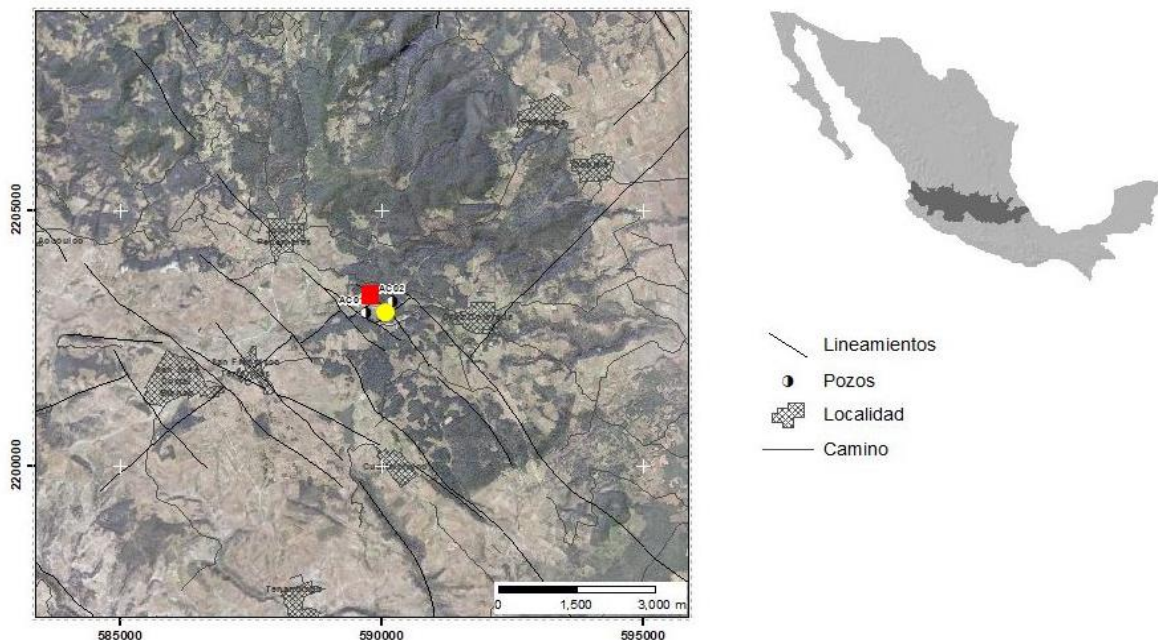


Figura 4. Área de interés con alteración hidrotermal. Región de Los Azufres (círculo amarillo) y Alcaparrosa (cuadro rojo).

En la ZGA, se incluyen dos áreas de interés alteradas hidrotermalmente por fluidos tipo ácido sulfatado. Estas áreas son: Los Azufres y Alcaparrosa. (Figura 4). La alteración hidrotermal identificada para estas zonas es argílica avanzada, se encuentra conformada por caolinita, amonio-jarosita y alunita. La alunita se encuentra en mayor proporción en Alcaparrosa, mientras que en los Azufres se encuentra la amonio-jarosita. (Canet et al., 2015).

La permeabilidad del sistema es muy baja, esto debido a la precipitación de minerales hidrotermales, los cuales provocaron la formación de una roca sello (caprock) lo suficientemente impermeable para impedir la mayoría de las filtraciones hacia la superficie. (López, 2015). La mayoría de la energía térmica dentro del sistema de Acozulco se transporta conductivamente debido a la permeabilidad limitada. En las perforaciones realizadas por CFE se registraron temperaturas superiores a los 300°C a 2000 m de profundidad, lo que implica un valor tres veces mayor al gradiente geotérmico promedio de la FVTM (Canet et al., 2015). Las características antes mencionadas sugieren que la fuente de calor del sistema proviene de un intrusivo cuya edad coincide con la actividad volcánica más reciente (0.24 Ma).

Canet et al. (2015) identificaron paragénesis correspondientes a alteración silícica, argílica, argílica avanzada, buddingtonita y propilítica. En la estructura vertical las alteraciones se distribuyen en dos grandes zonas: (Figura 5)

1º La zona somera está dominada principalmente por la presencia de sulfatos y silicatos de amonio que se extienden entre 500 a 600 m por debajo de la superficie.

2º La zona profunda en donde predomina una asociación de epidota, calcita, clorita perteneciente a una alteración del tipo propilítica.

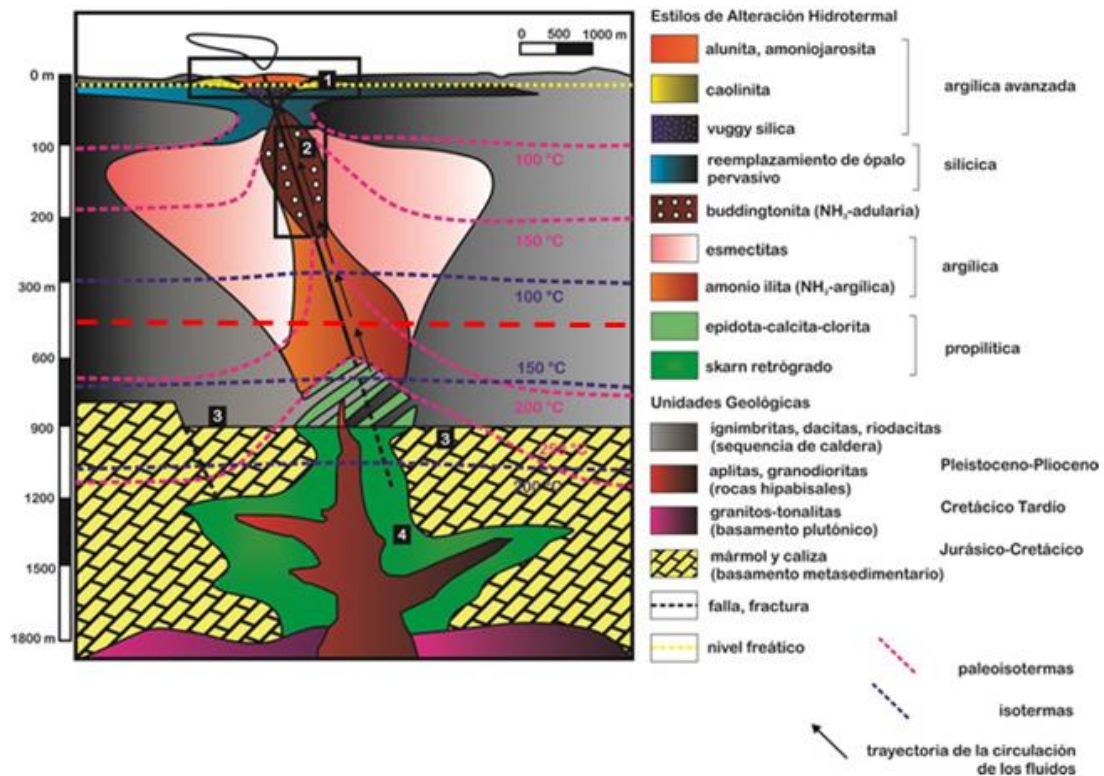


Figura 5. Esquema mostrando el Sistema hidrotermal y los tipos de alteración en Acoculco. 1) alteración con pH bajo; 2) zona de ebullición; 3) circulación profunda de los fluidos; 4) metamorfismo y metasomatismo. La línea punteada roja divide las dos grandes zonas de alteración hidrotermal. (modificado de Canet et al., 2015).

## 2.5 Geoquímica del mercurio

El mercurio tiene las siglas Hg y número atómico 80. Tiene un peso atómico de 200.59 g/mol, con una temperatura de fusión de -38.87 °C, una temperatura de ebullición de 356.58°C, una densidad de 13.53 g/mL a 25 °C, presión de vapor de 0.16 Pa y dos estados de oxidación: +2, +1. Es un metal pesado de aspecto plateado y es el único elemento metálico que es líquido en condiciones estándar. El Hg se encuentra de manera natural en el medio ambiente, con promedio de abundancia en la corteza terrestre de alrededor de 50 ppb (Adriano, 2001). El Hg se presenta en la naturaleza diferentes estados de oxidación: Hg<sup>0</sup> (mercurio elemental), Hg<sub>2</sub><sup>2+</sup> (ión mercurioso), Hg<sup>2+</sup> (ión mercúrico).

El Hg es un elemento biofílico, aunque tóxico para los seres vivos cuando está concentrado, y que se puede distribuir fácilmente en el medio ambiente, dado que su ciclo geoquímico se lleva a cabo continuamente entre el suelo, el agua y la atmósfera.

La cantidad de Hg va a depender de distintos factores como son: la fuente primaria, la circulación atmosférica de los vapores de Hg, la producción local de Hg y la dispersión regional generada por las diversas actividades antropogénicas y factores naturales (Gaona, 2004).

La mayor parte del Hg que se encuentra en la atmósfera es vapor de Hg<sup>0</sup>, mientras que, en el agua, el suelo, los sedimentos o la biota se encuentra de forma de sales inorgánicas y complejos orgánicos (Adriano, 2001). El Hg se encuentra en todo tipo de rocas (Tabla 2) y; los minerales más frecuentes que contienen son cinabrio y metacinabrio (polimorfos de HgS), además del mercurio nativo.

En la tabla 2 también se muestran las concentraciones de Hg comúnmente observadas en diversos medios ambientales, reportadas por: NRCC (1979); Adriano (1980) y; Cox (1995).

Tabla 2. Rangos de concentraciones de Hg reportados en diferentes materiales. Fuentes: (NRCC (1979), Adriano (1980) y Cox (1995) ).

<b>Material</b>	<b>Rango (ppb)</b>
<b>Rocas ígneas</b>	5-250
<b>Caliza</b>	40-220
<b>Arenisca</b>	<10-300
<b>Esquisto</b>	5-3250
<b>Petróleo</b>	20-2000
<b>Carbón</b>	10-8530
<b>Turba</b>	60-300
<b>Suelo (normal)</b>	20-250
<b>Sedimentos (normal)</b>	5-100
<b>Suelos cercanos a depósitos de Hg</b>	Hasta 250 ppm
<b>Horizontes de suelo (normal)</b>	
<b>A</b>	60-200
<b>B</b>	30-140

### 2.5.1 Mercurio en suelo

El suelo se puede definir como un sistema natural, dinámico, organizado y complejo, resultado de procesos formadores físicos, químicos y biológicos que actúan después de instalarse microorganismos y plantas, en un material de origen natural, meteorizado o de origen antropogénico (Porta et al., 2019). El resultado es una organización verticalizada en capas de los materiales del subsuelo, de espesor variable, llamados horizontes. Los horizontes se designan por medio de letras mayúsculas. Sucintamente, los horizontes principales son (de menor a mayor profundidad):

**Horizonte A:** formado en la parte superior del suelo, principalmente oscurecido por la materia orgánica que en este se acumula.

**Horizonte B:** formado en el substrato del suelo u horizonte subsuperficial.

**Horizonte C:** horizonte poco afectado por los procesos formadores del suelo.

**Horizonte R:** roca consolidada subyacente.

Dichos horizontes están relacionados genéticamente entre sí debido a los procesos formadores de suelo (hidrólisis, oxidación y reducción) y que han actuado bajo el control agresivos de factores ambientales (Adriano,2001). Los factores principales pueden ser tipo de roca madre, clima (intemperismo), topografía, organismos vivos y tiempo.

La capacidad que tiene el suelo para almacenar Hg, tiene como consecuencia que su concentración en suelo sea razonablemente estable (Murray, 1997).

La adsorción de Hg al suelo depende de varios factores, entre ellos el estado de oxidación química del elemento, la actividad de los coloides inorgánicos y orgánicos del suelo, el pH, el tipo de cationes y aniones en el complejo de intercambio, y el contenido de materia orgánica. Entre los factores que controlan la adsorción, uno de los más importantes es el pH, ya que las características de carga superficial de las partículas del suelo como la especiación de metales en la solución se ven afectadas por la acidez o neutralidad. Otro factor importante en un perfil de suelo, que facilita la

concentración del Hg es el contenido de materia orgánica que, a mayor contenido de materia orgánica, mayor será la concentración de Hg (Adriano, 2001).

La zona de estudio se encuentra en la Carta Edafológica Chignahuapan E14B13 escala 1:50 000 del INEGI, y en donde se pueden identificar los siguientes grupos de suelos:

- Andosol (AN): Suelos recientes de origen volcánico. Generalmente tienen una consistencia lustrosa o resbaladiza. Si bien los Andosoles son fáciles para cultivar considerando sus buenas propiedades de enraizamiento y almacenamiento de agua, se erosionan rápidamente por deforestación y remoción de raíces. Los Andosoles mexicanos son particularmente frágiles ya que la mayoría están situados en regiones con cambios drásticos en el uso de suelo, por ejemplo, antiguos bosques de pino y oyamel, que hoy son terrenos agrícolas de regular a baja productividad. La mayor parte de los Andosoles en México están situados sobre depósitos de basalto, andesita, brecha volcánica básica, brechas sedimentarias y secuencias volcanoclásticas.
- Luvisol (LV): Suelos generalmente de color rojo, grises o pardos claro, susceptibles a la erosión especialmente aquellos con alto contenido de limo y los situados en pendientes fuertes. Son generalmente fértiles para la agricultura. Su distribución abarca superficies de bosques de pino. Desafortunadamente los principales aserraderos del país se encuentran en áreas donde los luvisoles son abundantes.
- Regosol (RG): Son suelos pedregosos, generalmente de color claro y se parecen bastante a la roca que les ha dado origen cuando no son profundos. Constituyen el grupo de suelo más extenso y variado del país.
- Histosol (HS): Suelos con capas orgánicas de espesor mayor a 10 cm. Los restos orgánicos se acumulan en este grupo en cualquier condición de humedad. Son suelos de alto valor ecológico debido a sus propiedades de absorción de humedad y regulación de los cauces naturales. Se caracterizan por tener altas cantidades de hojarasca, fibras, madero o humus. Ocasionalmente huelen a podrido y presentan acumulación de salitre.
- Feozem o Phaeozem (PH): Suelos que generalmente tienen un color superficial pardo a negro. El relieve donde se desarrollan estos suelos es

generalmente plano o ligeramente ondulado. En México constituyen los suelos más importantes para la agricultura de temporal.

La información de los grupos de suelos de la zona de estudio fue obtenida de la Guía para la interpretación de cartografía: edafología: escala 1:250 000; serie II/ INEGI (INEGI, 2004).

### **2.5.2 Mercurio en líquenes**

Los líquenes son organismos simbiotes entre un alga y un hongo, los cuales resultan ser perfectos bioindicadores, ya que estos manifiestan patologías particulares ante cambios en el medio ambiente, generalmente de forma cuantitativa. Esto se debe a que estructuralmente no presentan una cutícula protectora; por lo tanto, el agua, las sales minerales y algunos nutrientes son absorbidos en gran parte y, unidos a ellos, gran cantidad de contaminantes. Tampoco poseen estomas, con lo que ocurre el intercambio de gases en toda la superficie del líquen. Asimismo, son considerados bioacumuladores, es decir son organismos capaces de asimilar sustancias dentro de su tejido y resultan ser susceptibles para analizarlos; ya que su distribución, sus poblaciones y su comportamiento, pueden ser estudiadas a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta las variaciones respecto a los valores estándar (López-Berdonces, 2015). Los líquenes acumulan metales a través de dos mecanismos: Atrapando partículas insolubles y por medio de intercambio iónico de partículas solubles. La absorción y acumulación de metales pesados disminuye al aumentar la distancia horizontalizada del foco emisor (Barrales et. al, 2017).

En el área del CCA se reconocen los líquenes escudo de la familia *Parmeliaceae* del género *Parmelia* (Figura 6). Su talo es aplanado o extendido, está dividido en lóbulos y se asemeja a hojas. Su superficie puede estar reticulada, tener una apariencia harinosa o polvosa, manchas blancas o arrugas.



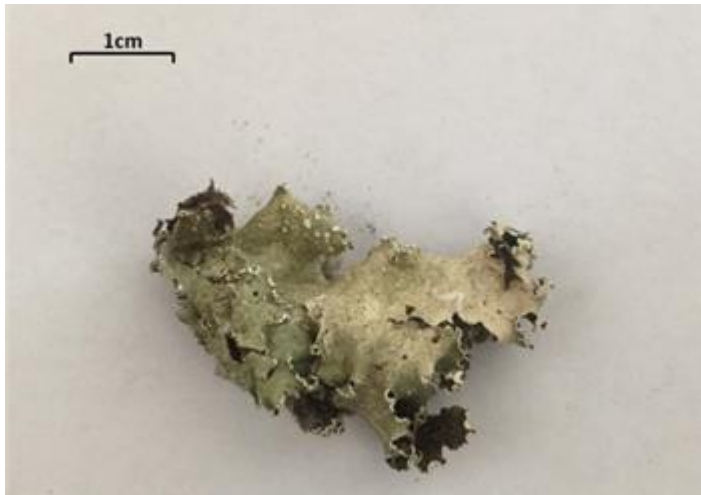


Figura 6. Liquen escudo (familia *Parmeliaceae*, *Parmelia*) recolectados en el área de la Caldera de Acoculco, Puebla.

### 2.5.3 Mercurio en el ambiente atmosférico

El Hg en fase vapor se produce por procesos naturales superficiales, como son: la volatilización desde medios acuáticos y marinos, la volatilización a partir de la vegetación, por la liberación de gases de materiales geológicos sub-superficiales y como resultado directo de la actividad volcánica. Las emisiones naturales de Hg tienen lugar principalmente en forma de  $\text{Hg}^0$  (Gaona-Martínez, 2004).

Los procesos involucrados en el transporte y destino del Hg son: las emisiones, la transformación y transporte en la atmósfera y la depositación. Estudios realizados sobre el tiempo de residencia del Hg en fase vapor muestran que éste permanece durante un largo tiempo en la capa atmosférica (entre 6 y 8 meses; AMAP/UNEP, 2008), indicando que los procesos de oxidación no son rápidos. La forma inorgánica ( $\text{Hg}^{2+}$ ) tiene un tiempo de residencia breve en la atmósfera, su presencia está controlada por factores estacionales. Es la principal forma presente en las aguas naturales, encontrándose asociado a una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos; se deposita en el medio ambiente en forma de  $\text{Hg}^0$  arrastrado por el agua de lluvia.

### 2.6 Mercurio en el Sistema Geotérmico

En zonas geotérmicas y manifestaciones alrededor del mundo se ha encontrado Hg en forma de cinabrio, metacinabrio o mercurio elemental, como Sulphur Bank System y Amedee Hot Spring en EUA; Rotowaka y Waiotapu en Nueva Zelanda;

Ezon Caldera y Apapel Hot Springs en Rusia y el Monte Amiata en Italia (White, 1981). Las anomalías de Hg ocurren cuando los fluidos geotérmicos escapan a través de áreas permeables desde un depósito profundo hacia niveles con poca profundidad (Varekamp y Buseck, 1983). Cuando el sistema hidrotermal se desarrolla favorablemente, el Hg es extraído de las rocas o de los vapores magmáticos, para posteriormente ser movilizado y transportado dentro de una fase fluida y, con pH que suele variar de neutro a alcalino (Misra, 2000).

El Hg es un elemento muy soluble en agua caliente, llegando a presentar concentraciones de 0.5, 16 y 400 ppm a temperaturas de 100, 200 y 300 °C, respectivamente. Cuando los fluidos poseen una temperatura mayor a 200 °C, el Hg fijado dentro de estructuras cristalinas de minerales formadores de roca es removilizado a la fase acuosa. En ambientes más someros, cuando los fluidos alcanzan una temperatura de 150 °C, el Hg dentro de la materia orgánica y minerales arcillosos es movilizado (Varekamp y Buseck, 1983).

Las concentraciones de Hg en rocas de ambiente geotérmico pueden alcanzar hasta cien veces más las concentraciones de fondo, en particular alrededor de las fumarolas de los sistemas geotérmicos dominados por fase vapor. Dentro de las zonas que presentan alteración argílica (ácida sulfatada) y alteración silícica (sínter silícico) y las concentraciones de Hg pueden llegar hasta decenas de ppm (Nevada Bureau of Mines and Geology, 1998). Por debajo del nivel freático las concentraciones Hg pueden estar relacionadas a minerales como pirita, zeolita, cuarzo, clorita y feldespatos potásico. Las vetas o vetillas de cinabrio también se pueden encontrar debajo del nivel freático.

El cinabrio puede precipitar a partir de un fluido hidrotermal o como sublimado (de una descarga gaseosa) condicionado por la oxidación, puesto que esta provoca un aumento en la acidez al convertir un ácido débil y reducido,  $H_2S$ , en  $H_2SO_4$ , un fuerte ácido oxidado provocando una disminución notable en la solubilidad del cinabrio. La mezcla de los fluidos hidrotermales calientes con el agua superficial de baja temperatura, oxidada y en ocasiones ácida, puede ayudar a la precipitación de Hg. Cuando la solución hidrotermal alcanza profundidades intermedias, ésta ocasionalmente sufre un proceso repentino de despresurización lo que provoca la ebullición y separando del fluido al Hg hacia la fase gaseosa (López-Flores, 2016).

### 3. Metodología Analítica

En la figura 7 se muestra de manera esquemática el procedimiento que se realizó para el presente estudio: 1) Trabajo de campo, 2) Preparación de muestras, 3) Análisis de laboratorio y, 4) Trabajo de gabinete.

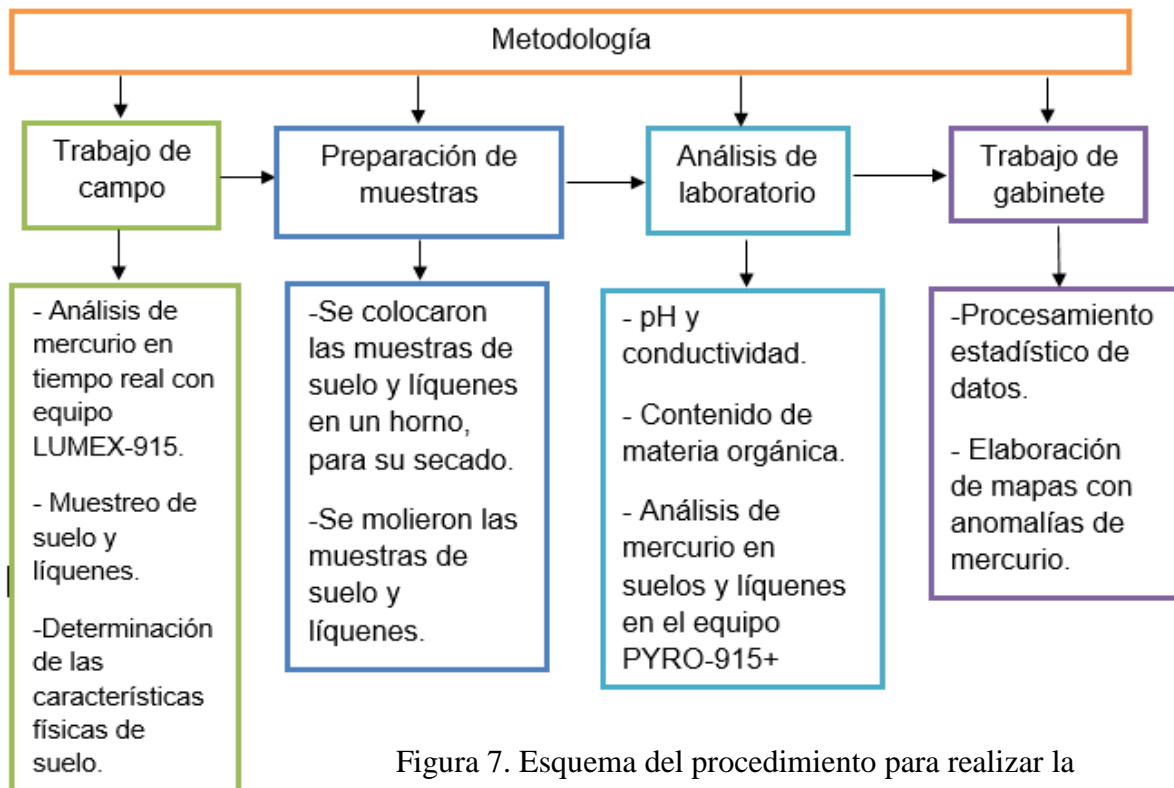


Figura 7. Esquema del procedimiento para realizar la metodología de análisis de Hg en la zona de estudio.

#### 3.1 Trabajo de campo

El área de estudio está delimitada por un polígono de 150 Km<sup>2</sup>, con coordenadas UTM (X = 583403 m, Y = 2197060 m) y (X = 595811m, Y = 2208898m). Los mapas se realizaron con base al polígono establecido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de la concesión geotérmica Acoculco. El área fue dividida por una malla irregular (Figura 8) en donde se localizan los puntos de muestreo.

#### 3.2 Hg en el ambiente atmosférico

Los recorridos para hacer la medición de Hg en aire se realizaron en noviembre y en agosto del año 2018 (Figura 9). Para este análisis se utilizó el equipo LUMEX-915, que pertenece al Instituto de Geofísica, UNAM. Este analizador es un espectrómetro de absorción atómica (AA) multifuncional portátil con corrección Zeeman para la absorción de fondo, que elimina el efecto de las impurezas interferentes. Es un equipo

analítico cuantitativo de alta sensibilidad, diseñado para medir concentraciones en tiempo real. Consiste en el bombeo de un volumen de aire de 10 L/min a través de una entrada que filtra las partículas del aire a la celda de detección. Una corrección de cero se aplica cada 20 min durante el muestreo para restablecer la línea de base cambiando el flujo de aire a través de un filtro de absorción del mercurio. El rango de detección es de 0.5 a 30 000 ng/m<sup>3</sup>, con una precisión del 20%. El instrumento permite realizar mediciones en condiciones de altos niveles de humedad a 35 °C (no más del 95%) y H<sub>2</sub>S (no más de 100 mg/m<sup>3</sup>). Estas mediciones se realizaron en automóvil, con georeferenciación GPS de los datos adquiridos de Hg. El programa de muestreo se estructuró a partir de las rutas de las carreteras locales y caminos para poder cubrir el área determinada. Los mapas obtenidos de los recorridos realizados dentro de la zona de estudio se presentan en la figura 8.

En el Anexo A, al final del manuscrito se describen las condiciones de muestreo, coordenadas geográficas y fotografías de cada sitio.

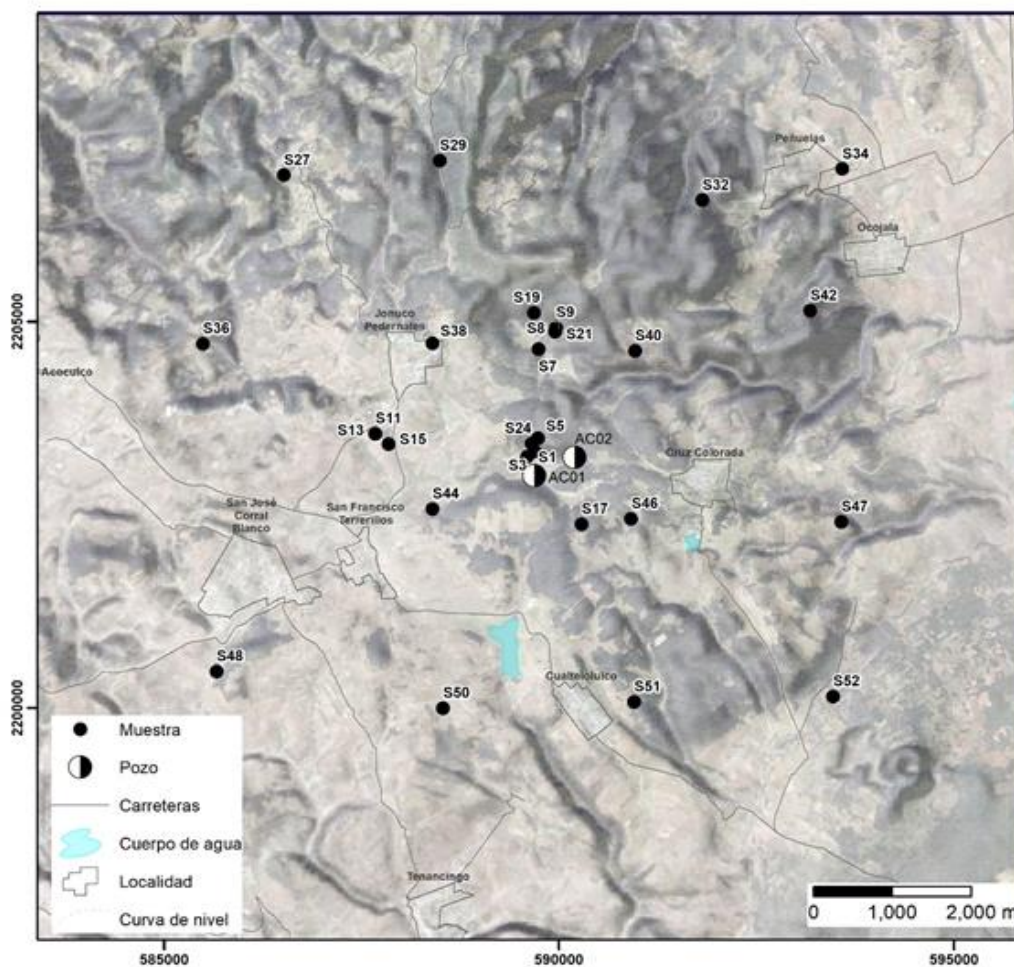


Figura 8. Puntos de muestreo de suelo de la zona de GEMs vs STRC

## Muestreo de suelo y líquenes

Se colectaron un total de 53 muestras de suelo las cuales fueron clasificadas en horizonte A y B; sólo en tres de los puntos de muestreo se reconoció y extrajo el horizonte C. En estos horizontes, se realizaron pruebas para determinar sus características físicas. Además, en los puntos cercanos al muestreo de suelo se colectaron muestras de líquenes escudo (familia *Parmeliaceae*) (Figura 6).

Cada muestra fue guardada en bolsas previamente etiquetadas, para tener un mejor manejo de ellas en el laboratorio.

### 3.3 Laboratorio

#### 3.3.1 Suelos

La preparación para el análisis de las muestras de suelo consistió en un previo etiquetado para así poder ingresarlas a un horno para su secado a una temperatura de 40° C (Figura 9A) durante un tiempo de cinco días (Figura 9B).

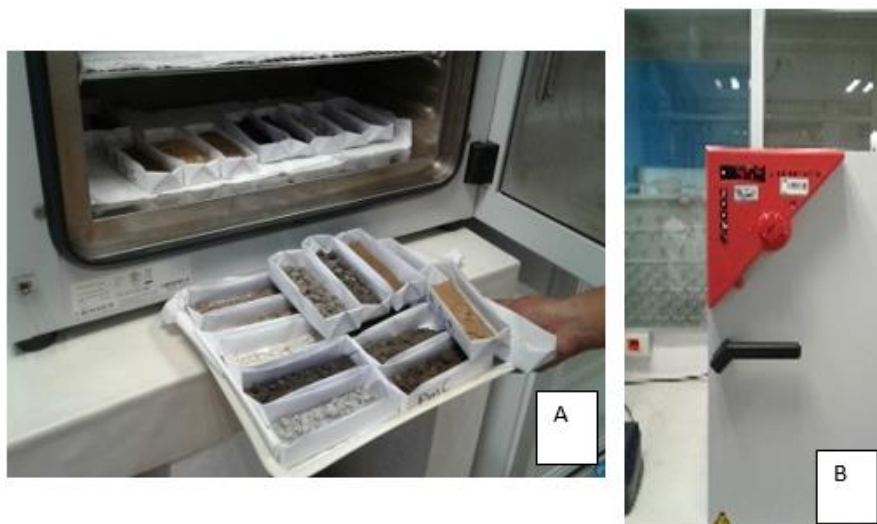


Figura 9A. Muestras de suelo en el horno. B. Horno del Laboratorio de ICP-MS, Instituto de Geofísica, UNAM.

Una vez que las muestras estuvieron secas, se pasó a cribarlas en un tamiz #10 <2 mm, para descartar: fragmentos grandes como agregados; materia vegetal como hojas y ramas etc. (Figura 10A). La cantidad de muestra necesaria es de



aproximadamente 50 g (Figura 10B) que se pulverizan en un molino de ágata para obtener un tamaño fino homogéneo inferior a 0.1 mm (Figura 10C).

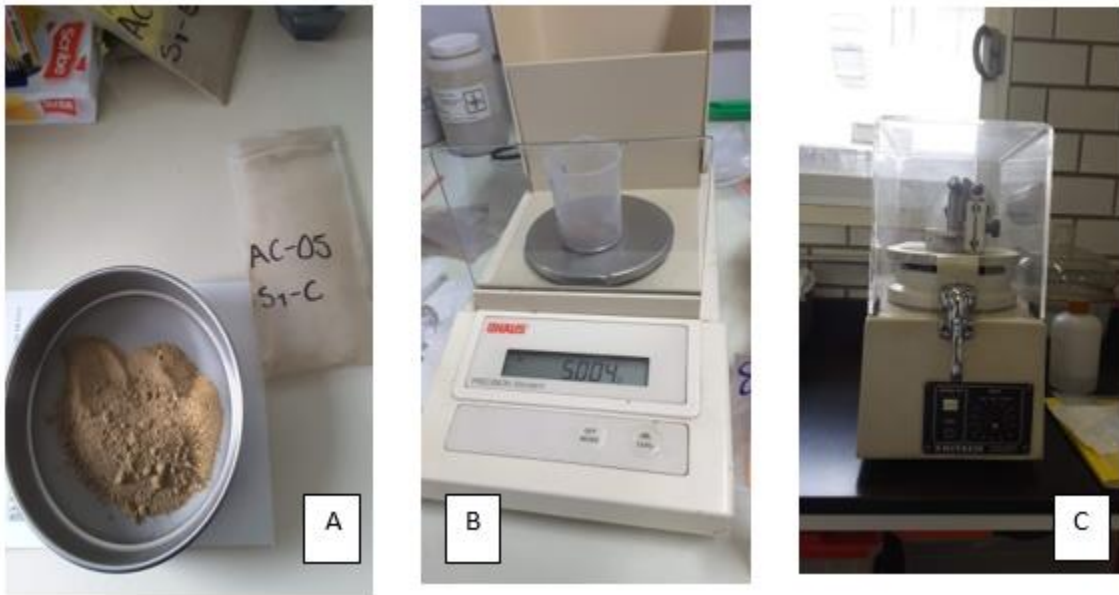
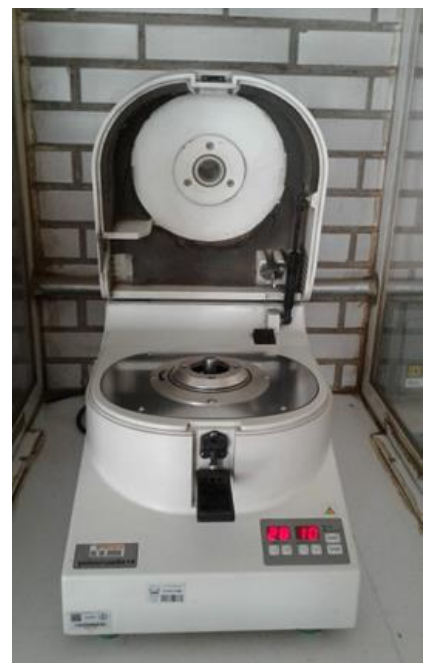


Figura 10. Preparación de las muestras de suelo. A. Tamiz #10. B. Balanza analítica. C. Molino de Ágata, Laboratorio de Edafología Experimental, Instituto de Geología, UNAM.

### 3.3.2 Líquenes

La preparación de las muestras de líquenes consistió en colocarlas en cajas previamente etiquetadas para secar en horno, a una temperatura de 40 °C por cuatro días (Figura 9A). Una vez que se tuvo la muestra seca, ésta se pulverizó en un molino para líquenes, proporcionado por el Laboratorio de Edafología Experimental del Instituto de Geología, UNAM (Figura 11).

Figura 11. Molino usado para las muestras de líquenes, Laboratorio de Edafología Experimental, Instituto de Geología, UNAM.



## Análisis de pH y conductividad

Estos dos parámetros son de gran importancia considerando que, el pH controla los procesos de adsorción/desorción del  $\text{Hg}^{2+}$  y la conductividad eléctrica está asociada a la presencia de sales en los suelos.

Las muestras de suelo fueron homogenizadas con 25 ml de agua MilliQ y sometidas a un proceso de agitación mecánica durante 8 horas. Se utilizó un equipo Shaker SK-71, para homogeneizar y lograr el equilibrio iónico de las muestras analizadas. La determinación de estos parámetros se realizó con el procedimiento estándar del Centro Internacional de Información y Referencia de Suelos (ISRIC, por sus siglas en inglés).

Las lecturas se realizan en el líquido sobrante y no en el sedimento. Se determinó pH, con un pH-metro (Figura 12 A, B) y conductividad con el conductímetro (Figura 12 C). Ambos equipos fueron previamente calibrados con sus respectivas soluciones.

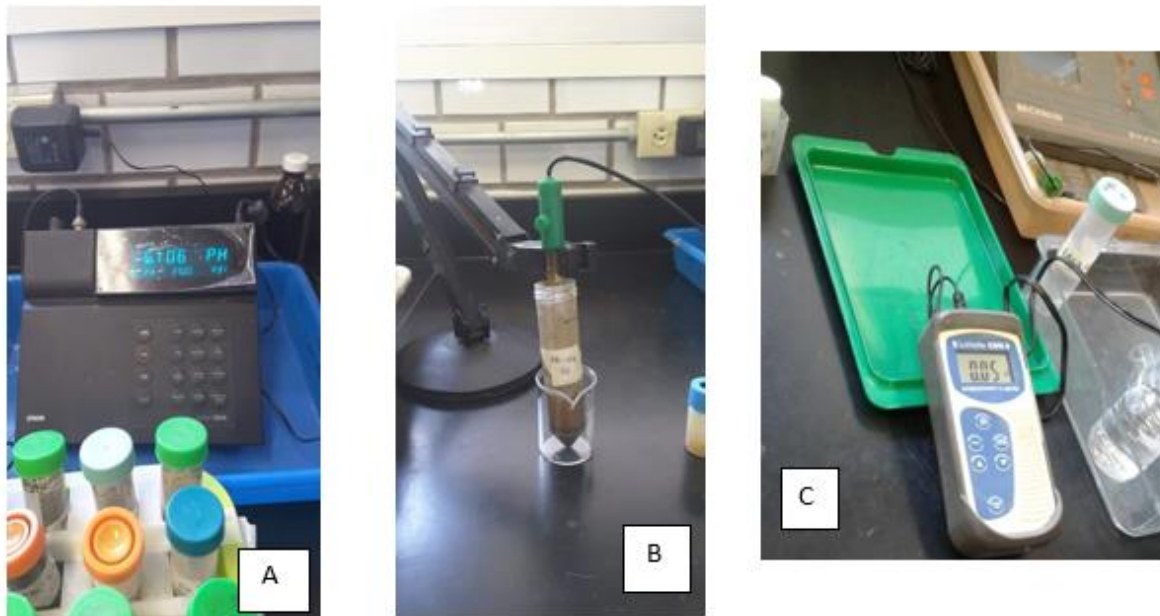


Figura 12. Análisis de laboratorio para muestras de suelo. A. pH-metro. B. Muestra de suelo en análisis de pH. C. Conductímetro, Laboratorio de Edafología Experimental, Instituto de Geología, UNAM.

## **Análisis del contenido de materia orgánica**

Este análisis fue realizado por el Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología, UNAM. El equipo que se utilizó fue un analizador elemental CNHS/O Perkin Elmer 2400 serie II en modo CHN, con las siguientes condiciones analíticas:

<b>Gas acarreador:</b>	Helio
<b>Temperatura de combustión:</b>	980° C
<b>Temperatura de reducción:</b>	640° C
<b>Detector:</b>	Conductividad térmica
<b>Compuesto de calibración:</b>	Acetanilida
<b>Material de referencia:</b>	LECO soil calibration simple for CNS part 502-309

## **Análisis de Hg en suelos y líquenes**

El análisis del contenido de Hg se realizó mediante el equipo RA-915M con pirolizador PYRO-915+ (Figura 13). El análisis con este equipo consiste en la calcinación de la muestra en la cámara de pirolisis a una temperatura de 980°C; esto hace que se libere el Hg de las muestras sólidas en forma de vapor atómico, el cual es transportado por el gas acarreador a la celda analítica (Martínez Coronado, 2012). El contenido de Hg resultante de este proceso se cuantifica mediante espectroscopia de absorción atómica con efecto Zeeman (Sholupov y Ganeyev, 2004), cuyo límite de detección es de 0.5 ng/g (ppb).

El control de calidad se llevó a cabo con materiales de referencia certificados, de matriz semejante a las muestras analizadas; para los suelos se usaron los estándares Montana Soil 2710a y San Joaquín Soil 2709a. Y para los líquenes se usó el estándar BCR-482.



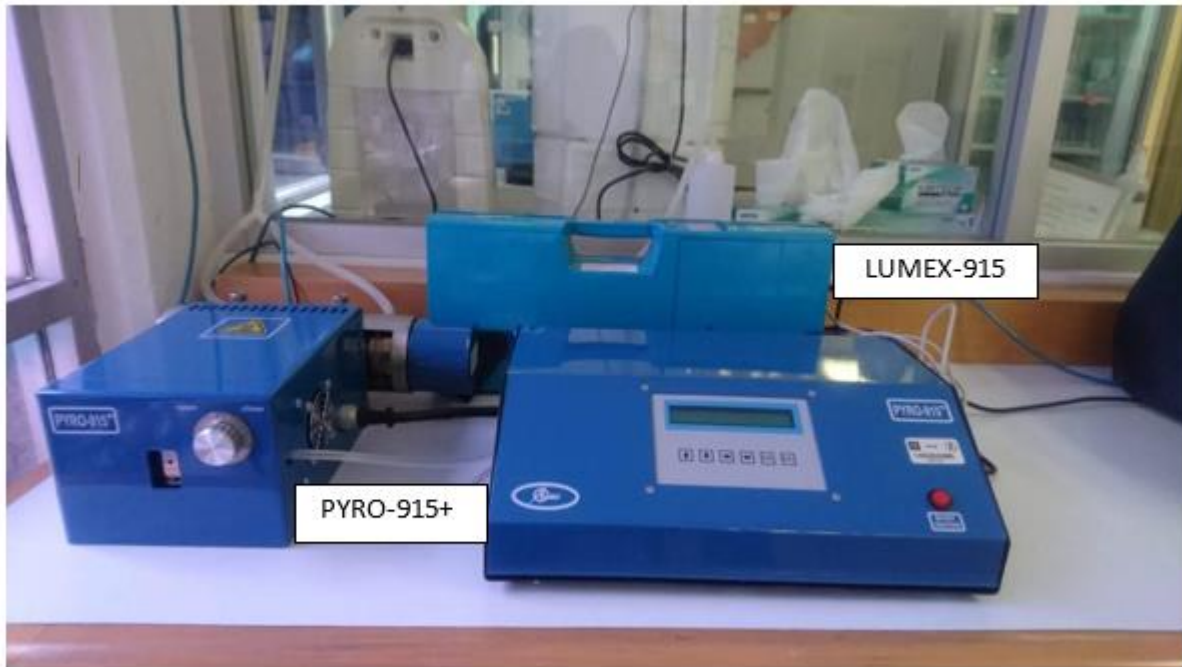


Figura 13. Equipo LUMEX-915 acoplado a su periférico PYRO-915+

### **Elaboración de mapas**

El software utilizado para elaborar los mapas fue ArcMap 10.5. Las coordenadas obtenidas en campo se descargaron al programa formando una capa formato shape (.shp) de puntos. Se realizó la capa de litología con shape de polígonos, esto con base en el mapa de la zona previamente publicado por Avellán et. al. (2019).

Para clasificar los datos de Hg en suelos y líquenes, el software utilizado tiene diferentes métodos de clasificación estándar. Para este trabajo se utilizó el método *Natural Breaks (Jenks)* con 5 clases. Este método se utilizó porque se basa en las agrupaciones naturales inherentes a los datos. Se caracteriza porque agrupa mejor los valores similares y maximiza las diferencias entre las clases. Las cantidades se dividen en clases cuyos límites quedan establecidos cuando hay diferencias considerables entre los valores de los datos. (ArcGIS plataforma, 2016). Como en el horizonte 3 se tienen solo tres muestras, el programa nos arroja por *default* 3 clases para tal mapa.

#### 4. Resultados

Uno de los objetivos de la estadística es la posibilidad de estimar o predecir el valor de una variable que depende de otra. El análisis de correlación, es un método que se utiliza para determinar la fuerza de la relación o dependencia lineal existente entre las variables (Weimer, 2013). Considerando lo anterior, las muestras de suelo y líquenes fueron analizadas por triplicado. Para los suelos se obtuvo un valor promedio de la concentración de Hg por horizonte muestreado. Así mismo se encontraron las anomalías (concentraciones más altas) y los valores de fondo (background) de Hg en la zona de estudio.

- Suelos

En la tabla 3 se muestran todas las concentraciones de Hg en suelos de las 40 muestras de la zona de estudio, así como los resultados de pH, materia orgánica (MO%), conductividad y la ubicación geográfica con coordenadas UTM.

En la tabla 6 se muestran los valores de correlación entre el contenido de Hg medido en suelos y los parámetros de pH, el porcentaje de carbón (C) y nitrógeno (N) total, el contenido de MO y la conductividad. Cuando el coeficiente de correlación se acerca a uno indica que los parámetros tienen buena correlación, si el coeficiente de correlación es menor a 0.5, los parámetros tienen baja correlación. En la tabla 5, se expresan los valores mínimos y máximos de los resultados del contenido de Hg, con sus resultados de pH, MO y conductividad, así como los coeficientes de correlación entre las variables del suelo de los horizontes A y B.

En la figura 14 se muestran los mapas que representan la localización del contenido de Hg en los puntos de muestreo de suelo para el horizonte A y B. Los puntos rojos y de mayor tamaño, representan las anomalías de Hg dentro de la zona de Acoculco. Mientras que los puntos en color azul y de menor tamaño expresan cantidades menores de Hg.

El histograma de la figura 15 A representan el contenido de Hg en el suelo en el horizonte A y en el horizonte B, El histograma A tiene una distribución sesgada a la derecha. Se identifican dos familias principales con una concentración de Hg en el suelo de hasta 500 ng/g. Mientras que en solo dos de ellas presentan la concentración en los rangos 9500-10000 ng/g, que es la anomalía de Hg en Acoculco.

Para el histograma de líquenes (Figura 15B) se presentan la mayoría de las muestras en los rangos de 140-400 ng/g, El valor que más se repite es de 240 ng/g.

**Tabla 3.** Concentración de Hg en muestras de suelo.

Horizonte	Clave muestra	Hg (ng/g)	pH	% C total	% N total	MO%	Conductividad	Coordenada X (UTM)	Coordenada Y (UTM)
A	S1	936	5.49	4.46	0.33	5.68	38.6	589598	2203248
B	S2	2982	5.91	0.86	0.13	1.09	35.1	589692	2203315
A	S3	9996	6.18	3.12	0.28	3.98	30.5	589746	2204638
B	S4	10379	6.36	1.55	0.16	1.98	51	589963	2204918
A	S5	850	3.56	8.7	0.48	11.08	56.8	589963	2204918
A	S6	3806	3.38	5.56	0.38	7.08	815	589689	2205107
A	S7	5385	3.89	2.23	0.61	2.85	110	589659	2203414
B	S8	161	2.57	3.47	0.35	4.42	434	586520	2206888
A	S9	4239	4.01	3.42	0.23	4.36	108	588493	2207077
B	S10	683	3.85	0.51	0.09	0.65	195	591819	2206563
A	S11	575	3.75	0.81	0.1	1.03	224	593589	2206969
B	S12	534	3.48	0.8	0.08	1.02	406	585494	2204709
A	S13	214	5.13	6.53	0.62	8.31	126	588403	2204712
B	S14	1634	5.5	1.31	0.17	1.67	229		
A	S15	584	5.15	3.44	0.38	4.38	264		
B	S16	1487	4.87	2.18	0.28	2.77	88.9		
A	S17	214	5.89	6.79	0.48	8.66	83.1		
B	S18	127	6.17	0.69	0.21	0.88	44.9		
A	S19	77	6.12	3.82	0.19	4.86	153		
B	S20	48	5.3	0.39	0.03	0.49	29.6		
A	S21	37	5.84	1.51	0.13	1.92	72.6		
B	S22	50	6.24	0.96	0.09	1.22	87.8		
A	S23	78	5.84	2.11	0.2	2.69	234		
B	S24	75	6.91	0.29	0.08	0.37	130		
A	S25	59	6.05	1.11	0.09	1.42	79.2		
B	S26	28	6.2	0.44	0.05	0.56	177		

A	S27	152	6.36	3.31	0.18	4.22	82.6	590968	2204615
B	S28	72	5.49	0.42	0.04	0.54	29.8		
A	S29	141	5.57	8.04	0.53	10.25	84.6	593184	2205137
B	S30	83	6.3	3.26	0.21	4.15	44.6		
A	S31	73	5.96	4.68	0.34	5.96	39.3	588403	2202573
B	S32	99	6.42	0.2	0.05	0.26	23.7		
A	S33	93	5.82	4.83	0.55	6.15	167	590917	2202442
A	S34	45	5.85	0.88	0.06	1.12	66	593576	2202405
A	S35	109	6.08	6.71	0.54	8.55	202	585669	2200467
B	S36	249	7.19	1.61	0.17	2.05	133		
A	S37	225	5.51	2.38	0.22	3.03	104	588536	2199993
A	S38	212	5.44	0.68	0.08	0.87	58.8	590954	2200077
A	S39	36	6.61	1.19	0.1	1.51	38.1	593473	2200144
B	S40	63	6.62	0.25	0.05	0.31	46		

**Tabla 4.** Resultados máximos y mínimos de Hg y parámetros de pH, MO (materia orgánica) y conductividad analizados en los diferentes horizontes.

<b>Horizonte A</b>						
	<b>Hg (ng/g)</b>	<b>pH</b>	<b>%C total</b>	<b>%N total</b>	<b>MO%</b>	<b>Conductividad</b>
<b>Máximo(S3)</b>	9996	6.2	3.1	0.3	4.0	30.5
<b>Mínimo(S39)</b>	36	6.6	1.2	0.1	1.5	38.1

<b>Horizonte B</b>						
	<b>Hg (ng/g)</b>	<b>pH</b>	<b>%C total</b>	<b>%N total</b>	<b>MO%</b>	<b>Conductividad</b>
<b>Máximo(S4)</b>	10379	6.4	1.6	0.2	2.0	51.0
<b>Mínimo(S26)</b>	28	6.2	0.4	0.0	0.6	27.9

**Tabla 5.** Matriz de coeficientes de correlación entre las variables del suelo de los horizontes A y B.

<b>Horizonte A</b>						
	<b>Hg (ng/g)</b>	<b>pH</b>	<b>%C total</b>	<b>%N total</b>	<b>MO%</b>	<b>Conductividad</b>
<b>Hg (ng/g)</b>	1					
<b>pH</b>	-0.29	1				
<b>%C total</b>	-0.04	-0.19	1			
<b>%N total</b>	0.13	-0.26	0.79	1		
<b>MO%</b>	-0.04	-0.19	1	0.79	1	
<b>Conductividad</b>	0.12	-0.49	0.14	0.14	0.1	1

<b>Horizonte B</b>						
	<b>Hg (ng/g)</b>	<b>pH</b>	<b>%C total</b>	<b>%N total</b>	<b>MO%</b>	<b>Conductividad</b>
<b>Hg (ng/g)</b>	1					
<b>pH</b>	0.10	1				
<b>%C total</b>	0.13	-0.34	1			
<b>%N total</b>	0.14	-0.37	0.87	1		
<b>MO%</b>	0.13	-0.34	1	0.87	1	

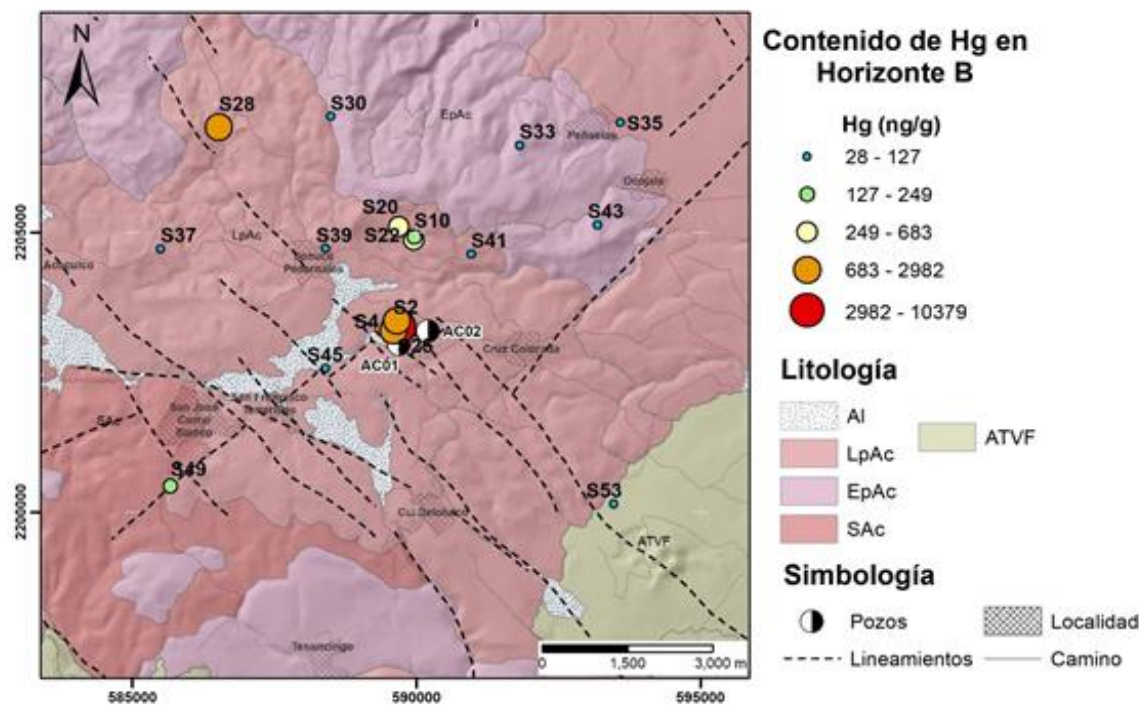
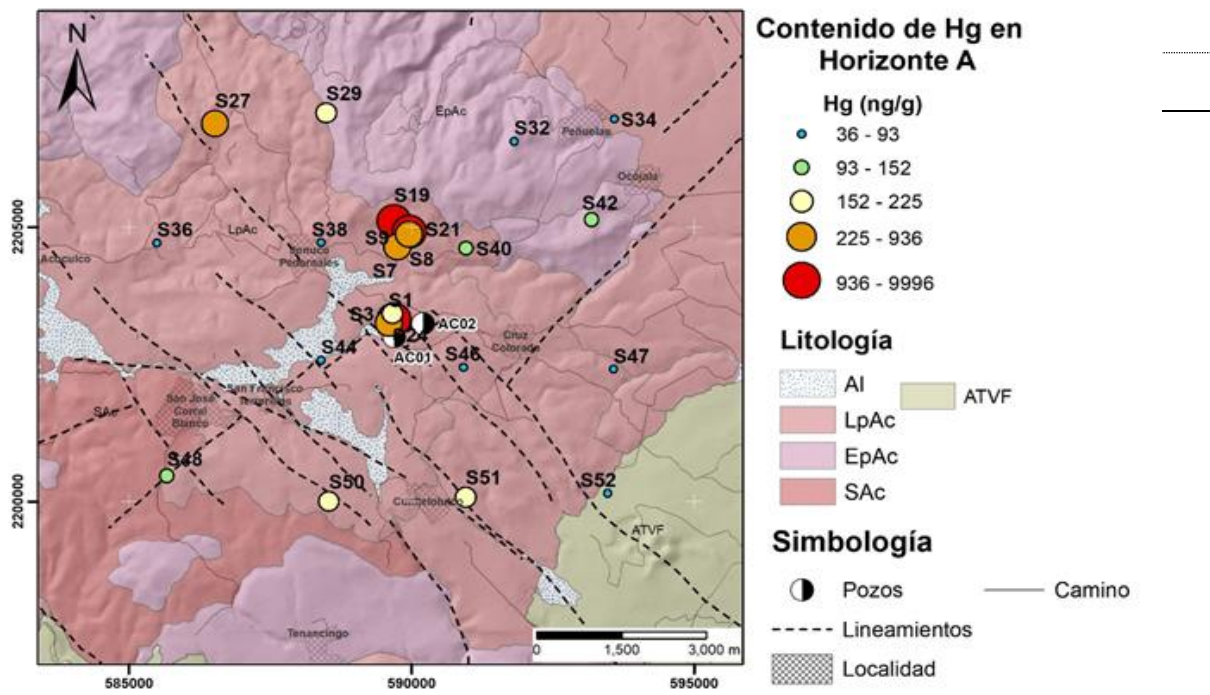


Figura 14. Localización de los puntos de muestreo y concentración de Hg en suelos de los horizontes A y B, superior e inferior, respectivamente. (Aluvión [Al], Traquiandesita, Riolita, ignimbrita riolítica, andesita [LpAc], Traquiandesita basáltica, basalto [EpAc], Ignimbrita andesítica [Sac], Traquiandesita basáltica [ATVF]).

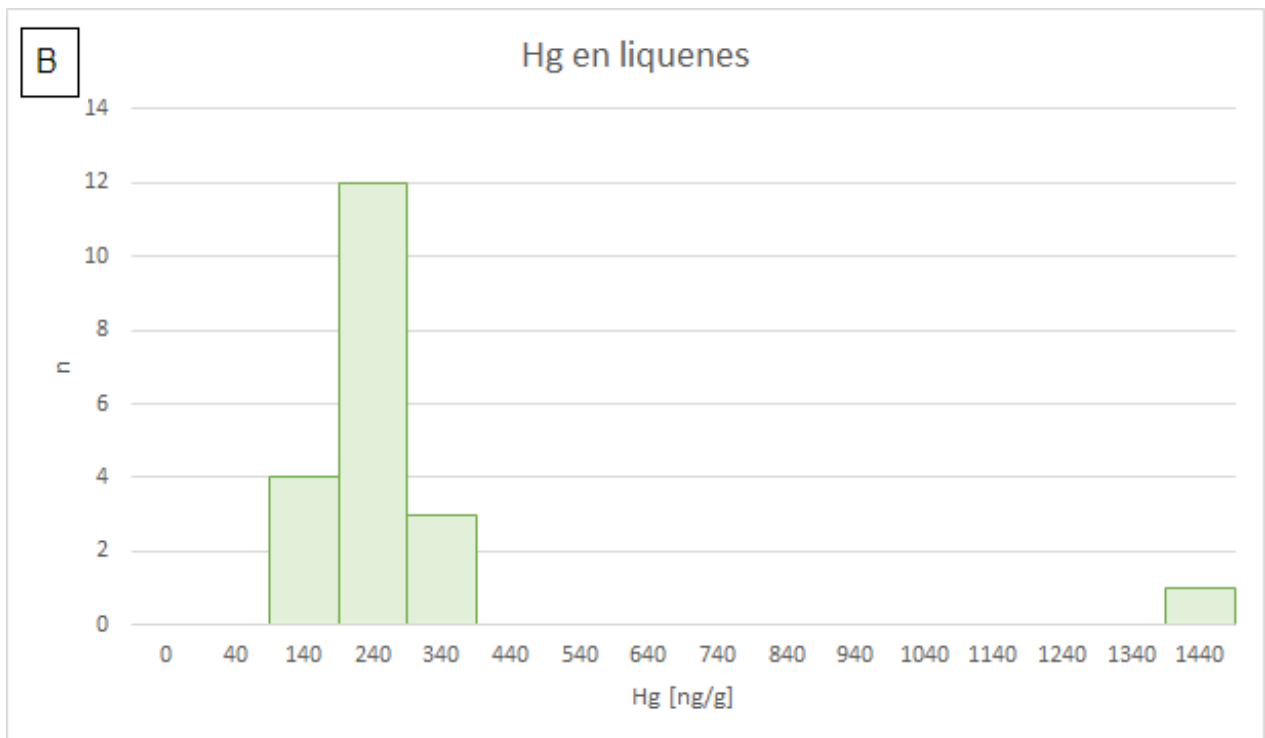
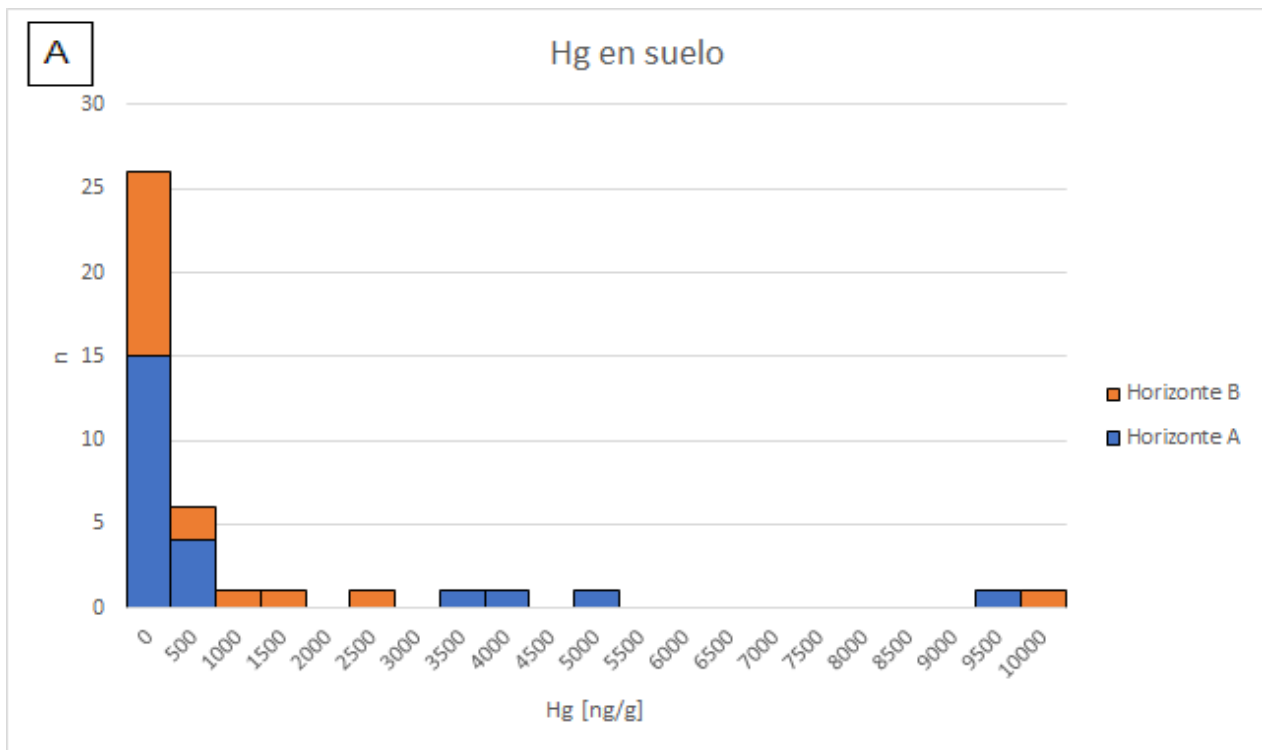


Figura 15. Histograma de la concentración de Hg [ng/g] A. Contenido de Hg en suelo. B. Contenido de Hg en líquenes.



La figura 16 muestra la dispersión del Hg en el horizonte A contra el horizonte B. Este diagrama de dispersión se realizó a partir de datos de los sitios de muestreo donde los dos horizontes del suelo están claramente diferenciados y pudieron muestrearse por separado. Las concentraciones de Hg muestran con correlación positiva significativa ( $r^2=0.63$ ) entre ambos horizontes.

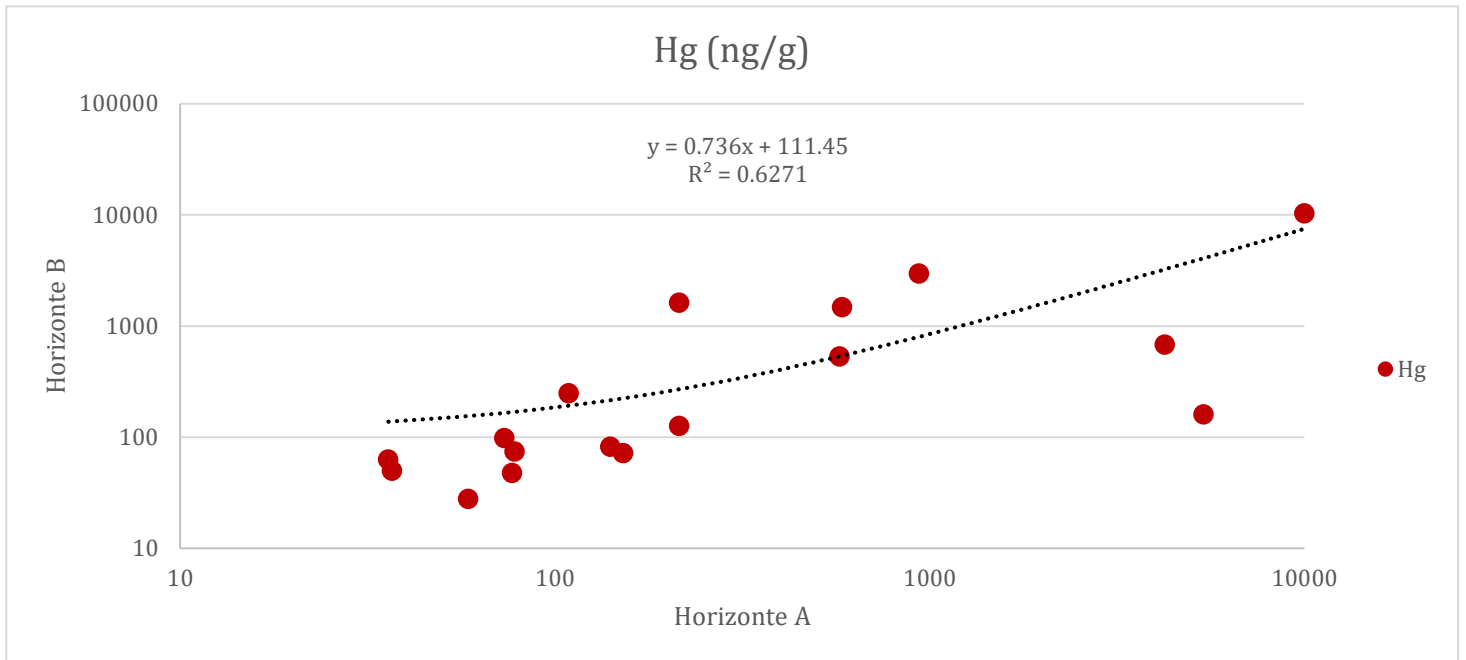


Figura 16. Diagrama bivariado de dispersión horizonte A vs horizonte B de la concentración de Hg [ng/g].

- Líquenes

Debido a las propiedades bioacumulativas que poseen los líquenes, las mediciones de Hg que se obtuvieron se pueden observar más homogéneas (Tabla 6). La localización de los puntos en donde se recolectaron las muestras de líquenes se muestra en la figura 17. Los puntos rojos y de mayor tamaño, contienen las anomalías de Hg dentro de la zona de Acapulco. Mientras que los puntos de color azul y de menor tamaño expresan cantidades menores de Hg.

**Tabla 6.** Concentración de Hg (ng/g) en líquenes de la Zona Geotérmica de Acoculco.

<b>Clave muestra</b>	<b>Hg (ng/g)</b>	<b>Coordenada X (UTM)</b>	<b>Coordenada Y (UTM)</b>
L1	1540	590287	2202372
L2	413	589659	2203414
L3	356	593575	2202405
L4	347	586386	2206892
L5	333	588477	2207082
L6	333	588373	2199994
L7	323	590947	2200080
L8	319	590931	2202432
L9	318	589746	2204638
L10	301	588403	2204714
L11	300	585540	2204762
L12	291	588397	2202535
L13	277	589692	2203315
L14	264	590963	2204609
L15	245	593589	2206969
L16	243	585671	2200398
L17	231	593476	2200163
L18	227	593181	2205172
L19	203	586077	2202528
L20	182	591818	2206561

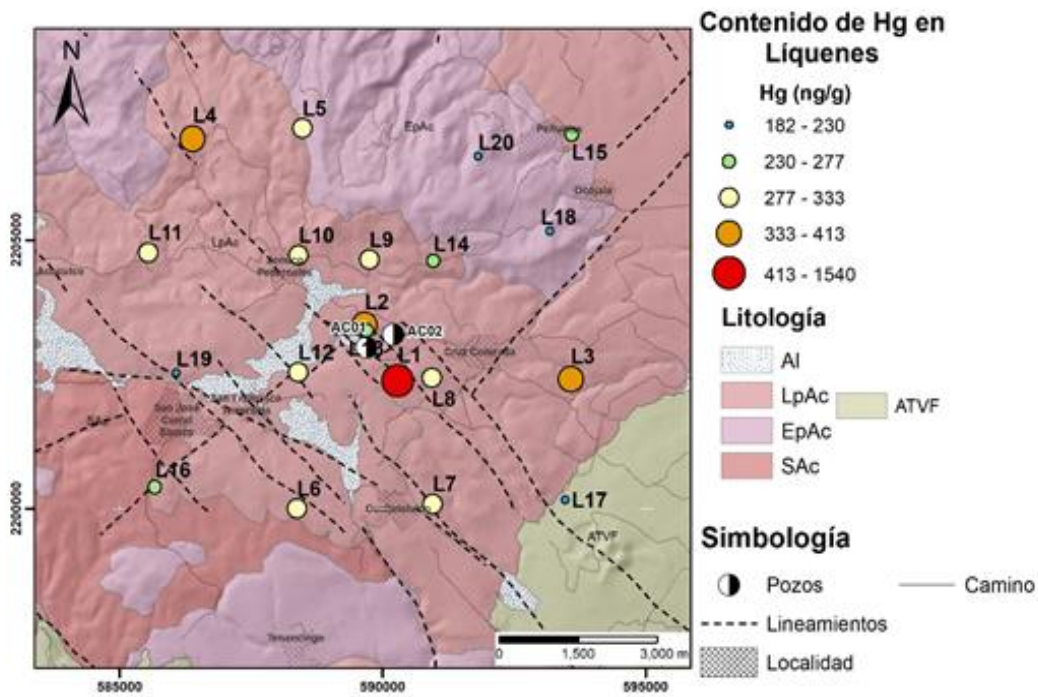
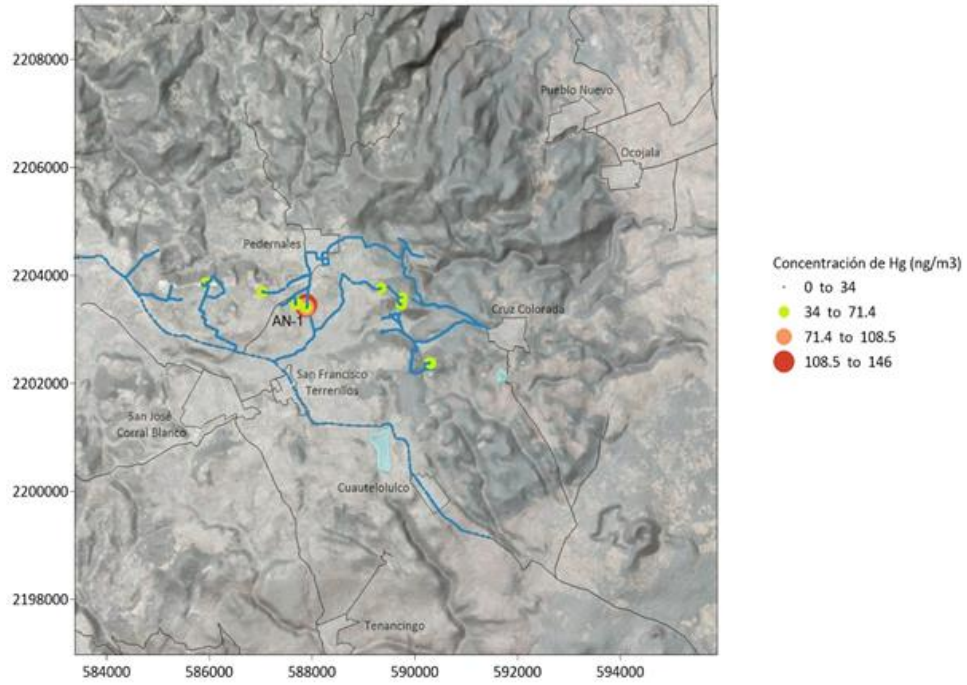


Figura 17. Localización de los puntos de muestreo y concentración de Hg en licores (Aluvi6n [Al], Traquiandesita, Riolita, ignimbrita riol6tica, andesita [LpAc], Traquiandesita basáltica, basalto [EpAc], Ignimbrita andes6tica [Sac], Traquiandesita basáltica [ATVF]).

- Mercurio en el ambiente atmosférico

Para el Hg en el ambiente atmosférico se hicieron dos recorridos. El primer recorrido fue realizado en agosto del 2018, el valor más alto de Hg que se detectó fue de 146 (ng/m<sup>3</sup>). El segundo recorrido se realizó en noviembre del mismo año, con una concentración máxima de 670 (ng/m<sup>3</sup>). La anomalía en el ambiente atmosférico para las dos fechas, se encuentra localizada en las minas de caolín (Figura 18). Mientras que el valor mínimo fue de 34 (ng/m<sup>3</sup>) y 30 (ng/m<sup>3</sup>) respectivamente.

Recorrido de agosto de 2018



Recorrido de noviembre de 2018

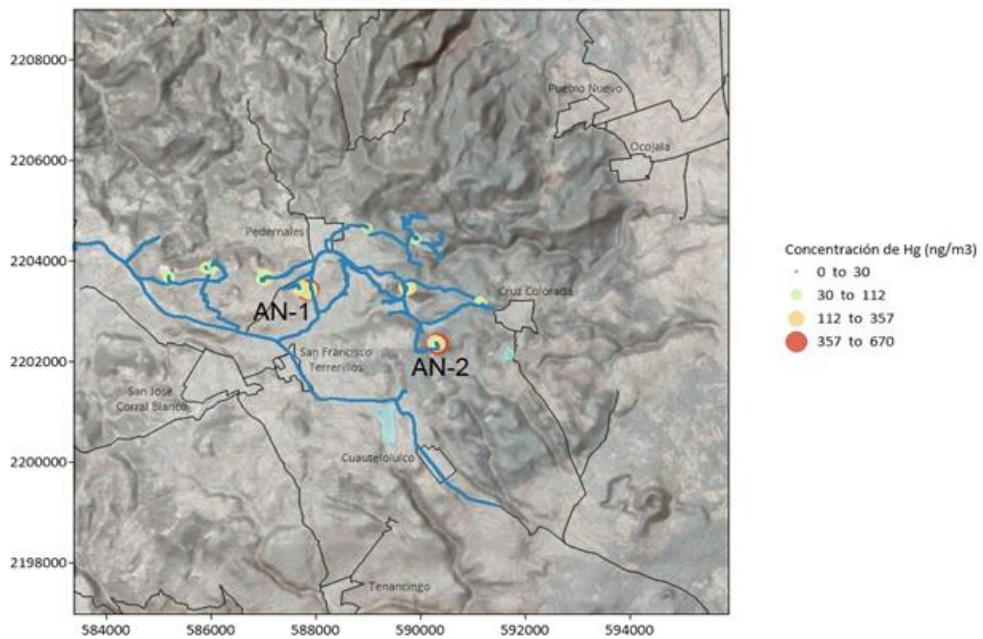


Figura 18. Concentración de Hg [ng/m<sup>3</sup>] en aire dentro la zona de estudio. Recorrido realizado en agosto y noviembre de 2018.

## 5. Discusión

El Hg es transportado a la superficie por un fluido hidrotermal (acuoso), el cual asciende a través de las diferentes fracturas que se encuentran dentro de la zona geotérmica. El sistema estructural de la ZGA consiste en una variedad de fallas normales que se extienden por casi 30 km (Avellán et al., 2020). Las fallas actúan como conductos por los cuales los fluidos geotérmicos escapan de un depósito profundo hacia niveles superficiales.

El valor más alto para el horizonte A es de 9996 ng/g (S3), mientras que para el horizonte B es de 10379 ng/g (S4); ambos valores pueden ser considerados atípicos, tomando en cuenta la distribución estadística (histograma) mostrada en la figura 15A. Estas concentraciones corresponden a un mismo punto de muestreo que se localiza dentro de la zona de los Azufres, en el centro de la zona de estudio. En esta zona se identifica alteración hidrotermal argílica avanzada (caolinita, amonio-jarosita y alunita). Para ambos horizontes se registró un pH de 6. Mientras que en los valores de la M.O. el horizonte A tuvo dos veces más que el horizonte B (3.98-1.98%, respectivamente). Esto debido a que el horizonte A llega a tener mayor contenido de hojarasca, ramas y raíces, por estar más cerca de la superficie.

Los valores de fondo de la ZGA son relativamente elevados, de alrededor de 30 ng/g de Hg. Específicamente, para el horizonte A se obtuvo una concentración de 36 ng/g (S39) y de 37 ng/g (S21), mientras que para el horizonte B la concentración fue de 28 ng/g (S26), localizados en la periferia, al NE de la zona de estudio, lejos de la zona con manifestaciones termales superficiales y alteración hidrotermal. Para los valores de fondo se registró un pH de 6, y se puede observar que la M.O. en el horizonte B es menor que en el horizonte A (0.56-1.51%), lo cual coincide con lo encontrado en la zona de Alcaparrosa.

Las variaciones en las distintas propiedades (pH, M.O. y conductividad) pueden influir en la concentración de Hg en los depósitos superficiales (Klusman y Landress, 1978, 1979). Sin embargo, de acuerdo con el análisis estadístico de los datos de Hg en suelo de este estudio, no hay una correlación entre la concentración de Hg y ninguno de los

parámetros del suelo en la ZGA (Tabla 6). Es por eso que se puede afirmar que, en la zona de estudio, las propiedades del suelo no afectan particularmente a los valores de Hg en suelos naturales. El análisis se realizó en un entorno natural (poco perturbado por las actividades humanas) y las propiedades del suelo cambian de manera significativa de un punto de muestreo a otro punto.

Por otro lado, tal como se muestra en la figura 16, el coeficiente de correlación ( $r^2$ ) entre el Hg en el horizonte A y en el horizonte B es positivo y significativo (0.62), lo que sugiere que la distribución espacial del Hg es gobernada por el enriquecimiento “primario” de Hg en las rocas como consecuencia de la actividad hidrotermal.

Para los líquenes, el valor máximo reportado fue de 1540 ng/g (L1), mientras que el liquen L2 tuvo un contenido de Hg de 413 ng/g, estas muestras fueron recolectadas cerca de la zona de Los Azufres. El valor mínimo reportado para líquenes fue de 182 ng/g (L20), en un liquen muestreado hacia el NE, en la periferia de la zona de estudio.

Las anomalías en suelos y líquenes coinciden con los lineamientos, con orientación NW-SE, establecidos dentro de la ZGA (Figuras 16 y 17). Los datos de lineamientos establecidos en la zona fueron tomados de Avellán et al. (2018), y los valores de fondo se localizan alejados de dichos lineamientos.

En la tabla 7 se muestran resultados de diferentes estudios que analizaron el contenido de Hg de los suelos; los datos son los máximos obtenidos en cada localidad. En la ZGA la concentración de Hg en suelos es más baja (10379 ng/g). Esto puede deberse a que la composición de los fluidos hidrotermales es diferente en las zonas antes mencionadas.

Durante los recorridos realizados en agosto y noviembre de 2018, las anomalías de aire coinciden con las minas de caolín que se encuentran dentro de la ZGA. Esto podría deberse a la remoción antropogénica constante del material en la zona, el cual presenta cinabrio visible en muestra de mano.

**Tabla 7.** Resultados de concentración de Hg en suelos, en localidades termales alrededor del mundo.

<b>Concentración de Hg [ng/g]</b>	<b>Lugar</b>	<b>Autor</b>
1900	Long Valley, California	Klusman and Landress, 1978
1130	Puna, Hawaii	Cox, 1981
800	Java, Indonesia	Herdianita and Piadi, 2008
860	Kamchatka, Rusia	Rychagov et al., 2009
1100	Montana/Wyoming, EUA	Nimick et al., 2013
300	Sulawesi, Indonesia	Suryantini, 2013
25200	Cierro Prieto, Baja California, México	Pastrana-Corral, et al., 2016

## 6. Conclusiones y recomendaciones

La ZGA presenta contenidos anómalos de Hg (10379 ng/g). El contenido de Hg en el suelo (ambos horizontes: A y B) no muestra correlación con los parámetros obtenidos (pH, contenido de materia orgánica y conductividad); esto se puede deber a que la formación de las anomalías de Hg en el suelo es el resultado de un proceso dinámico natural que se ha mantenido por un largo periodo de tiempo. Por otro lado, sí hay una correlación positiva significativa ( $r^2=0.62$ ) entre el contenido de Hg entre el horizonte A y el del horizonte B; este comportamiento es consistente con el hecho de que la fuente de Hg en los suelos sea un enriquecimiento “primario” en las alteraciones hidrotermales del lecho rocoso. Por lo tanto, en la ZGA las anomalías de Hg en los suelos construyen un vector efectivo de exploración geoquímica hacia las zonas de paleocirculación hidrotermal, no viéndose afectadas por los procesos edafológicos locales.

En la ZGA no se presentó la fijación del Hg en la materia orgánica, ya que los suelos con las mayores anomalías presentan bajo contenido en materia orgánica (1.98% para el horizonte B).

La mayor concentración de Hg en líquenes (L1 y L2) se localiza en la zona de Alcaparrosa.

Las anomalías de Hg en suelos muestran una correspondencia espacial con los valores anómalos encontrados en líquenes a escala de la zona geotérmica, coincidiendo con las zonas con manifestaciones superficiales (Los Azufres). Por lo que el Hg en suelo es un vector de exploración hacia las zonas de circulación hidrotermal.

Las anomalías detectadas en el ambiente atmosférico no coinciden con las anomalías en suelos y líquenes localizados en la zona de los Azufres. Las anomalías de aire coinciden con la zona de minas de caolín y sílice. Esto podría deberse a la remoción antropogénica constante del material en la zona, el cual presenta cinabrio visible en muestra de mano.

Se propone realizar un estudio más detallado respecto a las características físicas de los suelos, como la permeabilidad que tienen. Asimismo, se sugiere determinar el tipo de arcilla que se tiene en el lugar

Desde la parte técnica y con la meta de que la exploración geotérmica sea más rentable, confiable, sustentable y competitiva, es muy importante incrementar las tareas de investigación y desarrollo tecnológico para poder mejorar los métodos de exploración y explotación de los sistemas geotérmicos, incluyendo el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de los sistemas de roca caliente.



## Referencias

- Adriano, D.C. 1986. Trace Elements in the Terrestrial Environment. Springer-Verlag, New York
- Adriano, D. C. (2001). Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals. Second Edition. Aitken, SC, USA. Pág. 411-458.
- Aguirre-Díaz, G.J., Ferrari, L., Nelson, S.A., Carrasco-Núñez, G., Lopez-Martinez, M., & Urrutia-Fucugauchi, J. (1998). El cinturón volcánico mexicano: un nuevo proyecto multidisciplinario.
- AMAP/UNEP. Technical background report to the global atmospheric mercury assessment. Arctic Monitoring and Assessment Programme/UNEP Chemicals Branch. (2008).
- ArcGIS (Plataforma), (2016), [https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/map/working-with-layers/classifying-numerical-fields-for-graduated-symbols.htm#ESRI\\_SECTION1\\_38BC3498798545FA856D15B5D59976C1](https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/map/working-with-layers/classifying-numerical-fields-for-graduated-symbols.htm#ESRI_SECTION1_38BC3498798545FA856D15B5D59976C1)
- Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Cisneros, G., Sánchez-Núñez, J. M., Gómez-Vasconcelos, M. G., ... & Benowitz, J. (2019). Geology of the late Pliocene–Pleistocene Acoculco caldera complex, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México). *Journal of Maps*, 15(2), 8-18.
- Avellán, D.R., Macías, J.L., Layer, P.W., Sosa-Ceballos, G., Gómez-Vasconcelos, M.G., Cisneros-Máximo, G., ... & Pola, A. (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, 102412
- Axelsson, G. (2016). Nature and assessment of geothermal resources. *Short Course on Sustainability and Environmental Management of Geothermal Resource Utilization and the Role of Geothermal in Combating Climate Change*, organized by UNU-GTP and LaGeo, Santa Tecla, El Salvador.
- Bagnato, E., Allard, P., Parello, F., Aiuppa, A., Calabrese, S., & Hammouya, G. (2009). Mercury gas emissions from La Soufrière Volcano, Guadeloupe Island (Lesser Antilles). *Chemical Geology*, 266(3-4), 267-273.
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(1-2), 3-65.
- Barrales-Cureño, H. J., Reyes-Reyes, C., Díaz-Bautista, M., Sánchez-Herrera, L. M., Cortés-Ruiz, J. A., Gómez-de Jesús, A., & López-Valdez, L. G. (2017). IMPORTANCIA DE LOS LÍQUENES COMO BIOINDICADORES AMBIENTALES Y FUENTE PROMISORIA DE COMPUESTOS ANTICÁNCER. *AGROProductividad*, 10(10).
- Canet, C., Trillaud, F., Prol-Ledesma, R. M., González-Hernández, G., Peláez, B., Hernández-Cruz, B., & Sánchez-Córdova, M. M. (2015). 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.

Cox, P.A. 1995. *The Elements on Earth* Oxford Univ PR, Nex York

De la Cruz, M.V. y Castillo-Hernández, D. (1986). Estudio geológico de la zona geotérmica de la Caldera de Acoculco, Puebla. CFE-GPG reporte interno 36/86, pág. 23

Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84-92.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522, 122-149.

Gaona Martínez, J. (2004). El mercurio como contaminante global Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente (Tesis de doctorado). Universitat Autònoma de Barcelona, Departamento de Química. Barcelona, España.

García Hernández, S.A. (2020). Mediciones transitorias Eddy covariance de flujo de CO<sub>2</sub> registradas en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla: Análisis estadístico descriptivo (Tesis licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos, México.

GEMex, (2020), <http://www.gemex-h2020.mx/component/tags/tag/acoculco>

CeMIEGeo, (2018), <http://cemiegeo.org/index.php/proyectos/evaluacion-de-los-recursos-geotermicos-nacionales>

González Gordon, A. E. (2018). *Evaluación de la capacidad bioacumuladora de contaminantes en líquenes, utilizados en el monitoreo de la calidad del aire de la parroquia San Carlos, cantón La Joya de los Sachas, provincia de Orellana* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

Gray, J. E., Greaves, I. A., Bustos, D. M., & Krabbenhoft, D. P. (2003). Mercury and methylmercury contents in mine-waste calcine, water, and sediment collected from the Palawan Quicksilver Mine, Philippines. *Environmental Geology*, 43(3), 298-307.

Guía para la interpretación de cartografía: Edafología, 2004.

Gutiérrez-Negrín, L. C., Maya-González, R., & Quijano-León, J. L. (2010, April). Current status of geothermics in Mexico. In *Proc. World Geothermal Congress*.

Henley, R.W., & Ellis, A.J. (1983). Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. *Earth-science reviews*, 19(1), 1-50.

Hochstein, M.P., & Browne, P.R.L. (2000). Surface manifestations of geothermal systems with volcanic heat sources. *Encyclopedia of volcanoes*,

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2011). Guía para la interpretación de cartografía. Edafología escala 1: 250,000 serie II.

Juncal, R.W. (1980). Exploration for geothermal resources using arsenic and mercury soil geochemistry, Dixie Valley, Nevada (Doctoral dissertation, University of Nevada, Reno).

Klusman, R.W., & Landress, R.A. (1978). Secondary controls on mercury in soils of geothermal areas. *Journal of Geochemical Exploration*, 9(1), 75-91.

Ledesma-Guerrero, O., Hoja Calpulalpan 14Qh(3). Resumen de la geología de la hoja calpulalpan. Estados de México, Tlaxcala, Puebla e Hidalgo: Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Carta Geológica de México. Serie 1:100 000.

López Berdonces, M.A. (2015). Las interacciones aire/suelo/plantas-líquenes/Leguminosas-Rhizobium del mercurio en áreas contaminadas (Tesis de Doctorado). Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, España.

López Flores, O.G., (2016). Geoquímica del mercurio en ambientes geotérmicos: caso de la zona de Acozulco, Puebla-Hidalgo (Tesis licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

López-Hernández, A. (2009). Evolución volcánica del complejo Tulancingo-Acozulco y su sistema hidrotermal, Estados de Hidalgo y Puebla, México, Centro de Geociencias, UNAM, Tesis doctoral, 1-152.

Martínez Coronado, A. (2012), Mercurio atmosférico en el distrito minero de Almadén, comparación con otras áreas, Oviedo, España, Departamento de exploración y Prospección de minas (UNIOVI), 74-82.

Misra, K.C. (2000). Understanding Mineral Deposits, Formation of Mineral Deposits, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 58-74.

Morel, F.M., Kraepiel, A.M., & Amyot, M. (1998). The chemical cycle and bioaccumulation of mercury. *Annual review of ecology and systematics*, 29(1), 543-566.

Murray, K.S. (1997). The use of soil Hg to delineate zones of upwelling in low-to-moderate temperature geothermal systems. *Geothermics*, 26(2), 193-202.

Navarro-Flores, A., Martínez-Frías, J., Font, X., & Viladevall, M. (2000). Modelling of modern mercury vapor transport in an ancient hydrothermal system: environmental and geochemical implications. *Applied Geochemistry*, 15(3), 281-294.

Nevada Bureau of Mines and Geology. (1998). Mineral and energy resource assessment of the Nellis Air Force Range, US Air Force Combat Command, Clark, Lincoln and Nye Counties, Nevada.

NRCC (1979). Effects of Mercury in the Canadian Environment. Nat. Res. Council Canada. No. 16739, 290 pages

Palomo, A.G., 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.

Pasquarè, G. (direction); Ferrari, L. (compilation) et al., 1991, Geological map of the central sector of Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacan. Geological Society of America Map and Chart series, MCH 72. Pasquarè G. (direction), Ferrari L. (compilation) et al., 1991. Geological map of the central sector of Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán: Geol. Soc. Am. Map and Chart series, MCH 72.

Polak, B. G., Kononov, V. I., Prasolov, E. M., Sharkov, I. V., Prol-Ledesma, R. M., González, A., ... & Molina-Berbeller, R. (1985). First estimations of terrestrial heat flow in the TMVB and adjacent areas based on isotopic composition of natural helium. *Geofísica Internacional*, 24(4).

Porta, J., Poch, R.M., & López-Acevedo, M. (2019). *Edafología: uso y protección de suelos*. Mundi-Prensa Libros.

Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Chignahuapan, Pue., 2009, INEGI.

Pulido, C.L., Armenta, M.F., & Silva, G.R. (2011). Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Aocolco, Pue. *Geotermia*, 24(1), 59-69.

Rocha-López, S., Jiménez-Salgado, E., & Palma-Guzmán, H. (2006). Propuesta para dos pozos exploratorios en el proyecto geotérmico de Aocolco, Pue. CFE, informe interno No. OGL-ACO-03/06. Inédito.

Rollinson, H.R. (2014). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Routledge.

Rychagov, S.N., Nuzhdaev, A.A., & Stepanov, I. I. (2009). Behavior of mercury in the supergene zone of geothermal deposits, southern Kamchatka. *Geochemistry International*, 47(5), 504-512.

Sánchez-Córdova, M.M., Canet, C., Rodríguez-Díaz, A., González-Partida, E., Linares-López, C. (2020): Water-rock interactions in the Acoculco geothermal system, eastern Mexico: insights from paragenesis and elemental mass-balance. *Geochemistry (Chemie der Erde)*, 80 (1), 125527.

Santos Raga, G. (2019). Evaluación geoquimométrica de la composición de fluidos (elementos mayores y traza para la exploración de sistemas geotérmicos ocultos: El caso de Acoculco, Puebla (México) (Tesis de Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos, México.

Santoyo, É., & Barragán-Reyes, R. M. (2019). GEOTÉRMICA.

Sholupov, S., Pogarev, S., Ryzhov, V., Mashyanov, N., & Stroganov, A. (2004). Zeeman atomic absorption spectrometer RA-915+ for direct determination of mercury in air and complex matrix samples. *Fuel Processing Technology*, 85(6-7), 473-485.

Siebe, C., & Jahn, R. (1996). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (No. Folleto 15842).

Tello-Hinojosa, E. (1994). Química de los fluidos hidrotermales de la zona geotérmica de la Caldera de Acoculco, Pue., CFE, informe interno No. GQ-013/1994, Octubre/1994, Inédito.

Toth, A., & Bobok, E. (2016). Flow and heat transfer in geothermal systems: basic equations for describing and modeling geothermal phenomena and technologies. Elsevier.

Van Kooten, G.K. (1987). Geothermal exploration using surface mercury geochemistry. *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 31(3-4), 269-280.

Varekamp, J.C., & Buseck, P.R. (1983). Hg anomalies in soils: a geochemical exploration method for geothermal areas. *Geothermics*, 12(1), 29-47.

Viggiano-Guerra, J.C., Armenta, M.F., & Silva, G.R. (2011). Evolución del sistema geotérmico de Acoculco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones. *Geotermia*, 24(1), 14-24.

Weimer, R.C. 1993. Estadística. Segunda Edición. Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. México D.F., México. 839 pp.

WHITE, D. (1981). Active geothermal systems and hydrothermal ore deposits.

Wright, N., Yeoman, W. B., & Carter, G. F. (1980). Massive oral ingestion of elemental mercury without poisoning. *Lancet* (London, England), 1(8161), 206-206.

## Anexos

Clave	S1	
Coordenadas	X	Y
	589598	2203248
Descripción	Laboratorio	
Horizonte A color pardo oscuro, de textura arcillosa. Presenta alto contenido de materia orgánica y raíces.	pH	5.49
	Conductividad	38.6
	M.O	5.68
	Hg (ng/g)	936.4
	Hg (mg/Kg)	0.9364

Fotografía





Clave	S2	
Coordenadas	X	Y
	589598	2203248
Variables físicas	Laboratorio	
Horizonte B de color pardo de textura limosa, con fragmentos de roca menores a 1cm.	pH	5.91
	Conductividad	35.1
	M.O	1.09
	Hg (ng/g)	2982.3
	Hg (mg/Kg)	2.98

Fotografía





Clave	S3	
Coordenadas	X	Y
	589692	2203315
Descripción	Laboratorio	
Horizonte A de color oscuro de textura arenosa, con contenido de raíces y con fragmentos de roca menores a 10 cm.	pH	6.18
	Conductividad	30.5
	M.O	3.98
	Hg (ng/g)	9996
	Hg (mg/Kg)	9.996
Fotografía		
		

Clave	S4	
Coordenadas	X	Y
	589598	2203248
Descripción	Laboratorio	
Horizonte B de color pardo, con textura limosa, con fragmentos de roca menores a 2cm y contenido de raíces	pH	6.36
	Conductividad	51.0
	M.O	3.98
	Hg (ng/g)	10379
	Hg (mg/Kg)	10.379
Fotografía		
		

Clave	S5	
Coordenadas	X	Y
	589746	2204638
Descripción	Laboratorio	
Horizone A color pardo oscuro con fragmentos de raíces y alto contenido de materia orgánica.	pH	3.56
	Conductividad	56.8
	M.O	11.08
	Hg (ng/g)	850.17
	Hg (mg/Kg)	0.85

Fotografía



Clave	S6	
Coordenadas	X	Y
	589963	2204918
Descripción	Laboratorio	
Horizonte color gris oscuro con alto contenido de materia orgánica con fragmentos de roca alterada que van desde 0.5-1 cm (riolita)	pH	3.38
	Conductividad	815
	M.O	7.08
	Hg (ng/g)	3806
	Hg (mg/Kg)	3.806

Fotografía





Clave	S7	
Coordenadas	X	Y
	589963	2204918
Descripción	Laboratorio	
Horizonte A color pardo claro con fragmentos de roca de tamaño menor a 2cm (riolita), material poco consolidado.	pH	3.89
	Conductividad	110
	M.O	2.85
	Hg (ng/g)	5384.67
	Hg (mg/Kg)	5.38


Fotografía




Clave	S8	
Coordenadas	X	Y
	589963	2204918
Variables físicas	Laboratorio	
Horizonte B color gris oscuro con alto contenido de materia orgánica y fragmentos menores a 2cm (riolita).	pH	2.57
	Conductividad	434
	M.O	4.42
	Hg (ng/g)	160.7
	Hg (mg/Kg)	0.1607

Fotografía



Clave	S9	
Coordenadas	X	Y
	589689	2205107
Descripción	Laboratorio	
Horizonte A de color pardo claro, malconsolidado, con fragmentos de rocas menores a 1 cm. Presenta contenido de materia orgánica (raíces).	pH	4.01
	Conductividad	108
	M.O	4.36
	Hg (ng/g)	4239.3
	Hg (mg/Kg)	4.2393
Fotografía		
		


Clave	S10	
Coordenadas	X	Y
	589689	2205107
Descripción	Laboratorio	
Horizonte B de color marrón oscuro, medianamente consolidado, con fragmentos de roca menor a 2 cm, mal clasificado	pH	3.85
	Conductividad	195
	M.O	0.65
	Hg (ng/g)	682.87
	Hg (mg/Kg)	0.683
Fotografía		
		



Clave	S11	
Coordenadas	X	Y
	589954	2204864
Descripción	Laboratorio	
Horizonte A de color pardo oscuro, con textura arcillosa y con fragmentos de raíces.	pH	3.75
	Conductividad	224
	M.O	1.03
	Hg (ng/g)	575
	Hg (mg/Kg)	0.575

Fotografía



Clave	S12	
Coordenadas	X	Y
	589954	2204864
Descripción	Laboratorio	
Horizonte B de color gris, con textura arcillosa, poco consolidado y presumiblemente con contenido de barita	pH	3.48
	Conductividad	406
	M.O	1.02
	Hg (ng/g)	534.07
	Hg (mg/Kg)	0.534
Fotografía		
		

Clave	S13	
Coordenadas	X	Y
	589659	2203414
Descripción	Laboratorio	
Horizonte A de color pardo oscuro, de textura arcillosa, con fragmentos de rocas menores a 2cm, presentando alto contenido de materia orgánica.	pH	5.13
	Conductividad	126
	M.O	8.31
	Hg (ng/g)	214.3
	Hg (mg/Kg)	0.214

Fotografía



Clave	S14	
Coordenadas	X	Y
	589659	2203414
Descripción	Laboratorio	
Horizonte B de color pardo, con textura limosa, presenta fragmentos de roca menor a 3 cm. Presenta contenido de raíces.	pH	5.50
	Conductividad	229
	M.O	1.67
	Hg (ng/g)	1633.7
	Hg (mg/Kg)	1.6

Fotografía





Clave		S15	
Coordenadas		X	Y
		586520	2206888
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	15	pH	5.15
Textura	R	Conductividad	264
Color (húmedo)	25YR   4/3	M.O	4.38
pH		Hg (ng/g)	583.7
m.o		Hg (mg/Kg)	0.584
Húmedad-pF	Fresca   3		
Estructura-tamaño	migajón-fino		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	pocos-muy finos		
Densidad aparente	media		
Densidad de raíces	muy alta		
Límite	difuso		

Fotografía



Clave		S16	
Coordenadas		X	Y
		2206888	19.95656606
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	40	pH	4.87
Textura	CR	Conductividad	88.9
Color (húmedo)	5Y 5/4	M.O	2.77
pH		Hg (ng/g)	1486.7
m.o		Hg (mg/Kg)	1.487
Húmedad-pF	Seca  4		
Estructura-tamaño	granular-muy fina		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	pocos -muy finos		
Densidad aparente	baja		
Densidad de raíces	alta		
Límite	difuso		

Fotografía






Clave		S17	
Coordenadas		X	Y
		588493	2207077
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	30	pH	5.9
Textura	CA	Conductividad	83.1
Color (húmedo)	7.5 Y   3/2	M.O	8.7
pH		Hg (ng/g)	214.5
m.o		Hg (mg/Kg)	0.2
Húmedad-pF	húmeda   1		
Estructura-tamaño	granular-fina		
Estabilidad de agregados	baja		
Poros (abundancia-tamaño)	muy pocos-finos		
Densidad aparente	baja		
Densidad de raíces	alta		
Límite	difuso		

Fotografía



Clave		S18	
Coordenadas		X	Y
		588493	2207077
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	100	pH	6.17
Textura	CA	Conductividad	44.9
Color (húmedo)	25 YR   5/4	M.O	0.88
pH		Hg (ng/g)	127.3
m.o		Hg (mg/Kg)	0.1273
Húmedad-pF	Fresca  3		
Estructura-tamaño	migajón-grueso		
Estabilidad de agregados	media		
Poros (abundancia-tamaño)	pocos-medios		
Densidad aparente	media		
Densidad de raíces	baja		
Límite	difuso		
Fotografía			
			



Clave		S19	
Coordenadas		X	Y
		591819	2206563
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	35	pH	6.12
Textura	AC	Conductividad	153
Color (húmedo)	25 YR   4/2	M.O	4.86
pH		Hg (ng/g)	76.87
m.o		Hg (mg/Kg)	0.077
Húmedad-pF	húmedad   2		
Estructura-tamaño	angular-granular-grueso		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	comunes-finos		
Densidad aparente	moderada		
Densidad de raíces	muy alta		
Límite	difuso		

Fotografía



Clave		S20	
Coordenadas		X	Y
		591819	2206563
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)		pH	5.30
Textura	AC	Conductividad	29.6
Color (húmedo)	7.5 YR  6/2	M.O	0.49
pH		Hg (ng/g)	47.77
m.o		Hg (mg/Kg)	0.048
Húmedad-pF	fresca  3		
Estructura-tamaño	angular-granular-grueso		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	comunes-finos		
Densidad aparente	baja		
Densidad de raíces	alta		
Límite	difuso		
Fotografía			





Clave		S21	
Coordenadas		X	Y
		593589	2206969
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	10	pH	5.84
Textura	RA	Conductividad	72.6
Color (húmedo)	25YR   4/3	M.O	1.92
pH		Hg (ng/g)	36.73
m.o		Hg (mg/Kg)	0.037
Húmedad-pF	Fresca   3		
Estructura-tamaño	granular-fino		
Estabilidad de agregados	alta-media		
Poros (abundancia-tamaño)	nulo		
Densidad aparente	mediana		
Densidad de raíces	alta		
Límite	difuso		

Fotografía



Clave		S22	
Coordenadas		X	Y
		593589	2206969
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	35	pH	6.24
Textura	RA	Conductividad	87.8
Color (húmedo)	25YR   4/4	M.O	1.22
pH		Hg (ng/g)	50.3
m.o		Hg (mg/Kg)	0.0503
Húmedad-pF	Fresca  3		
Estructura-tamaño	granular-media		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	nulo		
Densidad aparente	alta		
Densidad de raíces	mediana		
Límite	difuso		

Fotografía





Clave		S23	
Coordenadas		X	Y
		585494	2204709
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	20	pH	5.84
Textura	CRA	Conductividad	234.35
Color (húmedo)	25YR  4/2	M.O	2.69
pH		Hg (ng/g)	78.03
m.o		Hg (mg/Kg)	0.08
Húmedad-pF	Fresca  3		
Estructura-tamaño	migajón-fina		
Estabilidad de agregados	media		
Poros (abundancia-tamaño)	comúnes-myu finos		
Densidad aparente	alta		
Densidad de raíces	alta		
Límite	difuso		

Fotografía



Clave		S24	
Coordenadas		X	Y
		585494	2204709
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	50	pH	6.91
Textura	CA	Conductividad	129.75
Color (húmedo)	25YR 5/3	M.O	0.37
pH		Hg (ng/g)	74.53
m.o		Hg (mg/Kg)	0.07
Húmedad-pF	Seca  4		
Estructura-tamaño	granular-fina		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	comúnes-finos		
Densidad aparente	alta		
Densidad de raíces	baja		
Límite	difuso		

Fotografía





Clave		S25	
Coordenadas		X	Y
		588403	2204712
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	15	pH	6.05
Textura	RA	Conductividad	79.2
Color (húmedo)	25 YR   6/2	M.O	1.42
pH		Hg (ng/g)	58.7
m.o		Hg (mg/Kg)	0.0587
Húmedad-pF	Seca   4		
Estructura-tamaño	granular-fino		
Estabilidad de agregados	moderado		
Poros (abundancia-tamaño)	pocos-media		
Densidad aparente	mediana		
Densidad de raíces	muy alta		
Límite	gradual		

Fotografía





Clave		S26	
Coordenadas		X	Y
		588403	2204712
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	35	pH	6.20
Textura	RA	Conductividad	177
Color (húmedo)	25 YR   6/3	M.O	0.56
pH		Hg (ng/g)	27.9
m.o		Hg (mg/Kg)	0.0279
Húmedad-pF	Fresca-Seca   3-4		
Estructura-tamaño	migajón-fino		
Estabilidad de agregados	moderado		
Poros (abundancia-tamaño)	pocos-finos		
Densidad aparente	mediana		
Densidad de raíces	alta		
Límite	difuso		


Fotografía







Clave		S27	
Coordenadas		X	Y
		590968	2204615
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	20	pH	6.36
Textura	CRL	Conductividad	82.55
Color (húmedo)	7.5 YR  5/4	M.O	4.22
pH		Hg (ng/g)	152.03
m.o		Hg (mg/Kg)	0.15
Húmedad-pF	Fresca  3		
Estructura-tamaño	migajón-muy fino		
Estabilidad de agregados	media		
Poros (abundancia-tamaño)	comunes-muy finos		
Densidad aparente	baja		
Densidad de raíces	muy alta		
Límite	claro		
Fotografía			
			


Clave		S28	
Coordenadas		X	Y
		590968	2204615
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	45	pH	5.49
Textura	CRA	Conductividad	29.75
Color (húmedo)	25 YR  4/6	M.O	0.54
pH		Hg (ng/g)	72.27
m.o		Hg (mg/Kg)	0.07
Húmedad-pF	Fresca  3		
Estructura-tamaño	migajón-fino		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	pocos-muy finos		
Densidad aparente	alta-media		
Densidad de raíces	muy alta		
Límite			
Fotografía			
			

Clave		S29	
Coordenadas		X	Y
		593184	2205137
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	35	pH	5.57
Textura	RA	Conductividad	84.6
Color (húmedo)	25 YR  4/2	M.O	10.25
pH		Hg (ng/g)	140.63
m.o		Hg (mg/Kg)	0.141
Húmedad-pF	Fresca  3		
Estructura-tamaño	migajón-fina		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	comunes-finos		
Densidad aparente	baja		
Densidad de raíces	alta		
Límite	claro		
Fotografía			
			


Clave		S30	
Coordenadas		X	Y
		593184	2205137
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	60	pH	6.30
Textura	CRA	Conductividad	44.60
Color (húmedo)	25 YR   4/3	M.O	4.15
pH		Hg (ng/g)	82.63
m.o		Hg (mg/Kg)	0.08
Húmedad-pF	Seca   4		
Estructura-tamaño	granular-fino		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	comunes-finos		
Densidad aparente	baja		
Densidad de raíces	alta		
Límite	Horizonte B		
Fotografía			
			

Clave		S31	
Coordenadas		X	Y
		588403	2202573
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	20	pH	5.96
Textura	RA	Conductividad	39.3
Color (húmedo)	5Y   1/2	M.O	5.96
pH		Hg (ng/g)	73.2
m.o		Hg (mg/Kg)	0.073
Húmedad-pF	Fresca  3		
Estructura-tamaño	migajón-fina		
Estabilidad de agregados	alta		
Poros (abundancia-tamaño)	pocos-muy finos		
Densidad aparente	baja		
Densidad de raíces	muy alta		
Límite	claro		
Fotografía			
			


Clave		S32	
Coordenadas		X	Y
		588403	2202573
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	57	pH	6.42
Textura	CS	Conductividad	23.65
Color (húmedo)	5Y   6/1	M.O	0.26
pH		Hg (ng/g)	98.67
m.o		Hg (mg/Kg)	0.10
Húmedad-pF	Seca  4		
Estructura-tamaño	granular-grueso		
Estabilidad de agregados	alta		
Poros (abundancia-tamaño)	comúnes-finos		
Densidad aparente	baja		
Densidad de raíces	alta		
Límite	horizonte B		
Fotografía			
			


Clave		S33	
Coordenadas		X	Y
		590917	2202442
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	25	pH	5.82
Textura	RA	Conductividad	167
Color (húmedo)	25YR   4/1	M.O	6.15
pH		Hg (ng/g)	92.7
m.o		Hg (mg/Kg)	0.0927
Húmedad-pF	Fresca-Seca   3-4		
Estructura-tamaño	subangular en bloques-fino		
Estabilidad de agregados	alta		
Poros (abundancia-tamaño)	nulo		
Densidad aparente	mediana		
Densidad de raíces	alta		
Límite	no se observa		
Fotografía			
			





Clave		S34	
Coordenadas		X	Y
		593576	2202405
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	25	pH	5.85
Textura	CRL	Conductividad	66.00
Color (húmedo)	10YR  5/6	M.O	1.12
pH		Hg (ng/g)	44.73
m.o		Hg (mg/Kg)	0.04
Húmedad-pF	Seca  4		
Estructura-tamaño	granular-fino		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	nulo		
Densidad aparente	alta		
Densidad de raíces	alta		
Límite	difuso		
Fotografía			
			




Clave		S35	
Coordenadas		X	Y
		585669	2200467
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	25	pH	6.08
Textura	CRL	Conductividad	202
Color (húmedo)	25YR   5/3	M.O	8.55
pH		Hg (ng/g)	108.8
m.o		Hg (mg/Kg)	0.109
Húmedad-pF	Seca   4		
Estructura-tamaño	migajón-grueso		
Estabilidad de agregados	alta		
Poros (abundancia-tamaño)	pocos-muy finos		
Densidad aparente	moderada		
Densidad de raíces	alta		
Límite	difuso		
Fotografía			
			

Clave		S36	
Coordenadas		X	Y
		585669	2200467
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	55	pH	7.19
Textura	CRA	Conductividad	133
Color (húmedo)	25YR   3/3	M.O	2.05
pH		Hg (ng/g)	248.73
m.o		Hg (mg/Kg)	0.249
Húmedad-pF	Fresca   3		
Estructura-tamaño	subangular en bloque-gruesa		
Estabilidad de agregados	alta		
Poros (abundancia-tamaño)	comúnes-muy finos		
Densidad aparente	moderada		
Densidad de raíces	alta		
Límite	difuso		
Fotografía			
			

Clave		S37	
Coordenadas		X	Y
		588536	2199993
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	30	pH	5.51
Textura	CR	Conductividad	104
Color (húmedo)	25YR   4/3	M.O	3.03
pH		Hg (ng/g)	225.13
m.o		Hg (mg/Kg)	0.2251
Húmedad-pF	Seca  4		
Estructura-tamaño	granular-fino		
Estabilidad de agregados	alta		
Poros (abundancia-tamaño)	nulo		
Densidad aparente	alta		
Densidad de raíces	muy alta		
Límite	no se observa		
Fotografía			
			

Clave		S38	
Coordenadas		X	Y
		590954	2200077
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	40	pH	5.44
Textura	CL	Conductividad	58.8
Color (húmedo)	10YR  5/3	M.O	0.87
pH		Hg (ng/g)	212.43
m.o		Hg (mg/Kg)	0.212
Húmedad-pF	Seca  4		
Estructura-tamaño	granular-fina		
Estabilidad de agregados	moderada		
Poros (abundancia-tamaño)	nulo		
Densidad aparente	mediana		
Densidad de raíces	mediana		
Límite	no se observa		
Fotografía			
			

Clave		S39	
Coordenadas		X	Y
		593473	2200144
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	25	pH	6.61
Textura	L	Conductividad	38.1
Color (húmedo)	10YR   4/4	M.O	1.51
pH		Hg (ng/g)	35.9
m.o		Hg (mg/Kg)	0.0359
Húmedad-pF	Muy seca   5		
Estructura-tamaño	columnar-muy fino		
Estabilidad de agregados	baja		
Poros (abundancia-tamaño)	nulo		
Densidad aparente	alta (>1.9)		
Densidad de raíces	alta		
Límite	difuso		
Fotografía			
			

Clave		S49	
Coordenadas		X	Y
		593473	2200144
Variables físicas		Laboratorio	
Profundidad (cm)	75	pH	6.62
Textura	CRL	Conductividad	46.0
Color (húmedo)	25YR   6/3	M.O	0.31
pH		Hg (ng/g)	63.2
m.o		Hg (mg/Kg)	0.06
Húmedad-pF	Muy seca   5		
Estructura-tamaño	granular-muy fino		
Estabilidad de agregados	baja		
Poros (abundancia-tamaño)	nulo		
Densidad aparente	alta (<1.9)		
Densidad de raíces	baja		
Límite	abrupto		
Fotografía			
