



**UNIVERSIDAD DE SONORA**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y  
NATURALES**

**Departamento de Geología**

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE  
SUELOS EN LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
ACOCULCO, PUEBLA, MÉXICO**

***TESIS***

**Que para obtener el título de:**

**GEÓLOGO**

**PRESENTA:**

**ROLANDO PERALTA DE HOYOS**

**EXPEDIENTE: 212213887**



**HERMOSILLO, SONORA.**

**AGOSTO, 2021**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DE SUELOS EN LA ZONA GEOTÉRMICA DE ACOCULCO, PUEBLA, MÉXICO

## RESUMEN

El suelo es uno de los entes naturales dinámico y vivo que juega un papel muy importante en los ecosistemas terrestres. El problema de contaminación de los suelos no solo es propio de las zonas rurales del mundo, de las zonas industrializadas o densamente pobladas, en ocasiones se debe a fenómenos naturales o impactos humanos. Evaluar las características fisicoquímicas y la composición química de los suelos permite identificar procesos que estén afectando su calidad. En el caso de las zonas en donde hay manifestaciones hidrotermales naturales; es de gran importancia hacer una caracterización de los suelos, debido a la presencia potencial de elementos químicos que pueden transportarse o insertarse en la cadena alimenticia, sin perder de vista los impactos humanos de la región. Para caracterizar el suelo, la textura es un parámetro que permite conocer la distribución del tamaño de partícula y clasificarlos; aunado a esto, el pH, la conductividad eléctrica y la cantidad de materia orgánica dan una idea de los posibles procesos que siguen los elementos químicos presentes. La zona geotérmica que se estudió se localiza en Acapulco, Puebla en donde la manifestación hidrotermal se caracteriza por temperaturas de 25 °C y pH ácido e hiperácido por el burbujeo de ácido sulfhídrico y otros gases en las aguas. Los cálculos del factor de enriquecimiento, el índice de geoacumulación y el factor antropogénico, permitieron la identificación de elementos de origen geotérmico (As, Ba, S, Fe y Mn), de origen geológico (Nb, Rb, Y) y de posible origen antropogénico (Br, Cr, Cl, V, y K). Sobresalen concentraciones de elementos traza como Se, Sc, Sb, Ho y Mo. La lluvia juega un papel muy importante, ya que se incrementan las concentraciones de la mayoría de los elementos químicos en el suelo y se identifican mayor número de correlaciones en la fracción profunda. El Ba se detectó en un orden de miles de partes por millón, el Mn, Sr, Rb, Zn, V y Cl en cientos de partes por millón. El sitio estudiado, muestra características específicas de hidrotermalismo de baja temperatura en la superficie, con condiciones ácidas que pueden promover la movilidad de los elementos traza. Al tener suelos franco arenosos, se promueve la infiltración de agua y las reacciones químicas en la fracción profunda entre 40 y 50 cm.

**Palabras clave:** parámetros fisicoquímicos, análisis elemental, hidrotermalismo.

*Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.*

## **ABSTRACT**

Soil is one of the dynamic and living natural entities that plays a very important role in terrestrial ecosystems. The problem of soil contamination is not only typical of rural areas of the world, industrialized or densely populated areas, sometimes it is due to natural phenomena or human impacts. Evaluating the physicochemical characteristics and chemical composition of soils makes it possible to identify processes that are affecting their quality. In the case of areas where there are natural hydrothermal manifestations, soil characterization is of great importance due to the potential presence of chemical elements that can be transported or inserted into the food chain, without losing sight of the human impacts of the region. To characterize the soil, texture is a parameter that allows us to know the distribution of particle size and classify them; in addition, pH, electrical conductivity and the amount of organic matter give an idea of the possible processes followed by the chemical elements present. The geothermal zone studied is located in Acoculco, Puebla, where the hydrothermal manifestation is characterized by temperatures of 25 °C and acid and hyperacid pH due to the bubbling of hydrogen sulfide and other gases in the water. Calculations of the enrichment factor, the geoaccumulation index and the anthropogenic factor allowed the identification of elements of geothermal origin (As, Ba, S, Fe and Mn), of geological origin (Nb, Rb, Y) and of possible anthropogenic origin (Br, Cr, Cl, V, and K). Concentrations of trace elements such as Se, Sc, Sb, Ho and Mo stand out. Rainfall plays a very important role, since the concentrations of most of the chemical elements in the soil are increased and a greater number of correlations are identified in the deep fraction. Ba was detected in the order of thousands of parts per million, Mn, Sr, Rb, Zn, V and Cl in hundreds of parts per million. The site studied, shows specific characteristics of low temperature hydrothermalism at the surface, with acidic conditions that can promote the mobility of trace elements. Having sandy loam soils promotes water infiltration and chemical reactions in the deep fraction between 40 and 50 cm.

**Keywords: physicochemical parameters, elemental analyses, hydrothermalism.**

*No part of this work can be reproduced without the formal and explicit permission of the author and director of the thesis.*

## **DEDICATORIA**

A mi familia. Mis padres Alma Reyna y Rolando. Mis hermanos Luis Carlos, Alma Karen y Luisa Fernanda. Y mis abuelos, Alma María Luisa Almada Montiel, Elvia Corrado Ramonetti y Carlos Guillermo de Hoyos Cota.

Mi esfuerzo es por ustedes.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra. Zayre, por confiar en mí y brindarme la oportunidad de formar parte de este proyecto, así como por su apoyo constante hasta la culminación de esta tesis.

Al Dr. Marco García por sus invaluable aportaciones durante la realización de este trabajo.

Al M. en C. Sergio E. Sánchez de los Santos, por su ayuda en diversas tareas durante las campañas de muestreo.

Al CICESE y la UNISON por hacer posible la realización de esta tesis con ambas instituciones.

Se agradece por el financiamiento para esta investigación, al Paquete de Trabajo 9 (PT9, Evaluación de Impactos Ambientales, Sociales y Económicos de Sistemas Geotérmicos Mejorados y Supercalientes); dentro del marco del proyecto “GEMex, Cooperación Europea-México en la investigación geotérmica para el desarrollo de sistemas geotérmicos mejorados y supercalientes”. Del fondo SENER-CONACYT 2015-04-268074 y Horizon 2020 No. 727550.

También se agradece a la CFE (Comisión Federal de Electricidad) por la asistencia y el apoyo durante las campañas de muestreo en la zona de exploración geotérmica de Acoculco, Puebla.

## TABLA DE CONTENIDO

	No. Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
1.1. Antecedentes	9
1.2. Justificación	10
1.3. Objetivos	11
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>12</b>
2.1. Suelos	12
2.1.1. Origen	13
2.1.2. Tipos	15
2.1.3. Importancia	17
2.1.4. Caracterización	17
2.1.5. Propiedades físicas	19
2.1.6. Propiedades químicas	21
<b>3. SITIO DE ESTUDIO Y ANTECEDENTES</b>	<b>22</b>
3.1. Localización	22
3.2. Clima	23
3.3. Hidrología	24
3.4. Geología	25
3.5. Edafología	28
<b>4. METODOLOGÍA</b>	<b>30</b>
4.1. Muestreo	30
4.2. Propiedades fisicoquímicas	32
4.2.1. Toma de muestra	33
4.2.2. Preparación y análisis	33
4.3. Análisis químico elemental	35
4.3.1. Toma de muestra	35
4.3.2. Preparación y análisis	36
4.4. Análisis de resultados	38
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>41</b>
5.1. Muestreo	41
5.2. Propiedades fisicoquímicas	45
5.2.1. Textura	45
5.2.2. Materia orgánica	46
5.2.3. Conductividad eléctrica	46
5.2.4. pH	47
5.3. Análisis químico elemental	47
5.3.1. Correlaciones	50
5.3.2. Índices de calidad del suelo	53
5.3.2.1. Factor de Enriquecimiento	54
5.3.2.2. Índice de Geoacumulación	57
5.3.2.3. Factor Antropogénico	60
5.4. Caracterización	63
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>65</b>
<b>7. REFERENCIAS</b>	<b>67</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>No. Página</b>
<b>Figura 1.</b> Principales variedades de suelo en la superficie de México. (Tomada de PNUMA y SEMARNAT, 2004).	<b>16</b>
<b>Figura 2.</b> Clasificación de suelos, de acuerdo a sus valores de pH (López, 2005).	<b>19</b>
<b>Figura 3.</b> Mapa de localización de la zona de estudio. Numeración de localidades: 0=San José Corral Blanco; 1= Cruz Colorada, 2= Cuautelulco, 3= Ocojala, 4= Jonuco Pedernales, 5= San Francisco Terrerillos, 6= Tenancingo, 7= Pueblo Nuevo (Peñuelas).	<b>23</b>
<b>Figura 4.</b> Precipitación pluvial acumulada en la zona. Datos de la estación CONAGUA 13082. Tomada de Rosas, 2017.	<b>24</b>
<b>Figura 5.</b> Hidrología superficial de la zona de estudio. Tomada de Rosas (2017).	<b>25</b>
<b>Figura 6.</b> Mapa que muestra la geología de la zona de estudio, basado en datos del INEGI. Elaboración propia.	<b>27</b>
<b>Figura 7.</b> Mapa Edafológico de la zona de estudio, basado en datos del INEGI. Elaboración propia.	<b>28</b>
<b>Figura 8.</b> Mapa de localización de sitios de muestreo de suelos en la zona de estudio, sobre mapa base geológico.	<b>30</b>
<b>Figura 9.</b> Fotografías del muestreo de suelo para análisis fisicoquímico.	<b>31</b>
<b>Figura 10.</b> Fotografías del muestreo de suelo para análisis químico elemental.	<b>32</b>
<b>Figura 11.</b> a) Calibración del potenciómetro y mediciones de pH en extractos de suelo, b) medición de pH con papel pH.	<b>33</b>
<b>Figura 12.</b> Proceso de pesado y liofilizado de muestras congeladas de suelo.	<b>36</b>
<b>Figura 13.</b> Proceso de molienda, pesado y prensado de pastillas de suelo para análisis por fluorescencia de rayos X.	<b>37</b>
<b>Figura 14.</b> Equipo de Fluorescencia de rayos X, S8 Tiger.	<b>38</b>
<b>Figura 15.</b> Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de suelos para análisis de propiedades fisicoquímicas.	<b>42</b>
<b>Figura 16.</b> Sitio Ac2b con vista hacia el lago de Los Azufres (Ac2a)	<b>42</b>
<b>Figura 17.</b> Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de suelos para análisis químico elemental.	<b>44</b>
<b>Figura 18.</b> Análisis textural del suelo en base al porcentaje de arena, limo y arcilla.	<b>46</b>
<b>Figura 19.</b> Gráficas de Factor de Enriquecimiento para elementos mayores en la temporada de secas y de lluvias.	<b>55</b>
<b>Figura 20.</b> Gráficas de Factor de Enriquecimiento para elementos traza en la temporada de secas y de lluvias.	<b>56</b>
<b>Figura 21.</b> Gráficas de Índice de Geoacumulación para elementos mayores en la temporada de secas y de lluvias.	<b>58</b>
<b>Figura 22.</b> Gráficas de Índice de Geoacumulación para elementos traza en la temporada de secas y de lluvias.	<b>59</b>
<b>Figura 23.</b> Gráficas de Factor Antropogénico para elementos mayores en la temporada de secas y de lluvias.	<b>60</b>
<b>Figura 24.</b> Gráficas de Factor Antropogénico para elementos traza en la temporada de secas y de lluvias.	<b>62</b>

## LISTA DE TABLAS

	No. Página
<b>Tabla 1.</b> Ordenes de suelo en el sistema de clasificación del USDA. Con base en SSS (1999), (tomada de Jaramillo, 2002).	15
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de suelos FAO/UNESCO, versión de 1988 y correspondencia con los órdenes o subórdenes del sistema USDA (Tomada de Jaramillo, 2002).	16
<b>Tabla 3.</b> Inventario de muestras de suelo para el análisis de propiedades fisicoquímicas.	41
<b>Tabla 4.</b> Inventario de muestras de suelo para su análisis elemental por fluorescencia de rayos X.	43
<b>Tabla 5.</b> Resultados de las propiedades fisicoquímicas de los suelos de Aocolco.	45
<b>Tabla 6.</b> Estadística básica de las concentraciones de elementos mayores en suelos superiores y profundos. Donde LMP: Límites máximos permisibles	48
<b>Tabla 7a.</b> Estadística básica de las concentraciones de elementos traza en suelos superiores y profundos. Donde LMP: Límites máximos permisibles	49
<b>Tabla 7b.</b> Estadística básica de las concentraciones de elementos traza en suelos superiores y profundos. Donde LMP: Límites máximos permisibles	50
<b>Tabla 8.</b> Correlaciones de Spearman para elementos mayores	51
<b>Tabla 9.</b> Concentración de elementos traza (mg/Kg) detectados en pocos sitios de muestreo	51
<b>Tabla 10.</b> Correlaciones de Spearman para elementos traza	53

# 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas las poblaciones humanas han incrementado en número y con ello también en necesidades por satisfacer. Por parte de la población mundial, hay un interés acerca de las condiciones a las que el ser humano está expuesto en su ambiente, en términos de la composición elemental de metales pesados que pueden bioacumularse por el organismo y causar efectos adversos a la salud (Callender, 2003; Bradl, 2005). En consecuencia, se han realizado numerosas caracterizaciones de suelos, arenas, rocas, agua, aire, alimentos y otros componentes para determinar el riesgo relacionado que puede ocasionar el contacto con estos materiales que son parte de las actividades cotidianas del ser humano y que pueden contener dichos elementos (Singh *et al.*, 2010; Yi *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013).

El problema de la contaminación de los suelos no sólo es propio de las zonas rurales del mundo entero sino también de las zonas industrializadas y densamente pobladas. Donde los problemas de contaminación del suelo vienen a menudo acompañados de problemas previos en las aguas, o en algunos casos de fenómenos naturales o antropogénicos (Reimann y De Caritat, 2005; Davis *et al.*, 2009). Los fenómenos naturales que dan como resultado la presencia de metales pesados en las rocas y eventualmente en los suelos, son principalmente el vulcanismo y las alteraciones hidrotermales (Sawkins, 2013; Chen *et al.*, 2018).

El suelo es uno de los entes naturales, dinámico y vivo, que juega un papel muy importante en los ecosistemas terrestres; la composición del suelo incluye materiales inorgánicos, materia orgánica, agua, gases y organismos vivos. La función del suelo es reconocida desde el punto de vista económico y ambiental a nivel de sistemas naturales o forestales. Por lo que se resalta la importancia del rol del suelo, especialmente su calidad, en la productividad y en el adecuado mantenimiento del ecosistema (Schoenholtz *et al.*, 2000). La calidad del suelo es la capacidad del mismo de funcionar en un ecosistema dado, manteniendo la productividad biológica, la calidad ambiental y promover la salud de plantas y animales (Doran y Parkin, 1994).

VARIABLES FÍSICOQUÍMICAS COMO LA TEXTURA, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA, ENTRE OTRAS, SON DE GRAN IMPORTANCIA PARA CONOCER LAS CARACTERÍSTICAS DE UN SUELO, ASÍ COMO SUS VARIABLES QUÍMICAS DE pH Y COMPOSICIÓN ELEMENTAL. UNO DE LOS MÉTODOS MÁS UTILIZADOS EN EL MUNDO PARA EL ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE MUESTRAS SÓLIDAS ES LA FLUORESCENCIA DE RAYOS X, QUE ES UNA TÉCNICA PARA EL ESTUDIO EN UN AMPLIO RANGO DE CONCENTRACIONES, QUE PUEDE ANALIZAR MUESTRAS DE DIFERENTES TEXTURAS GEOLÓGICAS Y MATRICES, HOMOGÉNEAS O HETEROGÉNEAS Y MUESTRAS FORMADAS CON DIFERENTE TAMAÑO DE GRANO MINERAL COMO SUELOS,

sedimentos, arenas y minerales, así como también el análisis de materiales de construcción y objetos arqueológicos (Agarwal, 1991; Banaś *et al.*, 2013). Una de las áreas de investigación en donde se realizan este tipo de análisis es en el estudio de impacto ambiental de suelos en términos de concentraciones de metales pesados (Khademi *et al.*, 2019), sin embargo, la composición elemental es también relevante para el conocimiento de diferentes procesos como erosión de suelos (Berhe *et al.*, 2018), intemperismo (Senesi *et al.*, 2018), formación de suelos, su degradación y desintegración, su material parental y proveniencia (en el caso de suelos transportados) (Keller, 1996), así como la determinación de sus propiedades geológicas (McLennan *et al.*, 2014).

En este trabajo se presenta una caracterización inicial de los suelos basada en el análisis de factores fisicoquímicos y el análisis de composición elemental, en la zona de exploración geotérmica de Acozulco, Puebla, México. Esto permitirá identificar los factores más representativos a monitorear para evaluar la calidad del suelo como base de comparación futura, en caso de que se comience el aprovechamiento del recurso geotérmico de la zona, o haya algún otro tipo de cambio de uso de suelo.

## **1.1. Antecedentes**

La crisis ecológica a nivel global es consecuencia de diferentes problemas locales y globales del medio ambiente, como la superpoblación, la contaminación y la destrucción de los recursos naturales, que comprometen la salud de los ecosistemas y del planeta en su conjunto.

La energía geotérmica es aquella obtenida del aprovechamiento de calor del interior de la Tierra. Su origen etimológico se desprende del griego geo para “Tierra” y thermos para “calor”, cuya traducción literal es “calor de la Tierra”. Su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica se dio por primera vez en 1904 en Italia y en la actualidad más de 20 países la utilizan. En América, la primera planta de aprovechamiento se estableció en Hidalgo, México en 1959. En la época actual, México es uno de los 6 países con mayor capacidad instalada en unidades geotermoeléctricas (SENER, 2013).

Actualmente se analizan zonas geotérmicas como Acozulco en Puebla, México, en busca de establecer nuevos puntos de aprovechamiento de este tipo de energías. En la zona en mención se han realizado estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos de detalle, y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) perforó dos pozos exploratorios: el EAC-1 en 1995 y el EAC-2 en 2008. Algunos de dichos estudios son los relacionados a cuestiones ambientales y las afectaciones que se presentarían en el entorno (Hiriart, 2011). Por ello es necesario caracterizar los suelos en esta etapa como base de comparación futura, para que cuando se comience el

aprovechamiento del recurso geotérmico de la zona, se pueda hacer un monitoreo de este recurso.

El suelo es una mezcla de sólidos orgánicos e inorgánicos, aire, agua y microorganismos. Todas estas fases influyen entre sí, por ejemplo: el agua desgasta los sólidos, de tal manera que transporta compuestos químicos disueltos o en suspensión (Jaramillo, 2002) por la superficie y a través de los espacios vacíos, generalmente los microorganismos catalizan muchas de estas reacciones (Bohn *et al.*, 1993). Algunos microorganismos del suelo tienen la capacidad de alterar algunos minerales (por ejemplo: biotita, muscovita e illita) y de transformar (mineralizar y/o humificar) materia orgánica (Jaramillo, 2002). Por otra parte, cuando los productos resultantes de la erosión dejan de estar en suspensión en los medios de transporte (agua, hielo, aire), se depositan por la acción de la gravedad; originando depósitos que en muchas ocasiones tienden a formar mantos o capas horizontales llamados sedimentos. Los materiales acumulados de esta manera dejan de estar en contacto con la atmósfera o hidrósfera al ir siendo enterrados progresivamente por las capas de material más o menos compacto, formando las rocas sedimentarias (Meléndez y Fúster, 1981).

Al estudiar y determinar la concentración de metales pesados en el sedimento se puede tener una idea de las diferentes fuentes de contaminación que afectan a los cuerpos de agua. Los sedimentos pueden recibir partículas transportadas por el viento desde los terrenos modificados por el hombre, a la vez, la lluvia que cae en los sedimentos lleva disueltos diferentes tipos de compuestos químicos los cuales pueden concentrarse en este, causando alteraciones.

En la zona geotérmica en exploración de Acoculco, Puebla, México, no se ha hecho una caracterización fisicoquímica de los suelos, por lo que esta investigación aportará resultados importantes en la línea base ambiental.

## **1.2. Justificación**

El aprovechamiento geotérmico se considera como una energía limpia y alternativa que es aceptada también por su potencial en la diversificación energética y el empleo que puede generar, principalmente en pequeñas y medianas empresas; el desarrollo regional, la transferencia de tecnología y la cooperación internacional (Romero, 1996; Islas *et al.*, 2004). Sin embargo, debido a las elevadas temperaturas del subsuelo que sirven para producir electricidad a partir del vapor de agua, o el calor geotérmico que se puede usar para diversos procesos con fines industriales, pueden causar efectos adversos al medio ambiente (Kristmannsdóttir y Ármannsson, 2003). Los fluidos geotérmicos provienen de diversas fuentes y a diferentes profundidades donde alcanzan condiciones extremas de presión y temperatura (>200 °C),

generando cambios en la composición química e isotópica de los fluidos, debido a la interacción roca-fluido, pudiendo ocasionar un potencial de contaminación, al extraer vapores, agua y gases químicamente agresivos en la superficie (Birkle y Bundschuh, 2008). Para lograr cuantificar la calidad del suelo hay una serie de indicadores que tienen que ser conocidos y estudiados (Stenberg, 1999), sin embargo, se conocen pocos estudios acerca de los impactos o posibles impactos, positivos o negativos en el suelo, relacionados al aprovechamiento geotérmico en usos directos o en la producción de energía eléctrica.

En el año 1992, en la Cumbre de Río, en Río de Janeiro, Brasil, se reconoció la importancia de la protección de los suelos y de sus usos potenciales en el contexto de un desarrollo sostenible, en particular contra la contaminación procedente de acciones o actividades de origen antrópico (Úbeda, 2001). Se han considerado actividades antrópicas que contribuyen a la degradación del suelo, la deforestación de una zona arbolada, el cambio de uso de suelo para construcción de casas, el uso de agua de baja calidad para el riego agrícola, el abuso de herbicidas y plaguicidas, así como de fertilizantes químicos, etc. (Álvarez-Morales *et al.*, 2014).

Así mismo, se han considerado también la creación de nuevos caminos forestales para llegar a nuevos asentamientos humanos y el riesgo de la aparición de los incendios forestales, que dejan sin cobertura protectora al suelo generando un riesgo para el ecosistema (Úbeda, 1998; Mataix-Solera, 1999) también, actividades industriales que pueden generar contaminación química (Reyes *et al.*, 2016). Todos estos efectos tienen relación directa con la susceptibilidad a la degradación y erosión del suelo.

El suelo puede contener una gran variedad de elementos químicos, por lo que puede resultar difícil establecer que un solo elemento pueda dejar de ser beneficioso o indiferente, para pasar a tener la calificación de contaminante (Porta *et al.*, 1994). Por lo que se recomienda evaluar características fisicoquímicas del suelo y relacionarlas con la composición elemental, para identificar los elementos clave que servirán como indicadores ambientales de la zona en estudio.

### **1.3. Objetivos**

Objetivo general

Evaluar las características fisicoquímicas y composición química de suelos en la zona geotérmica en exploración de Acoculco, Puebla, México.

Objetivos específicos

1. Conocer las características físicas del suelo a partir de su análisis granulométrico.

2. Conocer su composición elemental de la muestra superficial (0-10 cm) y la profunda (40-50 cm) del perfil de suelo a partir de un análisis por la técnica analítica Fluorescencia de Rayos X (FRX).
3. Hacer los cálculos de: Factor de Enriquecimiento, Índice de Geoacumulación y Factor Antropogénico en los puntos de muestreo en época de secas y post lluvias de la zona de estudio.
4. Evaluar las diferencias estacionales a partir de los cambios en la composición elemental de ambas fracciones (superficial y profunda), así como de los factores e índice calculado.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Suelos**

En los últimos años el interés en evaluar la calidad del recurso suelo se ha incrementado debido a que es un componente esencial de la biósfera, cumpliendo funciones en la producción de alimentos, fibras naturales (de origen animal y vegetal) y energía, así como también en el mantenimiento de la calidad ambiental (Doran *et al.*, 1994; Doran y Zeiss, 2000; Gil-Sotres *et al.*, 2005; Masto *et al.*, 2007). El suelo puede ser definido de muchas maneras dependiendo de la aplicación que se le pretenda dar, quién lo estudie y la época en que lo haga. Para un geólogo podría ser, simplemente, el recubrimiento terroso que hay sobre un cuerpo rocoso (Jaramillo, 2002). Desde el punto de vista químico, para los edafólogos, el suelo es un sistema complejo conformado por sustancias orgánicas y minerales que se comportan como un sistema biogeoquímico constituido por fases sólidas, líquidas y gaseosas de tal modo que puede soportar la vida de plantas y animales (Keller, 1996; Lugo, 2002), orientado a obtener los mejores rendimientos agropecuarios posibles (Lyttleton y Buckman, 1944; Jaramillo, 2002).

Según el glosario de términos de suelos de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (1984) es el material mineral no consolidado en la superficie de la Tierra que ha estado sometido a la influencia de factores como: material parental, clima, topografía, macro y microorganismos; todos actuando durante un lapso de tiempo y generando un producto para formar los horizontes o capas diferenciales. Esto será resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia a través del tiempo con características producidas por los procesos de formación, textura, espesor, color, naturaleza química y sucesión de los diferentes horizontes que caracterizan un suelo y determinan su calidad. Dependiendo de la localización, el suelo tiene un espesor que puede ir desde la superficie terrestre hasta varios metros de profundidad (Volke *et al.*, 2005; Jaramillo, 2002).

El suelo tiene la propiedad de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por adsorción; tiene la capacidad de actuar como amortiguador y transformador, es hábitat de miles de organismos, difiere del material del cual se derivó en varias propiedades y características físicas, químicas, biológicas y morfológicas (Jaramillo, 2002; Budhu, 2007). Dichas propiedades, tales como el pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), entre otras, permiten la disolución, precipitación y solubilidad de los metales (Loué, 1988). El pH es uno de los factores que controla la solubilidad de un metal en el suelo, ya que la mayoría de los metales son relativamente móviles a pH ácidos.

El Soil Survey Staff (SSS) define el suelo como un cuerpo natural compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos (principalmente agua) y gases (principalmente aire) que ocurren en la superficie de la Tierra. Ocupa un espacio y se caracteriza por tener horizontes diferentes del material inicial como resultado de procesos de adición, pérdida, traslocación (la traslocación se refiere a movimientos de materiales que se producen dentro del suelo, siempre y cuando no se desplacen fuera del mismo. Es decir, es un movimiento interior o redistribución que no supone ni ganancia ni pérdida neta de componentes del suelo) y transformación de materia y energía. También es capaz de soportar plantas arraigadas en un ambiente natural (SSS, 1998, 1999; Jaramillo 2002).

### **2.1.1. Origen**

El primer paso para la formación del suelo es la meteorización de la roca madre debido fundamentalmente a los agentes climáticos, provocando por una parte una disgregación física de sus componentes; y por otra, una alteración química de sus constituyentes mineralógicos. Así, al cabo de un cierto tiempo la roca estará modificada (Keller, 1996). Jenny (1994), describió que la formación del suelo está influenciada por cinco factores independientes, pero que interactúan entre sí para dar lugar al suelo, los cuales intervienen en su formación, y lo expresó mediante el siguiente modelo:

$$S = f(C, MP, O, R, t)$$

Donde:

S: Desarrollo del suelo.

C: Clima.

MP: Material parental.

O: Organismos.

R: Relieve.

t: Tiempo.

La alteración de la roca, a partir de la cual se forma un suelo, es un proceso complejo. Según Keller (1996), ésta inicia con la alteración mecánica cuando la roca es expuesta a la superficie de la Tierra. El ciclo hidrológico interactúa con el ciclo de las rocas y se producen materiales de roca intemperizada y la descarga por erosión disminuye las presiones, permitiendo el relajamiento y la ampliación de las discontinuidades a través de los planos estructurales de ésta. La roca fracturada y relajada es más permeable, permite la circulación de flujos y obra la meteorización capaz de transformar los minerales de la roca para formar parte del mismo suelo.

El agua, además de proveer al suelo con material intemperizado, juega un papel importante en los procesos de dispersión y concentración de elementos químicos en él, así como del ciclo de las rocas. Dichos procesos varían con las características físicas y químicas del agua, suelo y rocas involucradas. Por ejemplo, el agua puede disolver minerales de los materiales que atraviesa y depositarlos en otro lugar como material cementante, produciendo rocas sedimentarias con el paso del tiempo y la compactación (Keller, 1996).

Las aguas termales y los geiseres son fenómenos hidrológicos encontrados en algunas áreas volcánicas. El agua subterránea entra en contacto con rocas calientes y, en algunos casos descarga en la superficie como géiser, fumarola o un manantial caliente (Keller, 1996).

Se especula que el agua que fluye a través del subsuelo (aguas subterráneas) puede enriquecerse en minerales después de estar en contacto con magmas profundamente enterrados, de tal manera que puede ser responsable de algunos depósitos de minerales (depósitos del tipo hidrotermal), los cuales pueden ser de oro, plata, cobre, mercurio, plomo, zinc, y otros metales, y también varios minerales no metálicos (Keller, 1996).

El intemperismo también es responsable de la concentración de algunos materiales hasta el punto de poder ser extraídos con una ganancia económica (Keller, 1996).

En ambientes geoquímicos profundos, la dispersión de elementos químicos está controlada por la geodinámica interna de la Tierra, siendo los procesos de fusión, cristalización, recristalización y alteración hidrotermal los que controlan principalmente dicha dispersión, y las variables más importantes son la composición de las fases derivadas del manto, la presión del medio y la temperatura (Corrales y Rejas, 2010).

Tarbuck y Lutgens (1999) consideran que el suelo es una interfase de la Tierra donde interactúan: litósfera, atmósfera, hidrósfera y biósfera. Debido a esto, el suelo es dinámico y sensible a prácticamente todos los aspectos de su entorno. Hacen énfasis en que el suelo no es simplemente un producto de la meteorización, sino de todos los factores antes mencionados (Jaramillo, 2002). Algunas de las diferencias entre los suelos se deben al clima y la topografía,

pero el tipo de material parental, los procesos orgánicos y el tiempo de los procesos formadores de suelo también juegan un rol importante (Keller, 1996).

### 2.1.2. Tipos

El desarrollo de un suelo es un proceso complejo en el que el ciclo de las rocas y el ciclo hidrológico interactúan y producen materiales intemperizados. Posteriormente, los organismos transforman dichos materiales a suelo. Un suelo es residual cuando el material intemperizado es transformado en el mismo lugar en el que se generó. Esto ocurre con los materiales más insolubles. En cambio, cuando el material intemperizado es transportado por agua, viento, o glaciares y posteriormente modificado en su nueva ubicación, se forma un suelo transportado (Keller, 1996).

Clasificar el suelo resulta de gran utilidad al cartografiar los tipos de suelo que hay en una región. Existen varios sistemas de clasificación de suelos. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) clasifica el suelo mediante un sistema de seis jerarquías, las cuales dependen del nivel de detalle del levantamiento cartográfico. Agrupa los suelos en: orden, suborden, grupo, subgrupo, familia y serie (SSS, 1999; Keller, 1996). Ordenados de menor a mayor grado de detalle, siendo “orden” la jerarquía más general y “serie” la más específica o con mayor grado de detalle. La FAO/UNESCO utiliza otro sistema para clasificar los suelos (versión de 1988), muy similar en su concepción y nomenclatura al sistema del USDA, pero no utiliza como características diagnósticas los regímenes de humedad y de temperatura.

La clasificación de suelos del USDA consta de 12 órdenes. El nombre de estos órdenes tiene una estructura descriptiva-etimológica. Cada uno lleva en su nombre: un “elemento formativo”, seguido por una vocal de enlace (que puede ser “i” u “o”) y la terminación “sol” (solum=suelo) (ver Tabla 1) (Jaramillo, 2002).

**Tabla 1. Ordenes de suelo en el sistema de clasificación del USDA. Con base en SSS (1999), (tomada de Jaramillo, 2002).**

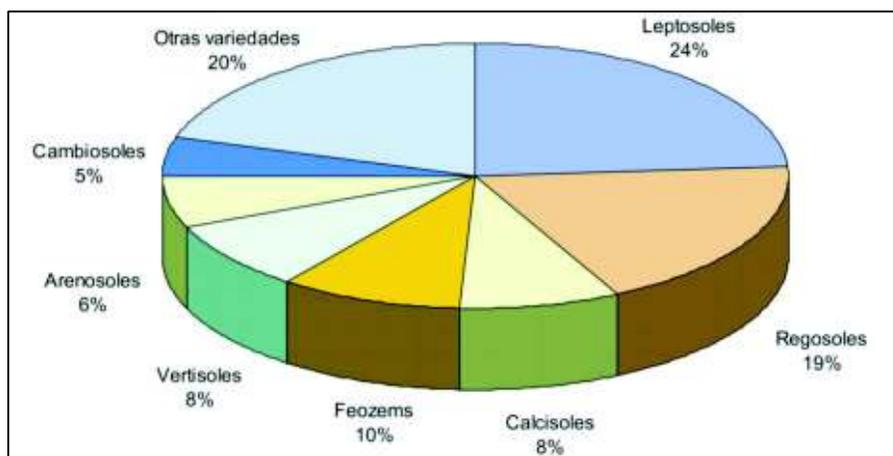
NOMBRE	ELEMENTO FORMATIVO	CONNOTACION
Alfisolos	ALF	-
Andisolos	AND	Oscuro, propiedades <i>ánticas</i>
Aridisolos	ID	Clima <i>ántico</i>
Entisolos	ENT	Reciente
Espodosolos	OD	-
Gelisolos	EL	Gélido, congelado
Histosolos	IST	Tejido
Inceptisolos	EPT	Incipiente
Mollisolos	OLL	Mullido, blando
Oxisolos	OX	Oxidado
Ultisolos	ULT	Último
Vertisolos	ERT	Invertido

Los principales grupos de suelo del sistema de clasificación FAO/UNESCO (versión de 1988) y sus equivalencias con el sistema del USDA se ilustran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Clasificación de suelos FAO/UNESCO (versión de 1988) y correspondencia con los órdenes o subórdenes del sistema USDA (Tomada de Jaramillo, 2002).**

GRUPO PRINCIPAL DE SUELO (TOMADO DE PORTA et al, 1994)	ORDEN O SUBORDEN DEL SISTEMA USDA EQUIVALENTE
Fluvisol	Fluvent, Entisol, Inceptisol, Mollisol
Gleysol	Entisol, Inceptisol, Mollisol en régimen ácnico
Regosol	Entisol
Leptosol	Mollisol, Inceptisol, Entisol líticos
Arenosol	Psamment, Entisol, Gelisol
Andosol	Andisol
Vertisol	Vertisol
Cambisol	Inceptisol, Mollisol
Calcisol	Mollisol, Aridisol, Inceptisol, Alfisol
Gypsisol	Mollisol, Aridisol, Inceptisol, Alfisol
Solonetz	Alfisol, Aridisol
Solonchak	Aridisol, Inceptisol, Mollisol, Entisol
Kastanozem	Mollisol
Chernozem	Mollisol
Phaeozem	Mollisol
Greyzem	Mollisol
Luvisol	Alfisol en clima mediterráneo húmedo
Planosol	Ultisol, Alfisol
Podzolvisol	Ultisol, Alfisol
Podzol	Spodosol
Litosol	Alfisol
Acrisol	Ultisol
Alisol	Ultisol en clima mediterráneo húmedo
Naisol	Ultisol, Alfisol
Ferralsol	Oxisol
Plinthosol	Ultisol, Oxisol, Inceptisol, Alfisol
Histosol	Histosol, Histel
Anthrosol	Anthrept, Inceptisol, Aridisol, Entisol

En lo que a México respecta, la mayor parte del territorio nacional (casi cuatro quintas partes) está dominado por cinco tipos de suelo: leptosoles (24% del territorio), regosoles (18.5%), calcisoles (8.2%), feozems o phaeozem (9.7%), y vertisoles (8.3%) (Figura 1) (PNUMA y SEMARNAT, 2004).



**Figura 1. Principales variedades de suelo en la superficie de México. (Tomada de PNUMA y SEMARNAT, 2004).**

### **2.1.3. Importancia**

El suelo es un recurso natural finito y no renovable a corto plazo, que presta diversos servicios ecosistémicos, entre ellos el relacionado con los ciclos biogeoquímicos de elementos clave para la vida como carbono, nitrógeno, fósforo, etc. El suelo puede tener diferentes acepciones dependiendo del enfoque del estudio que se vaya a realizar. De esto se entiende que el suelo es sujeto de estudio de varias ciencias y es utilizado para distintas aplicaciones. Por ejemplo: para el agricultor, el suelo tiene importancia, pues es el sitio donde ubicará sus semillas y producirá sus cosechas (Worthen y Aldrich, 1959); para un constructor, es el sitio sobre el cual colocará sus estructuras o el sustrato que le suministrará algunos de los materiales que requiere para hacerlas; para un ecólogo, geólogo, químico, arqueólogo o antropólogo, también puede ser importante como sujeto de estudio o como herramienta para un fin (Jaramillo, 2002).

Históricamente, el suelo adquirió valor para el ser humano cuando lo empezó a usar en la producción de alimentos, en los tiempos en que los pueblos comenzaron a asentarse en un sitio y abandonaron su sistema nómada. En ese momento el suelo se volvió indispensable para el suministro de nutrientes, de agua y de soporte para las plantas (Jaramillo, 2002).

En la actualidad, el suelo influye considerablemente sobre el medio en el que se ubica y repercute en las actividades sociales y económicas de los grupos humanos que se asientan en ese territorio, grupos que ejercen diferente grado de presión sobre el suelo y que generan así afectación o deterioro de éste (Gardi *et al.*, 2014). No obstante, es el gran olvidado cuando se alude a los recursos naturales (Burbano, 2013; Saavedra, 2015), por eso, hoy se juzga, que debe haber un manejo respetuoso del suelo, no solo para incrementar la producción de alimentos sino para preservar los servicios ecosistémicos y regular el clima (FAO, 2015b). Debido a esto, los suelos son una parte importante del medio ambiente que se deben monitorear periódicamente para asegurar que se encuentren en óptimas condiciones.

Las relaciones entre geología y salud son temas de mucha discusión e investigación. Paulatinamente con el tiempo se ha aprendido más sobre los sutiles modos en los cuales la geología del ambiente afecta la salud en general. Por lo tanto, es necesario que se caracterice la distribución natural de los elementos en la corteza terrestre y las maneras en las cuales los procesos naturales y artificiales concentran o dispersan dichos elementos (Keller, 1996).

### **2.1.4. Caracterización**

En general, una caracterización es la determinación de atributos particulares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás. Una caracterización del suelo debe

incluir una descripción del mismo; mapas de suelo y pruebas que determinen tamaño de grano, contenido de humedad, resistencia, expansión y contracción (Keller, 1996).

Todo cambio ambiental sobre las rocas, provoca una respuesta mineralógica, química y textural. Sí además existe una alteración hidrotermal, habrá presencia de agua caliente, vapor o gases, que en términos generales acelerarán los procesos antes mencionados. La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones químicas entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma (Corrales y Rejas, 2010; Maksaev, 2003).

La caracterización del suelo en base a su textura es uno de los análisis más comunes e importantes dentro del campo de la física de suelos por sus aplicaciones agronómicas e ingenieriles (Medina-González *et al.*, 2007). En el sitio, se realiza por estimación y después es redefinida en laboratorio mediante la separación de arena, limo y arcilla, determinando sus proporciones (Keller, 1996). Existe una amplia gama de métodos que permiten llevar a cabo el análisis textural de suelos, entre ellos se encuentran: método del hidrómetro (Bouyoucos) o una modificación del método de Bouyoucos, pipeta internacional, sensor de presión, rayos X y el de difracción de rayos láser (Medina-González *et al.*, 2007; Gee y Or, 2002). Se han evaluado las diferencias para valorar la clase de textura del suelo y el impacto de la clase de textura del suelo.

Los métodos del densímetro de Bouyoucos (Bouyoucos, 1927) y de la pipeta (Baver, 1956) son los más utilizados en la actualidad para determinar las fracciones de limo o arcilla (López, 2005). Según Gee y Bauder (1986) y Gee y Or (2002) los resultados del análisis dependen del método de determinación. De ahí la importancia de indicar claramente qué método y pretratamiento se ha empleado cuando se reporta la distribución de valores (Medina-González *et al.*, 2007). La determinación de las fracciones más gruesas puede hacerse fácilmente por tamizado en húmedo (López, 2005).

De forma aproximada, el suelo puede clasificarse según su valor de pH, de acuerdo a lo que muestra la Figura 2. El valor de pH del suelo hace referencia a su grado de acidez o basicidad, aunque no depende únicamente del valor de éste, sino también de la interacción de varios subsistemas.

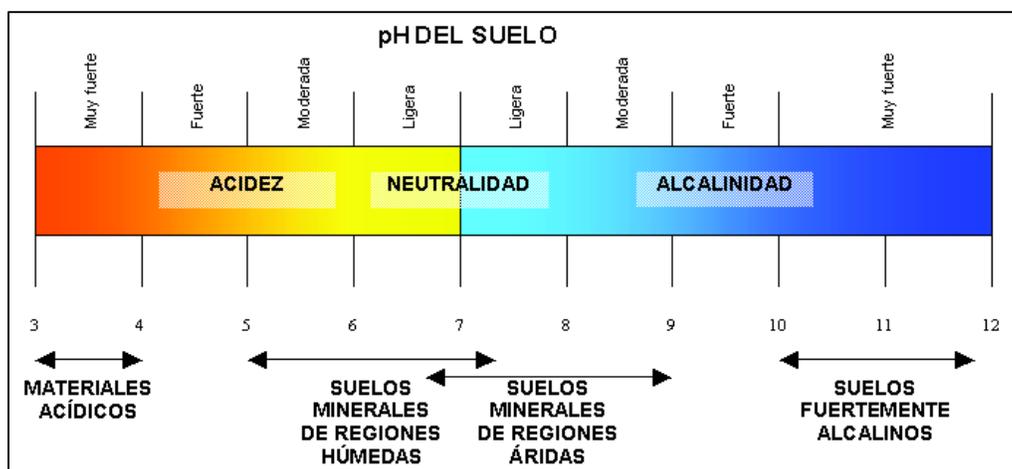


Figura 2. Clasificación de suelos, de acuerdo a sus valores de pH (López, 2005).

### 2.1.5. Propiedades Físicas

La física de suelos estudia la manera cómo están intrínsecamente relacionadas las fases sólidas (partículas inorgánicas y orgánicas), líquidas (agua y solutos disueltos) y gaseosas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y vapor de agua) que componen el suelo (Jaramillo, 2002). Las propiedades físicas de los suelos son numerosas y todas influyen en su formación, conservación y transformación. Entre las más importantes se encuentran: textura, densidad, porosidad, contenido de humedad, infiltración, conductividad hidráulica, consistencia, temperatura y color (Jaramillo, 2002; Foth, 1990).

La textura es aquella propiedad que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas de diámetro menor a 2 mm, es decir, la tierra fina, en el suelo (Jaramillo, 2002). Para clasificar a los componentes del suelo según su tamaño de partícula se han establecido escalas granulométricas, en donde existen valores de los límites establecidos para definir cada clase. Para la fracción arenosa, las partículas tienen de 2.0 a 0.05 mm de diámetro, de acuerdo con el USDA. El limo es la fracción de 0.05 a 0.002 mm y las arcillas tienen un diámetro menor a 0.002 mm (Folk, 1954).

En una textura gruesa las partículas predominantes son de 2.0-0.05 mm y una textura fina es aquella en la que las partículas predominantes del suelo son las de tamaño  $<0.05$  mm. Las distintas partículas tienen propiedades fisicoquímicas características, por lo cual, la naturaleza de los suelos minerales está determinada, en gran parte, por el grupo de agregados que predominan en él (Jaramillo, 2002).

La textura del suelo tiene especial significado en: aireación, movimiento del agua, retención de humedad, retención y liberación de iones, disponibilidad de nutrientes y con ellos en su productividad, susceptibilidad a la erosión (erodabilidad), uso y manejo (Jaramillo, 2002).

La densidad de un material se define como el peso que tiene dicho material, por unidad de volumen. En el suelo, por ser éste un cuerpo poroso, se presentan dos situaciones diferentes con respecto a la densidad: si se considera la masa de las partículas sólidas, únicamente, se tiene la densidad real, pero si, aparte de la masa de las partículas, se tiene en cuenta su organización, entonces se tiene la densidad aparente (Jaramillo, 2002).

La porosidad del suelo se refiere al espacio del suelo que no está ocupado por sólidos, sino que está disponible para líquidos y gases. Se distinguen dos tipos de porosidad: macroporosidad y microporosidad, las cuales pueden calcularse (aproximadamente) para cada suelo mediante la relación de sus densidades aparentes y reales, con las fórmulas de Pizarro (1978) y Olarte *et al.* (1979) y otras. La porosidad debe ser monitoreada periódicamente, sobre todo en suelos de uso intensivo, ya que los cambios en esta propiedad pueden ser indicativos de deterioro físico del suelo (Jaramillo, 2002).

El contenido de humedad se refiere a la cantidad de agua que ocupa los poros del suelo, y esta depende, en gran medida, del arreglo de los sólidos en él y de otras propiedades como el contenido de materia orgánica y su composición, de tal manera que el contenido de humedad varía de un tipo de suelo a otro. Los suelos más arcillosos, que tienen un mayor porcentaje de coloides o que presentan características vesiculares en sus granos, retendrán mejor la humedad (Jaramillo, 2002).

La infiltración es la propiedad que evalúa la velocidad a la que el agua penetra en el suelo. Está en función de numerosos factores como el tipo de poros, la homogeneidad del perfil de suelo, la presencia de materiales hidrofóbicos en el suelo, el tiempo de suministro de agua, entre otros factores. Es de gran utilidad para definir tiempos óptimos de riego. El método más utilizado para calcular esta propiedad es el de los infiltrómetros (Jaramillo, 2002).

La conductividad hidráulica es la facilidad con la que el agua circula a través del suelo y se relaciona comúnmente con el drenaje del suelo. Depende fuertemente del contenido de humedad, siendo máxima en suelos saturados. Se determina mediante pruebas de laboratorio, siendo la más común la de los permeámetros de cabeza constante (Jaramillo, 2002).

La consistencia de un suelo es la resistencia que presenta a la ruptura, fragmentación o flujo de sus materiales debido a las fuerzas que actúan sobre él. Esta propiedad depende del contenido de humedad, de materia orgánica y de arcilla. Resulta de gran aplicación en la ingeniería civil (Jaramillo, 2002).

La erodabilidad es la susceptibilidad del suelo a la erosión debido a la facilidad de desprendimiento de sus partículas por acción del agua o el viento, la pendiente y la clase textural. Ésta es dinámica, cambia durante una tormenta, durante el año o de año a año. Los suelos pueden variar en su contenido de humedad y con ello en su resistencia a la erosión.

La temperatura es una propiedad importante del suelo pues tiene gran influencia en varios de sus procesos. Por ejemplo, en condiciones de congelamiento, limita la actividad biológica, el movimiento del agua líquida y la elongación de raíces. Los procesos químicos y la actividad microbiana dependen de la temperatura. La alternancia, entre temperaturas de congelación y deshielo, expande y contrae el suelo. La dirección de la pendiente de un suelo determina el ángulo en el que recibe los rayos solares, las mayores temperaturas se alcanzan cuando los rayos solares inciden de manera perpendicular al suelo. El ángulo de incidencia de los rayos solares varía con la latitud, la estación del año y el momento del día. Las temperaturas alcanzadas son mayores en el ecuador y disminuyen hacia los polos.

El color del suelo es una de sus características más notorias. Dicha característica guarda una estrecha relación con: el contenido de materia orgánica, el contenido y la proporción de los diferentes tipos de óxidos de hierro, el tamaño de los cristales y el grado de cristalinidad que ellos presenten. La baja cristalinidad, la poca cantidad, cristales pequeños y la cementación producen colores más claros (Schulze *et al.*, 1993; Schwertmann, 1993; Jaramillo, 2002).

### **2.1.6. Propiedades Químicas**

El análisis e interpretación de datos químicos de suelos tiene el objetivo de estudiar las interrelaciones entre sus diferentes componentes, las propiedades y las reacciones químicas de los suelos (Bohn *et al.*, 1993; Jaramillo, 2002). Los principales cationes que se encuentran en el suelo son:  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Si}_4^+$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ . Los aniones más frecuentes en el suelo son:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{H}_2\text{BO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SeO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$  (Jaramillo, 2002). Las propiedades químicas más importantes del suelo son; la capacidad de intercambio catiónico, el pH, así como el porcentaje de saturación.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), está ligada a los coloides del suelo constituidos por la arcilla, las moléculas húmicas y los oxihidróxidos de hierro y aluminio.

El pH del suelo influye en sus propiedades físicas, químicas y biológicas e indica si un suelo es ácido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad y movilidad de otros constituyentes, incluyendo contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor de pH en el suelo oscila entre 3.5 (muy ácido) a 9.5 (muy alcalino). Según Jaramillo (2002), de manera general, a pH muy ácidos

(pH<4.5) hay una intensa alteración de minerales, la estructura del suelo se vuelve inestable y hay altas probabilidades de que presenten toxicidades y/o deficiencias de nutrientes. Los valores de pH neutros son los mejores para las propiedades físicas de los suelos. Si el pH es alcalino, la fracción de la arcilla se dispersa, se destruye la estructura del suelo y existen malas condiciones desde el punto de vista físico.

En el suelo se encuentran los cationes ácidos (hidrógeno y aluminio) y los cationes básicos (Ca, Mg, K y Na). El porcentaje de saturación de bases se refiere a la fracción de los cationes básicos que ocupan posiciones en los coloides del suelo.

Otras propiedades químicas de los suelos son: la cantidad de nutrientes para las plantas, carbón orgánico del suelo, nitrógeno del suelo, salinización del suelo, alcalinización del suelo, contenido de carbonato de calcio y contenido de carbonato de sodio (yeso) en el suelo.

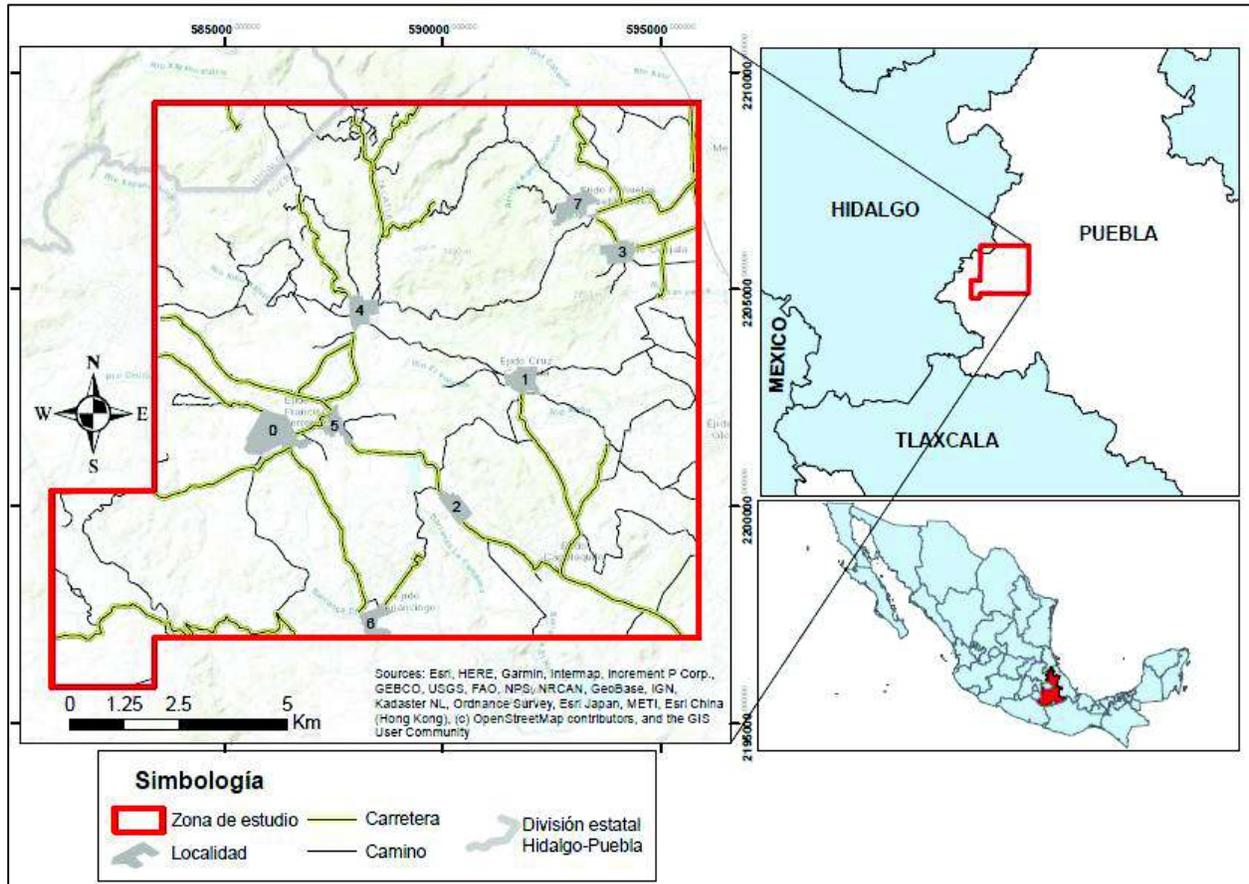
### **3. SITIO DE ESTUDIO Y ANTECEDENTES**

#### **3.1. Localización**

El estado de Puebla se localiza en la porción centro-este de la República mexicana, colindando con los estados de Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Hidalgo, Tlaxcala, México y Morelos. El estado de Puebla tiene 6´168,883 habitantes, que representa el 5.2% del total del país y abarca el 1.75% de la superficie total del país (INEGI, 2017). El estado posee una gran diversidad de climas, los climas templados son los que cubren la mayor parte de su territorio, en segunda instancia los cálidos y en tercer lugar los semisecos, secos, semifríos y fríos. Las zonas del norte y noroeste, pertenecientes a la llanura costera del Golfo Norte y los correspondientes a los valles de los ríos Atoyac, Acatlán, Tehuacán y Petlapa, presentan temperaturas de 24 °C o más, mientras que las áreas que están por arriba de los 4000 m de altitud presentan temperaturas medias anuales de entre 2 y 4 °C. Los meses donde se presenta mayor precipitación son desde junio hasta septiembre (INEGI, 2017). Los tipos de vegetación que se encuentran en el estado de Puebla son principalmente zonas agrícolas, bosques, selvas y matorrales, el resto se agrupa en vegetación inducida e hidrófila (Silva *et al.*, 2011).

La zona geotérmica de Acoculco, Puebla, se localiza 85 km al noreste de la Ciudad de Puebla y 180 km de la ciudad de México. El área, que abarca una superficie de 1,290 km<sup>2</sup> e incluye 39 manantiales, casi todos “fríos” (Tello-Hinojosa, 1994), y algunas emanaciones frías de CO<sub>2</sub> (mofetas), se ubica en la zona limítrofe entre el Cinturón Volcánico Mexicano y la Sierra Madre Oriental (Figura 3). La zona está constituida por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias e incluye dos áreas de interés alteradas hidrotermalmente por fluidos de tipo ácido sulfatado: Los Azufres-El Potrero Colorado y La Alcaparrosa. A pesar de que la red estructural en la región es

muy compleja (incluyendo rasgos en casi todas las orientaciones), dichas áreas de interés se asocian a estructuras NW-SE (Rocha-López *et al.*, 2006). Además, se caracteriza por ser la única zona geotérmica en México que presenta manifestaciones termales muy peculiares, ya que carece de termalismo evidente (Rocha-López *et al.*, 2006).



**Figura 3. Localización de la zona de estudio. Numeración de localidades: 0=San José Corral Blanco; 1= Cruz Colorada, 2= Cuautelolulco, 3= Ocojala, 4= Jonuco Pedernales, 5= San Francisco Terrerillos, 6= Tenancingo, 7= Pueblo Nuevo (Peñuelas).**

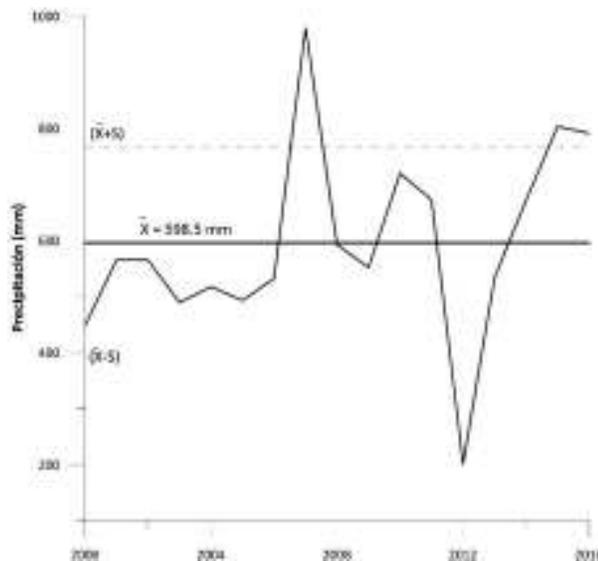
### 3.2. Clima

Los componentes climáticos que mayor incidencia tienen en la evolución del suelo son: la precipitación, la temperatura y, en algunos casos, el viento (dependiendo de la influencia que éste tenga en los procesos de evaporación de agua desde la superficie del suelo) (Jaramillo, 2002). Acoculco posee un clima templado subhúmedo, con lluvias en verano y otoño.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) lleva un registro meteorológico de casi todo el país gracias a la recolección de datos de sus estaciones climatológicas. La temporada de lluvias de esta zona es de mayo a octubre. Se registran precipitaciones máximas totales en julio

del año 1963 y octubre del año 1999, con 422.5 y 303 mm, respectivamente. Sin embargo, el promedio histórico (desde el año 1953 al 2014) señala a julio y septiembre como los meses más lluviosos en promedio mensual con 116.91 y 110.94 mm respectivamente. La temperatura media oscila de 8 a 14°C todo el año. Con mínimas de -1 en invierno y máximas de 22 en verano.

Considerando datos de la estación climatológica 13082 “Presa La Esperanza” del estado de Hidalgo, siendo una de las más cercanas a la zona de estudio (25 km al Noroeste), además de contar con un amplio intervalo de datos en el tiempo y que se encuentra casi a la misma elevación que la zona de estudio, con respecto al nivel del mar. Se presenta un análisis de lluvia anual acumulada desde el año 2000 al 2016 (Figura 4). Donde se observa que la precipitación media es de 598.5 mm, con un año (2007) de mucha lluvia cerca de 1000 mm y uno de sequía (2012) con poco menos de 200 mm, lo que indica una gran variabilidad en la precipitación anual acumulada.

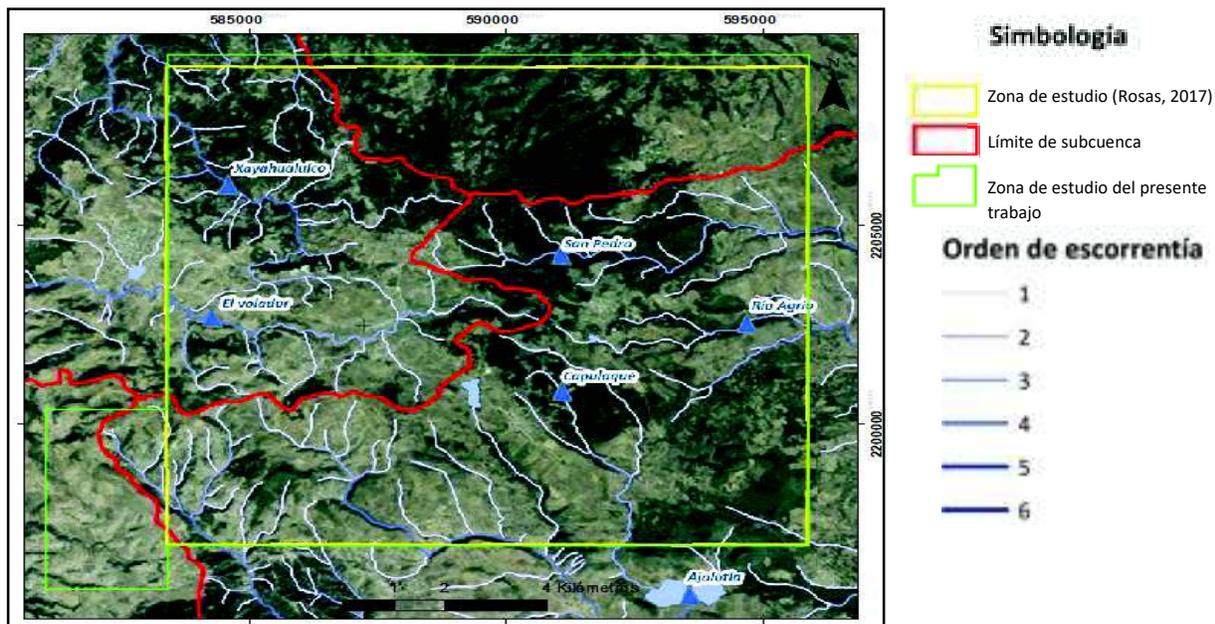


**Figura 4. Precipitación pluvial acumulada en la zona. Datos de la estación CONAGUA 13082. Tomada de Rosas (2017).**

### 3.3. Hidrología

La zona de estudio se encuentra en un parteaguas de dos subcuencas hidrológicas, que forman parte de dos regiones hidrológicas distintas (Figura 5). La subcuenca que se encuentra en la parte noroeste de la zona de estudio, se conoce como Río Metztlán (RH26Dv), la cual forma parte de la Región hidrológica Pánuco y de la cuenca Río Moctezuma. Es de tipo cerrada con un área de 2,821.42 km<sup>2</sup> y un máximo de orden de magnitud de 6. La dirección de la escorrentía desde la zona de estudio es hacia el noroeste. La subcuenca Laxaxalpan (RH27Bc) es la segunda del sitio de estudio, con una superficie de 1,608.95 km<sup>2</sup>. Es de tipo abierta con un

máximo de orden de magnitud de 6, forma parte de la región hidrológica Tuxpan-Nautla y de la cuenca Río Tecolutla. Desde la zona de estudio se aprecia una dirección de escorrentía al noreste. Dentro de la zona de estudio no existen efluentes permanentes, sino más bien son temporales y dependen de la precipitación. Asimismo, dentro de la zona de estudio se presentan dos lagunas que se pueden observar en la Figura 5 (Rosas, 2017).



**Figura 5. Hidrología superficial de la zona de estudio. Modificado de Rosas (2017).**

Rosas (2017) mediante un análisis hidrológico, establece que este posible yacimiento geotérmico de roca seca caliente, se encuentra dentro de la caldera Acoculco. Y la zona está en el parteaguas de dos cuencas alargadas con relieves abruptos y pendientes pronunciadas. Estas cuencas son maduras o de pie de montaña, con pendientes abruptas en sus zonas bajas; lo que puede implicar mayores velocidades.

### 3.4. Geología

Los procesos tectónicos regionales que han ocurrido en la zona de estudio y sus alrededores se pueden dividir en tres episodios de diferentes características. Primero, un régimen tectónico compresivo en el Cretácico Tardío produjo una serie de pliegues y fallas inversas orientadas NW-SE. Posteriormente una fase de distensión generó fallas normales con la misma orientación, cortando la secuencia sedimentaria. Finalmente, en el Plioceno ocurrió el evento tectónico regional más reciente, que originó fallas y fracturas NE-SW que afectaron a toda la secuencia (De la Cruz y Castillo-Hernández, 1986).

La caldera Acoculco forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y se ubica en la intersección de dicha provincia con la Sierra Madre Oriental (SMOr). El yacimiento geotérmico se ha propuesto que esté localizado dentro de la Caldera Acoculco, la cual consta de rocas volcánicas de edad Mioceno-Cuaternario tardío, asociadas a la FVTM, sobre un basamento sedimentario (López-Hernández *et al.*, 2009; Verma y Tapia, 2001). El espesor total de los productos volcánicos es de 790 m y se encuentran subyacidos por una secuencia jurásica-cretácica (De la Cruz y Castillo-Hernández, 1986).

Las rocas que afloran dentro de la zona de estudio constan de lavas que varían en un rango de composición de basálticas a riolíticas, también se encuentran domos riolíticos, conos de cenizas, y algunas láminas de sedimentos lacustres (secuencia de láminas blancas arcillosas que alternan con estratos volcanoclásticos muy delgados grises oscuros) y zonas de alteración hidrotermal (Figura 6) (Sosa-Ceballos *et al.*, 2018; Avellán *et al.*, 2018).

López-Hernández *et al.* (2009) afirman que en el complejo de caldera las rocas volcánicas cubren los sistemas de fallas con tendencia regional NW y NE pero que, a pesar de eso, al SW se puede observar un alineamiento de conos volcánicos medianos que siguen la tendencia NE-SW.

Los sistemas de fallas regionales con tendencia NW-SE y NE-SW aparentemente fueron conductos permeables para el flujo de fluidos de antiguos sistemas hidrotermales formados en ambas calderas. Estudios en el distrito minero Pachuca-Real del Monte, localizado al noroeste del complejo Tulancingo-Acoculco confirman la presencia de dichas estructuras, en las cuales, hubo eventos de mineralización por veta con ambas orientaciones durante el Plioceno (Geyne *et al.*, 1963).

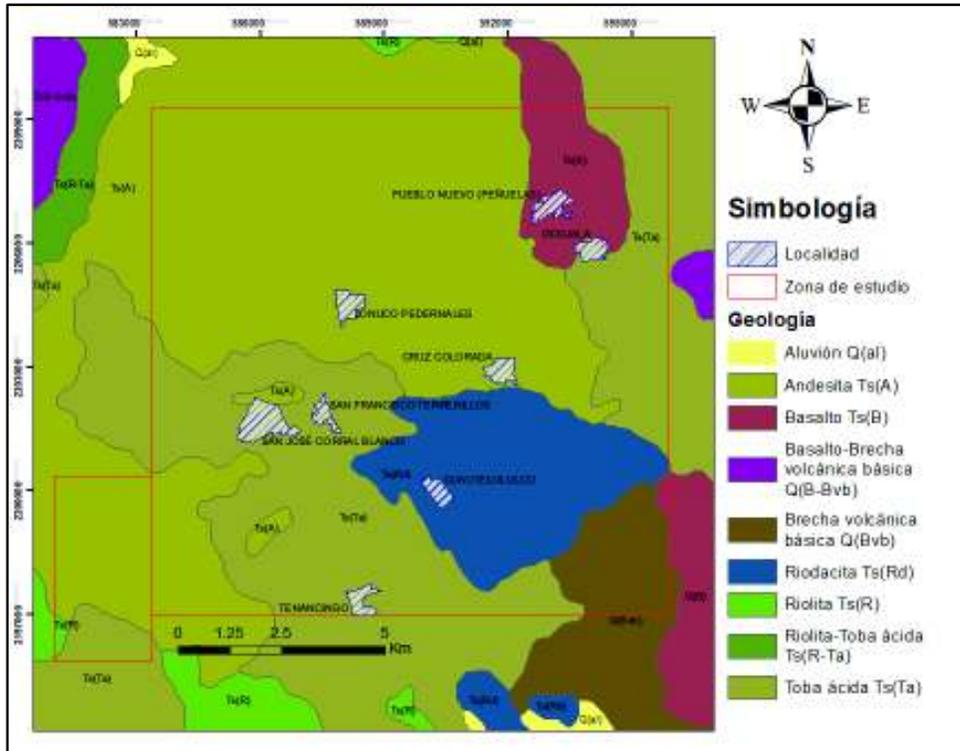


Figura 6. Geología de la zona de estudio, basado en datos de INEGI. Elaboración propia.

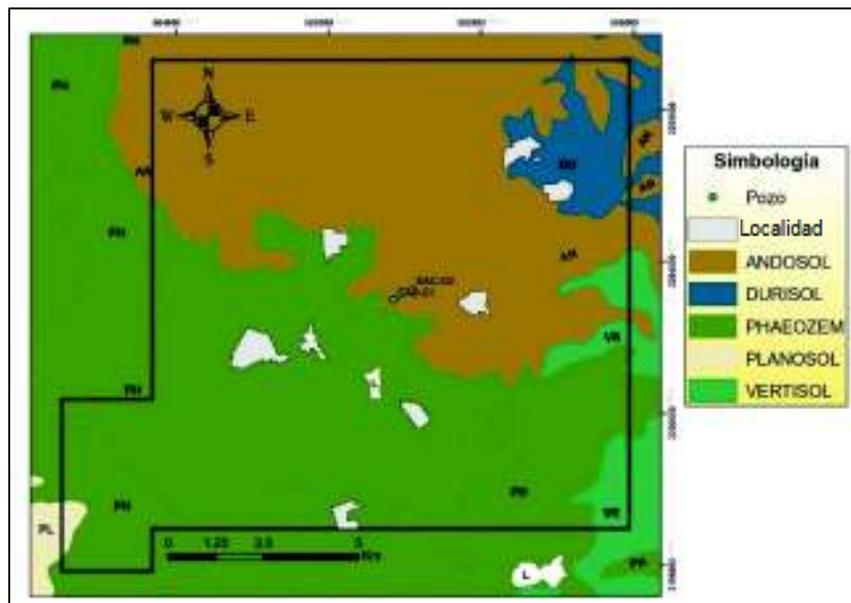
López-Hernández *et al.* (2009), estudiaron los minerales de alteración e inclusiones fluidas de las rocas volcánicas y el basamento sedimentario de la caldera Acoculco, con lo que lograron identificar dos eventos de actividad hidrotermal en la zona, los cuales, dieron lugar a procesos de mineralización secundaria que disminuyeron la permeabilidad de las rocas del depósito. Plantean como hipótesis la posibilidad de que el evento magmático basáltico más reciente ( $0.24 \pm 0.04$  Ma) proporciona el calor para un tercer episodio hidrotermal que está sucediendo actualmente, relacionándolo con las altas (alrededor de  $300^{\circ}\text{C}$ ) temperaturas medidas en el pozo exploratorio EAC-1 (López *et al.*, 1996; López-Hernández y Castillo-Hernández, 1997; López-Hernández *et al.*, 2009).

A mayores profundidades la permeabilidad podría estar controlada por canales de disolución de calizas. Dichos canales podrían actuar como conductos que conectan el sistema hidrotermal profundo de Acoculco con los balnearios (manantiales calientes) de Chignahuapan, localizados 19 km al Sureste. En ese lugar el agua fluye desde cavernas de calizas a 790 m debajo de la elevación promedio de los manantiales (tibios) de Acoculco (López-Hernández *et al.*, 2009).

### 3.5. Edafología

Según los datos de suelos cartografiados por INEGI (2013) a escala 1:250,000 en la zona de estudio hay cinco tipos de suelo clasificados por el sistema FAO/UNESCO (versión de 1988). Los tipos de suelo que suponen la mayor extensión territorial son Phaeozem (también llamado Feozem) y Andosol.

El Feozem predomina en la porción suroeste de la zona de estudio mientras que el Andosol predomina hacia el noreste (Figura 7). En proporciones mínimas aparecen suelos tipo Durisol, Planosol y Vertisol. A continuación, se describen algunas características de los tipos de suelo muestreados, con base en la información de la Base de Referencia Mundial (WRB) (FAO, 2015a):



**Figura 7. Edafología de la zona de estudio, basado en datos del INEGI (2013). Elaboración propia.**

Los suelos de tipo Phaeozem, son suelos superficiales oscuros, ricos en materia orgánica. Incluyen suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental. Pueden o no contener carbonatos secundarios, pero tienen alta saturación con bases en el metro superior del suelo. Se desarrollan a partir de materiales parentales no consolidados, predominantemente básicos. Pertenecen a ambientes de cálidos a frescos, regiones moderadamente continentales, suficientemente húmedas de modo que la mayoría de los años hay alguna percolación a través del suelo, pero también con periodos en los cuales el suelo se seca. Se trata de tierras llanas a onduladas, la vegetación natural es pastizal

como la estepa de pastos altos y/o bosque. Son suelos porosos, fértiles y son excelentes tierras agrícolas en las cuales se puede producir: soja, trigo, algodón, cebada y vegetales. También se utilizan estos suelos para la cría de ganado y engorda en pasturas mejoradas. La erosión eólica e hídrica resultan de gran impacto (Jahn *et al.*, 2006).

Andosol: se derivan comúnmente de productos volcánicos (tales como cenizas, toba, piedra pómez, escoria y otros) bajo casi cualquier clima. También se pueden formar a partir de otros materiales parentales ricos en silicato, bajo ciertas condiciones ambientales. En Rusia se les llama suelos de cenizas volcánicas. Típicamente son oscuros y de paisajes volcánicos. Pueden encontrarse a cualquier elevación sobre el nivel del mar, en su mayoría con una amplia gama de tipos de vegetación. Este tipo de suelo tiene un alto potencial para la producción agrícola. Se trata de suelos fértiles en general. (FAO, 2015a; Jaramillo, 2002; SSS, 1999).

Durisol: se desarrollan a partir de materiales ricos en silicatos, principalmente depósitos aluviales y coluviales. Se encuentran en llanuras aluviales planas y ligeramente inclinadas, terrazas y planicies de pie de monte con suave pendiente en regiones áridas, semiáridas y mediterráneas. Se trata de suelos fuertemente intemperizados con una capa dura de sílice secundaria (llamada horizonte petrodúrico) o nódulos de sílice secundaria (horizonte dúrico); es común que el horizonte petrodúrico quede expuesto a la superficie (debido a la erosión del suelo) en terrenos con pendientes suaves. El uso de este tipo de suelo se limita a la ganadería extensiva (pastizales) (FAO, 2015a).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Muestreo

El trabajo de campo se realizó en abril de 2018, que correspondió a la temporada de secas del año en mención. También se tuvieron muestras de campañas anteriores, que fueron obtenidas en época de secas y en época de lluvias desde el año 2015 al 2017. Se tomaron las coordenadas de cada punto muestreado, haciendo uso de un sistema de posición global (GPS), para poderlas ubicar en un mapa (Figura 8).

La mayoría de las parejas se localizan en el sector central de la zona de estudio. Las parejas están conformadas por dos muestras que se tomaron del mismo sitio o a menos de 500 m de distancia entre ambas, una en temporada de secas y la otra en temporada de lluvias. También se tomó una muestra en cada extremo (N, S, NO, SO, NE y SE) de la zona de estudio. Dos de las parejas y uno de los extremos corresponden a zonas con manifestaciones superficiales asociadas a actividad hidrotermal (Los Azufres, Alcaparros y Tehuacán).

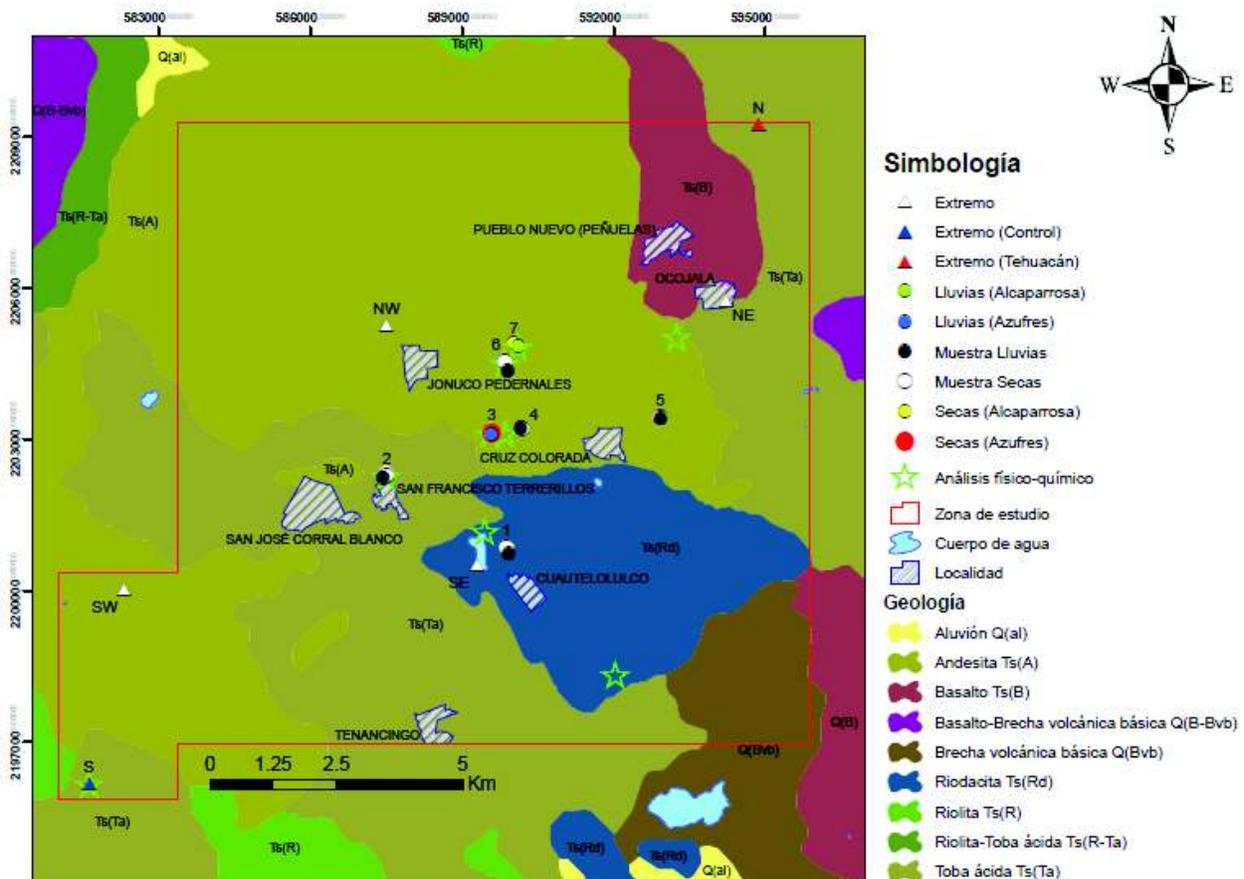


Figura 8. Ubicación de las muestras de suelo analizadas.

Se recolectaron muestras de suelo en zonas circundantes a cuerpos de agua (río, presa, arroyo, etc.) debido a que el ascenso de gases desde el subsuelo, hacia la superficie, es observable en algunos de esos cuerpos. El trabajo de campo se realizó en compañía de investigadores que analizaban otros aspectos ambientales del área y recolectaron muestras de agua. Por lo que la campaña de muestreo sirvió para más de un propósito.

Dos métodos diferentes de muestreo se llevaron a cabo: uno para analizar propiedades fisicoquímicas del suelo y otro para analizar la composición elemental del mismo. Ambos análisis se realizaron posteriormente, en laboratorios de CICESE-CeMIE-Geo en Ensenada, Baja California. Los muestreos se hicieron con base en las recomendaciones de la NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

Las muestras para análisis fisicoquímico (textura, pH, materia orgánica y conductividad eléctrica) se obtuvieron mediante la homogeneización de un metro cúbico del suelo con el uso de herramientas de mano (pico y pala) (Figura 9). Una vez homogeneizado el suelo, se tomaron submuestras en bolsas de plástico resellables.



**Figura 9. Fotografías del muestreo de suelo para análisis fisicoquímico.**

Las muestras para el análisis químico elemental, se recolectaron insertando un nucleador de acero inoxidable de manera vertical dentro del suelo, obteniendo perfiles de 50 cm. En el campo se divide el perfil en submuestras de 10 cm que se guardaron en bolsas de plástico resellables (Figura 10). Al final, todas fueron trasladadas a las instalaciones de CICESE, en Ensenada, B. C., donde serían analizadas en los laboratorios correspondientes.



**Figura 10. Fotografías del muestreo de suelo para análisis químico elemental.**

De las muestras que se tomaron en campañas anteriores, ya se tenían algunas analizadas y otras estaban congeladas dentro de las instalaciones de CICESE-CeMIE-Geo. Por lo que se tuvieron resultados de análisis químico elemental de algunas muestras y de otras, se tuvieron que preparar para su análisis con la misma metodología (pastillas prensadas. Esta metodología se describe más adelante) que se empleó para las muestras ya analizadas. Según los archivos de la institución, los datos de información geográfica y las claves asociadas a cada muestra, se sabe que: aquellas que ya habían sido analizadas con anterioridad fueron tomadas en el año 2015. Mientras que las que se encontraban congeladas y que no habían sido analizadas, corresponden a trabajos de campo de los años 2016 y 2017.

## **4.2. Propiedades fisicoquímicas**

Se determinó la textura de la muestra mediante el método de Bouyoucos. Se midió el pH y la conductividad eléctrica en el extracto de suelo, utilizando un potenciómetro y un conductímetro, respectivamente. Y se determinó el contenido de materia orgánica mediante pruebas por ignición en una mufla a 500 °C.

La textura se basa en diferentes combinaciones de arcilla, limo y arena que conforman la distribución de tamaños de partículas de un suelo. Se determinó utilizando el método de Bouyoucos (también conocido como del hidrómetro), el cual es uno de los métodos clásicos más específicos en este rubro. Algunas de sus limitaciones son el tiempo consumido en cada análisis y el pretratamiento que exige para la eliminación de materia orgánica (Rozados *et al.*, 2004).

El método de Bouyoucos, se basa en la premisa de que, sí se tienen sólidos esféricos de diferente tamaño suspendidos en un líquido, las partículas más grandes caerán a mayor velocidad que aquellas que posean un radio menor. Lo anterior tiene su fundamento en la ley de Stokes, que para el hidrómetro puede ser escrita como una dependencia lineal entre el diámetro de la partícula,  $X$  y el inverso de la raíz cuadrada del tiempo, del tipo:

$$X = \theta t^{-1/2}$$

Donde  $\theta$  es un parámetro de sedimentación, en función de la profundidad de asentamiento del hidrómetro, la viscosidad de la solución y la densidad de la partícula y la solución (Medina-González *et al.*, 2007). Ya que la viscosidad de un líquido está fuertemente influenciada por la temperatura, es necesario hacer algunas correcciones (Huluka y Miller, 2014).

#### 4.2.1. Toma de muestra

Se excavó y homogeneizó un metro cúbico de suelo (1m x 1m x 1m) haciendo uso de pico y pala, en cada punto. De dicho volumen se extrajeron, aproximadamente, 2 kg de muestra distribuidos en tres bolsas de plástico transparente, que impidieron la entrada o salida de humedad. Antes de excavar el hoyo, se retiró la vegetación superficial en los puntos donde fuera abundante. Una vez embolsadas las muestras, fueron almacenadas a temperatura ambiente dentro de una caja de plástico que las protegía de los rayos solares, para finalmente ser enviadas por paquetería a las instalaciones de CICESE en Ensenada, B.C.

#### 4.2.2. Preparación y análisis

Los primeros parámetros fisicoquímicos en ser medidos fueron el pH y la conductividad eléctrica. Esto se realizó pesando 10 g de muestra en una balanza analítica con precisión de 0.001 g y se pasó a un vaso de precipitado de 60 ml de capacidad. Después, se añadieron 40 ml de agua destilada con pH de 6.5 y se agitó la mezcla. Una vez asentados los sedimentos, se realizaron las mediciones utilizando un potenciómetro modelo Osiris de la marca Haus (Figura 11a), previamente calibrado con soluciones reguladoras pH 4.00, 7.00 y 10.00. Las mediciones de pH fueron corroboradas con papel tornasol (también llamado papel pH) (Figura 11b).



Figura 11. a) Calibración del potenciómetro y mediciones de pH en extractos de suelo, b) medición de pH con papel pH.

Antes de iniciar con el análisis del hidrómetro para la clasificación de textura, las muestras deben pre tratarse. El pretratamiento que deben recibir depende de la naturaleza de cada una. Para determinar el pretratamiento se añadieron gotas de ácido clorhídrico (HCl) concentrado y peróxido de hidrógeno (agua oxigenada), por separado, sobre porciones de 10 g de cada muestra. Esto se realizó en vidrios de reloj para observar la reacción de los suelos ante dichos compuestos. De lo anterior se obtuvo que el procedimiento adecuado sería la saturación de las muestras, solamente con agua oxigenada, durante 24 h para eliminar el exceso de materia orgánica, y se descartó la presencia de cementantes carbonatados.

Una vez determinado el pretratamiento, se procedió a secar 200 g de cada muestra (húmeda, tal como se obtuvo de campo), en vasos de precipitado, dentro de un horno a 60-70 °C durante 24 h. Transcurrido dicho periodo, haciendo uso de una piseta, se saturaron las muestras con agua oxigenada y se dejaron reaccionar por 24 h más. Posteriormente, se agregaron 400 ml de agua destilada a cada muestra y se dejaron reposar por 24 h. Al día siguiente, se decantó la materia orgánica que se encontraba flotante en las muestras, inclinando el vaso de precipitado, sin agitar los sedimentos y, a continuación, las muestras fueron secadas al horno durante 24 h a 60-70 °C. Finalmente, se pesaron 100 g de cada muestra y se les agregó un agente dispersante en solución, el cual se dejó actuar durante 24 h. Como agente dispersante se preparó una solución de hexametáfosfato de Sodio ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub> con agua destilada, a una concentración de 0.6 g/L.

Una vez concluidos tanto el pretratamiento como la preparación de las muestras, se dio inicio al análisis granulométrico por el método de Bouyoucos, que se describe a continuación:

Con la ayuda de una piseta con hexametáfosfato de sodio en solución, la muestra se transfirió del vaso de precipitado a un vaso metálico diseñado para disgregar aglomeraciones de suelo y se instaló un mezclador eléctrico, el cual se activó durante 5 minutos. Se apagó y se enjuagó con la piseta, sobre el vaso metálico, de tal manera que las porciones de la muestra que pudieran haberse adherido a sus partes fueran recuperadas. A continuación, se retiró el vaso del mezclador y se vertió cuidadosamente en una probeta de vidrio transparente graduada, de 1000 mL. Se le colocó un tapón especial de hule negro y se agitó manualmente durante 60 s. Después, se situó en una mesa plana y se tomó el tiempo con un cronómetro. Se tomaron dos registros a diferentes tiempos de la temperatura y densidad de la solución y del blanco, con un termómetro y un hidrómetro de suelos. El primer registro se realizó a los 40 segundos y el segundo dos horas más tarde. El blanco utilizado consta de un litro de la solución de hexametáfosfato de sodio en una probeta graduada.

Para hacer las correcciones por temperatura se sumó o restó 0.36 g/L por cada grado por encima, o debajo, de los 20 °C, según fuera el caso.

Después de hacer las correcciones por temperatura se utilizaron las lecturas del hidrómetro para calcular las proporciones de arena, limo y arcilla de cada muestra mediante las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Arena} = 100 - \left[ \frac{D_m - D_b}{100} \right]_{40 s}$$

$$\% \text{ Arcilla} = \left[ \frac{D_m - D_b}{100} \right]_{2 h}$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - \% \text{ Arena} - \% \text{ Arcilla}$$

Donde  $D_m$  es la lectura del densímetro en la muestra y  $D_b$  es la lectura en el blanco, al tiempo que indica el subíndice.

Con los datos obtenidos se le asignó un tipo de textura a cada muestra analizada como se ilustra en la sección de resultados del presente trabajo.

### **4.3. Análisis químico elemental**

Se utilizó un equipo de fluorescencia de rayos X para medir la composición elemental de las muestras, tanto de elementos mayores como elementos traza. Debido a la naturaleza de estos análisis, a la sensibilidad del equipo y las bajas concentraciones que presentan algunos elementos traza, las muestras fueron manejadas con cuidado de no contaminarlas, siempre haciendo uso de material limpio para la preparación de cada una.

#### **4.3.1. Toma de muestra**

Se clavó un nucleador de acero inoxidable, de 5 cm de diámetro y 50 cm de largo, dentro del suelo, hasta ser enterrado en su totalidad para obtener todo el perfil de suelo. El muestreo se efectuó con guantes de nitrilo libres de óxido de Zn, para evitar contaminación de la muestra. Una vez retirado del suelo, el nucleador fue colocado horizontalmente sobre la superficie y se procedió a separar el perfil en submuestras de 10 cm de longitud. Cada submuestra se guardó en bolsas de plástico del tipo ziplock. De tal manera que se tienen las submuestras: de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm de profundidad, para cada punto muestreado. La fracción más profunda corresponde al tramo de 40-50 cm, mientras que la más somera corresponde al tramo de 0-10 cm. Se retiró cada submuestra del nucleador haciendo uso de una espátula metálica.

Las muestras fueron congeladas minutos después de su extracción, dentro de un congelador que se encontraba en el vehículo utilizado para el trabajo de campo. Al finalizar, las muestras fueron enviadas en recipientes térmicamente aislados, por paquetería a las instalaciones de CICESE para su futuro análisis.

#### 4.3.2. Preparación y análisis

Las muestras para análisis químico elemental, se prepararon para su medición, en los laboratorios del CeMIE-Geo, en Ensenada, Baja California.

Para la realización del análisis se prepararon pastillas prensadas de cada muestra y de un blanco, que más tarde se introducirían en el equipo de fluorescencia de rayos X. Para mantener el control de las mediciones, se midió un blanco por cada diez muestras, el cual consta del polvo aglutinante utilizado en la preparación de las muestras.

Para los propósitos de este trabajo, bastó con medir únicamente las fracciones superficiales (0-10 cm) y las profundas (40-50 cm) de los sitios de muestreo.

La preparación comienza extrayendo 40 g de muestra congelada, introduciéndola en un contenedor de plástico, tapado y, posteriormente, pesándola en una balanza analítica (Figura 12). Una vez registrado el peso de la muestra en el contenedor, se procede a retirar la tapa del recipiente y sustituirla por un filtro para café, el cual permite la extracción de humedad durante la liofilización. Al contenedor se le sujetó el filtro con una liga y se introdujo en una liofilizadora de la marca Labconco Free Zone, la cual se programó a una temperatura de  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$ , una presión de 0.021 mPa y se dejó actuar durante 48 h. Transcurrido ese periodo, se verificó que no hubiera signos visibles de humedad en la muestra y se retiraron de la liofilizadora, se les puso la tapa de plástico que tenían inicialmente y se pesaron de nuevo.



Figura 12. Proceso de pesado y liofilizado de muestras congeladas de suelo.

Después de secarlas, se pesaron 10 g de muestra y se molieron en un molino de discos vibratorios de ágata, a 700 rpm durante 2 min. A continuación, se mezclaron 5 g de suelo molido con 1 g de aglutinante en un mortero de ágata y se depositaron cuidadosamente con cuchara de plástico en un recipiente especial que constituye la base de las pastillas prensadas, llamado PlastiCup. El PlastiCup, cargado con la muestra, se introdujo en un dado mecánico que, a su vez, se instala dentro de una prensa hidráulica. La prensa se programó para ejercer una presión de 40 ton durante 45 s sobre le plasticup (Figura 13). Finalmente, se obtuvo la pastilla prensada de cada muestra y se entregaron al técnico de laboratorio responsable de su análisis.



**Figura 13. Proceso de molienda, pesado y prensado de pastillas de suelo para análisis por fluorescencia de rayos X.**

El equipo utilizado para las mediciones elementales fue un equipo de fluorescencia de rayos X (FRX) modelo S8 Tiger (sistema de 4 kW) de la marca Bruker (Figura 14), que es parte de los laboratorios especializados del CeMIE-Geo (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica) en CICESE.

El S8 Tiger emplea 2 colimadores (uno a  $0.23^\circ$  y otro a  $0.46^\circ$ ) y está equipado con 5 cristales: LiF 200, LiF 220, XS-Ge-C (multicapa Ge/C), PET (pentaeritrita) y XS-55 (multicapa W/Si). Siempre se usó la rutina Quant-Express-Bestdetection durante 45 min para cada muestra. Los filtros son específicos de cada línea de emisión y vienen configurados y optimizados en el método Quant-Express, por lo que se recomienda para análisis de presencia de todos los elementos de la tabla periódica que van desde el Na y hasta el U.



**Figura 14. Equipo de Fluorescencia de rayos X, S8 Tiger.**

Cabe resaltar que este tipo de análisis se considera semicuantitativo, ya que no se hizo una curva de calibración. Sin embargo, estos resultados son de gran importancia para identificar los sitios y los elementos más relevantes en la zona de estudio y posteriormente, se puede hacer un análisis detallado a partir de la digestión ácida de las muestras y mediciones con ICP-MS (espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente).

#### **4.4. Análisis de resultados**

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de las muestras, fueron analizados por separado siguiendo varias metodologías.

Las proporciones de arenas, limos y arcillas, obtenidas de los análisis granulométricos, fueron graficadas en el triángulo de clasificación de textura del USDA para darle una denominación a cada suelo. Los datos de pH, conductividad eléctrica y contenido de materia orgánica se organizaron y presentaron en la sección de resultados.

Con los datos de las concentraciones elementales, obtenidos del análisis por fluorescencia de rayos X, se hizo la estadística básica para elementos mayores y trazas, en cada una de las estaciones de muestreo (secas y lluvias). Además, fue posible obtener el Factor de Enriquecimiento, el Índice de Geoacumulación y el Factor Antropogénico (Barbieri, 2016) de los suelos estudiados, de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

**Factor de Enriquecimiento:**

$$FE = \left[ \frac{(C_n/C_l)_{muestra}}{(C_n/C_l)_{corteza\ terrestre}} \right]$$

Dónde, FE es el Factor de Enriquecimiento,  $C_n$  es la concentración del elemento medido, y  $C_i$  es la concentración del elemento litogénico, que para el caso de este estudio fue el Ti.

Una vez que se tienen los resultados graficados, se sigue el siguiente criterio para determinar la magnitud del enriquecimiento del elemento, con respecto a la concentración que se tiene reportada para la corteza terrestre (Wedepohl, 1995).

EF < 2 Enriquecimiento deficiente o mínimo
EF de 2 a 5 Enriquecimiento moderado
EF de 5.1 a 20 Enriquecimiento significativo
EF de 20.1 a 40 Enriquecimiento muy elevado
EF más de 40 Enriquecimiento extremadamente elevado

**Índice de Geoacumulación:**

$$I_{geo} = \text{Log}_2 \left[ \frac{C_n}{(1.5 * C_{n \text{ corteza terrestre}})} \right]$$

Donde,  $I_{geo}$  es el Índice de Geoacumulación y  $C_n$  es la concentración del elemento. En este caso también se consideran las concentraciones reportadas para la corteza terrestre (Wedepohl, 1995). El índice de geoacumulación fue propuesto originalmente por Muller (1969) con la intención de determinar la contaminación por metales en sedimentos y suelos comparando las concentraciones actuales con los niveles pre-industriales. Muller (1969) estableció clases para describir los distintos valores de  $I_{geo}$ .

<b>Igeo</b>	<b>Clase de Igeo</b>	<b>Calidad del suelo</b>
Cercano a 0	0	Prácticamente sin contaminación
> 0-1	1	Poco contaminado
> 1-2	2	Medianamente contaminado
> 2-3	3	Entre medianamente y fuertemente contaminado
> 3-4	4	Fuertemente contaminado
> 4-5	5	Muy fuertemente contaminado
> 5	6	Extraordinariamente contaminado

**Factor Antropogénico:**

$$FA = \left[ \frac{(C_n)_{superficial}}{(C_n)_{profundo}} \right]$$

Donde, FA es el Factor Antropogénico, y  $C_n$  es la concentración del elemento. El subíndice *superficial* corresponde a las submuestras de 0-10 cm, mientras que el subíndice

*profundo* se refiere al tramo de 40-50 cm. Para este factor se considera que valores menores de 1, representan una composición química regional y valores mayores de 1, se consideran antropogénicos (Chen et al., 2005; Fernandes y Nayak, 2016).

Además de los índices mencionados, los datos de composición química de los elementos en las muestras fueron sometidos a un análisis estadístico dentro del software Origin pro 9.1, con lo cual se realizaron correlaciones positivas y negativas entre parejas de elementos.

Los mapas de edafología, geología, hidrología de la zona de estudio, así como los que ilustran los puntos muestreados, se realizaron en el software ArcGis, con datos abiertos al público del INEGI, en formato shapefile y con los datos recolectados del trabajo de campo.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Muestreo

En total, catorce muestras de suelo de las obtenidas en el muestreo de abril de 2018 fueron consideradas durante esta investigación. Nueve de ellas se muestrearon según la metodología descrita para hacer medición de propiedades fisicoquímicas (textura, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica). Mientras que cinco fueron perfiles de suelo, para hacer análisis químicos elementales.

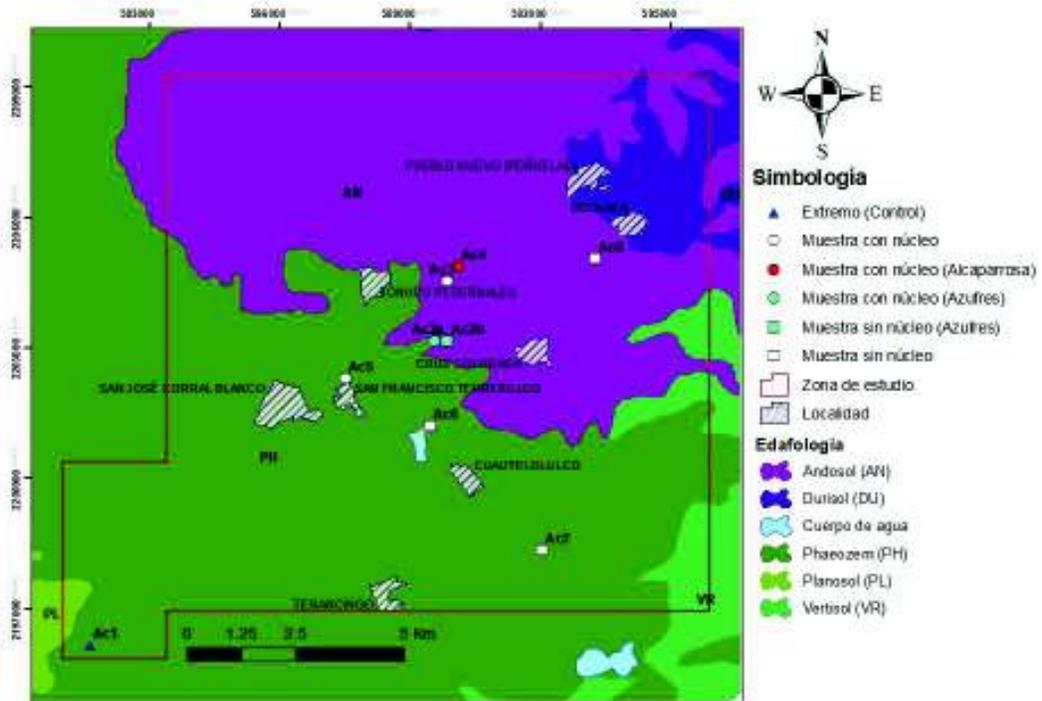
En la Tabla 3 se muestra el inventario de muestras para los análisis de propiedades fisicoquímicas del suelo.

**Tabla 3. Inventario de muestras de suelo para el análisis de propiedades fisicoquímicas.**

<i>ID campo</i>	<i>ID mapa</i>	<i>Símbolo mapa</i>	<i>A. elemental</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Tipo de suelo</i>
<i>A18AC01</i>	Ac1	Triángulo azul	Si	Control	Phaeozem
<i>A18AC06a</i>	Ac2a	Círculo celeste	Si	Azufres poza azul	Andosol
<i>A18AC06b</i>	Ac2b	Cuadro celeste	No	Azufres bosque	Andosol
<i>A18AC07</i>	Ac3	Círculo blanco	Si	E Jonuco Pedernales	Andosol
<i>A18AC08</i>	Ac4	Círculo rojo	Si	Alcaparrosa	Andosol
<i>A18AC09</i>	Ac5	Círculo blanco	Si	Río San Fco. Terrerillos	Phaeozem
<i>A18AC10</i>	Ac6	Cuadro blanco	No	Presa San Fco.	Phaeozem
<i>A18AC11</i>	Ac7	Cuadro blanco	No	Capulaque	Phaeozem
<i>A18AC30</i>	Ac8	Cuadro blanco	No	800 m SW de Ocojala	Andosol

La ubicación de las nueve muestras de suelo para análisis de propiedades fisicoquímicas, se muestran en la Figura 15. En dicha figura, se asignó una simbología particular en relación a su ubicación y a la de los sitios geotérmicos. Se utilizó un cuadro para representar las muestras que no cuentan con análisis elementales en el mismo punto; las muestras localizadas en los extremos de la zona de estudio se ilustraron mediante un triángulo y, aquellas cercanas a una pareja de muestras analizadas elementalmente, se indican con un círculo. Los colores celeste y rojo de las figuras del mapa denotan que la muestra se ubica en un sitio geotérmico. El triángulo azul corresponde al punto control.

Las manifestaciones geotérmicas de Los Azufres y Alcaparrosa fueron muestreadas para la medición de sus propiedades fisicoquímicas, sin embargo, no fue posible realizar este tipo de muestreo en la manifestación de Tehuacán debido a que la profundidad del suelo no superaba los 15 cm, ni en la manifestación ni en sus alrededores.



**Figura 15. Mapa de ubicación de los sitios de muestreo de suelos para análisis de propiedades fisicoquímicas. Claves Ac1=Control, Ac2a=Azufres (Poza azul), Ac2b=Azufres (Bosque), Ac3=Jonuco Pedernales, Ac4=Alcaparrosa, Ac5=Río san Fco. Terrerillos, Ac6=Presas San Francisco, Ac7=Capulaque, Ac8=SW de Ocojala.**

En la zona de Los Azufres se tomaron dos muestras para análisis fisicoquímicos: la primera (Ac2a) se recolectó en el sector norte del lago, mientras que la segunda (Ac2b) se obtuvo a 300 m hacia el este, donde inicia el bosque de pino (Figura 16).



**Figura 16. Sitio Ac2b con vista hacia el lago de Los Azufres (Ac2a).**

En la manifestación geotérmica de Alcaparrosa se extrajo muestra tanto para análisis elemental como para propiedades fisicoquímicas.

Para conformar las siete parejas de muestras de suelo para su análisis químico elemental, se utilizaron dos muestras recolectadas durante abril de 2018 y se complementaron con doce muestras obtenidas en muestreos anteriores. El criterio de elección fue tener una muestra del periodo de secas y una de lluvias del mismo sitio o a menos de 500 m de separación entre ambas. Así mismo, se consideraron seis muestras alejadas del sector central de la zona de estudio (extremos), todas pertenecientes al periodo de secas, de las cuales tres corresponden al muestreo efectuado en abril de 2018 (claves de campo: A18Ac31, A18Ac1a y A18Ac3a). En la Tabla 4 y en la Figura 17, se presenta el inventario de muestras para análisis químico elemental.

**Tabla 4. Inventario de muestras de suelo para su análisis elemental por fluorescencia de rayos X.**

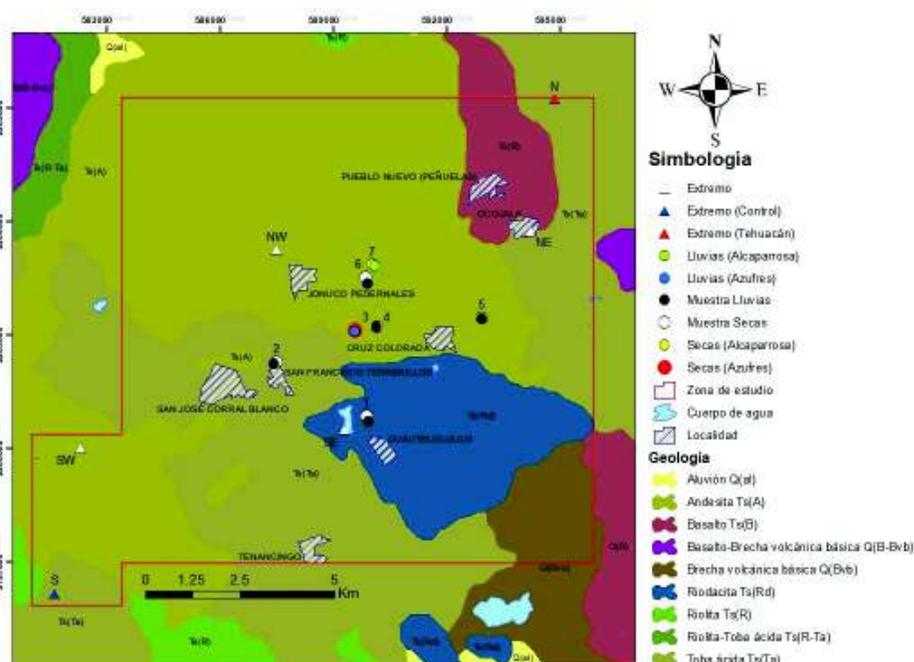
<i>ID campo</i>	<i>ID mapa</i>	<i>Símbolo mapa</i>	<i>Temporada de muestreo</i>	<i>Observaciones</i>
<b>Extremos</b>				
A18Ac31	N	Triángulo rojo	Secas 2018	Manifestación "Tehuacán"
A18Ac1a	S	Triángulo azul	Secas 2018	Control
A17Ac1a	NE	Triángulo blanco	Secas 2017	Arroyo en Ocojala
A17Ac5a	NW	Triángulo blanco	Secas 2017	600 m NW de Jonuco Pedernales
A15Ac8a	SE	Triángulo blanco	Secas 2015	Presa San Francisco
A18Ac3a	SW	Triángulo blanco	Secas 2018	Pozo en la parte alta de un cerro
<b>Parejas</b>				
A15Ac10	1	Círculo blanco	Secas 2015	500 m N de Cuautelolulco
B15Ac6		Círculo negro	Lluvias 2015	
A18Ac9	2	Círculo blanco	Secas 2018	San Fco. Terrerillos
M12		Círculo negro	Lluvias 2016	
A15Ac1a	3	Círculo rojo	Secas 2015	Manifestación Los Azufres
B17Ac4a		Círculo azul	Lluvias 2018	
A15Ac6a	4	Círculo blanco	Secas 2015	500 m E de Los Azufres
B17Ac5a		Círculo negro	Lluvias 2017	
A17Ac2a	5	Círculo blanco	Secas 2017	1 km NE de Cruz Colorada
B17Ac2a		Círculo negro	Lluvias 2017	
A18Ac7a	6	Círculo blanco	Secas 2018	300 m S de Alcaparrosa
M22a		Círculo negro	Lluvias 2016	
A17Ac3a	7	Círculo amarillo	Secas 2017	Manifestación Alcaparrosa
B17Ac3a		Círculo verde	Lluvias 2017	

Las seis muestras más alejadas al centro de la zona de estudio se denominaron "extremos". De tal modo que se tienen extremos norte, sur, noreste, sureste, noroeste y suroeste. El extremo norte corresponde a la zona de la manifestación geotérmica "Tehuacán", la cual se sitúa sobre el perímetro del polígono de exploración. Por las condiciones del sitio, solo fue posible extraer la fracción superficial del suelo (0-10 cm) de este punto, con la cual se hicieron los análisis elementales del lugar.

El extremo sur representa un punto de control ambiental, debido a que se ubica fuera de las inmediaciones del polígono de exploración, además de que pertenece a otra cuenca hidrológica, por lo que no hay influencia directa de la zona geotérmica. Así entonces, se consideró que, desde el punto de vista químico-ambiental, no tiene influencia de los procesos hidrotermales-geotérmicos. El extremo NE se localiza al sur de la localidad de Ocojala. Mientras que el SE corresponde a la Presa San Francisco. El NW se localiza a 600 m de la localidad de Jonuco Pedernales y el extremo SW se obtuvo a 3.5 km de San José Corral Blanco.

Las parejas de muestras de suelo para análisis químico elemental fueron enumeradas para simplificar su descripción. De tal manera que se cuenta con siete parejas de muestras, enumeradas consecutivamente del uno al siete, cercanas al centro de la zona de estudio, rodeadas por los extremos mencionados en párrafos anteriores.

De las siete parejas para análisis elemental, solo dos están conformadas por una muestra de secas del muestreo de abril de 2018: las parejas dos y seis. La muestra de secas de la pareja dos (clave de campo: A18Ac09), se obtuvo de una zona con mucha maleza y humedad, en el meandro de un arroyo que atraviesa la carretera. La muestra de secas que compone a la pareja seis (clave de campo: A18Ac07), se tomó a menos de 400 m al sur de la manifestación geotérmica de Alcaparrosa.



**Figura 17. Mapa de los sitios de muestras de suelo para análisis químico elemental. Parejas: 1=norte de Cuautelolulco, 2=San Fco. Terrorillos, 3=Los Azufres (manifestación), 4=Los Azufres (bosque), 5=noreste de Cruz Colorada, 6=sur de Alcaparrosa, 7=Alcaparrosa (manifestación).**

## 5.2. Propiedades fisicoquímicas

A continuación, se presentan los resultados de los análisis texturales, de contenido de materia orgánica, pH y conductividad eléctrica.

### 5.2.1. Textura

Con base en los porcentajes de arena, limo y arcilla de cada muestra, obtenidos de los análisis por el método de Bouyoucos (Tabla 4), se clasificaron los suelos según el triángulo de clasificación de textura, propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) (Figura 18).

**Tabla 5. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de los suelos de Acoculco.**

No	Sitio	ID muestra	arcillas %	limos %	arenas %	Textura	MO %	CE $\mu\text{S/cm}$	pH
1	Extremo S	Ac1	11.8	16.0	72.2	Franco arenosa	3.7	202	6.3
2	Los Azufres	Ac2a	6.9	16.1	77.0	Franco arenosa	2.9	8.4	2.7
3	Los Azufres	Ac2b	15.3	44.4	40.3	Franca	24.6	53.1	5.5
4	E Jonuco Pedernales	Ac3	16.9	24.4	58.7	Franco arenosa	7.9	714	4.4
5	Alcaparrosa	Ac4	16.3	24.9	58.7	Franco arenosa	12.8	28.4	2.2
6	Río	Ac5	28.6	41.1	30.3	Franco arcillosa	10.9	102.6	4.8
7	Presa	Ac6	56.3	28.1	15.5	Arcillosa	16.6	890	5.5
8	Capulaque	Ac7	33.8	27.0	39.2	Franco arcillosa	10.6	98.2	5.1
9	Ocojala	Ac8	21.3	48.7	29.9	Franca	10.9	74.3	5.7

Los tipos de suelos muestreados caen en cuatro categorías distintas. Cuatro de los nueve suelos muestreados son del tipo franco-arenoso. De los anteriores, dos corresponden a zonas geotérmicas, uno de ellos constituye un punto extremo y representa la zona de Alcaparrosa. Dos de los suelos obtenidos son del tipo franco, uno de los cuales se recolectó en la manifestación de los Azufres, donde inicia el bosque de pino. Otros dos son del tipo franco-arcilloso. Y finalmente, se obtuvo un suelo arcilloso de la orilla de la presa San Fco. (Figura 18).

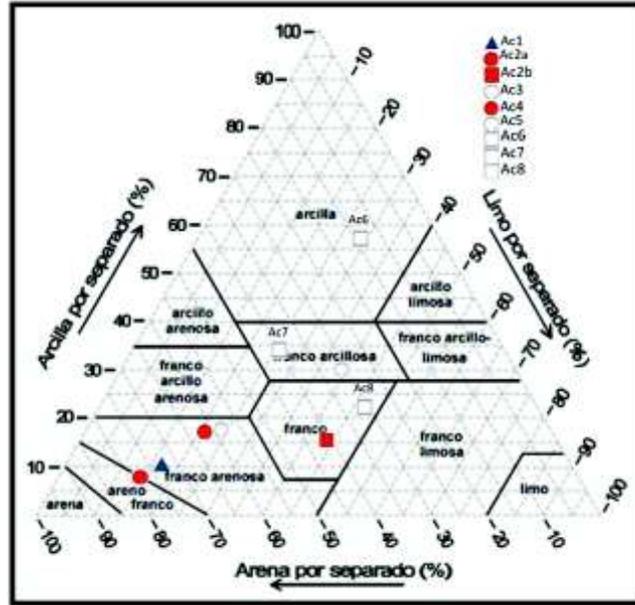


Figura 18. Análisis textural del suelo en base al porcentaje de arena, limo y arcilla. Ac1=Control, Ac2a=Azufres (Poza azul), Ac2b=Azufres (Bosque), Ac3=Jonuco Pedernales, Ac4=Alcaparrosa, Ac5=Río san Fco. Terrerillos, Ac6=Presa San Francisco, Ac7=Capulaque, Ac8=SW de Ocojala.

### 5.2.2. Materia orgánica

De acuerdo a la tabla 4, el contenido de materia orgánica de los suelos de la zona de estudio, oscila entre 2.95 y 24.6%. Los valores máximo y mínimo de este parámetro se obtuvieron de muestras tomadas en la manifestación geotérmica de Los Azufres. La zona de la cual se obtuvo el valor más alto corresponde a un suelo de textura franca, donde inicia un bosque de pino, a trescientos metros al este de la manifestación (Figura 16). Mientras que el valor más bajo proviene de una muestra tomada dentro de la manifestación y es del tipo franco arenoso. El segundo valor más bajo (3.65%) se obtuvo del extremo sur (punto control). Y el segundo valor más alto es de 16.6%, de un suelo arcilloso recolectado en las inmediaciones de la Presa San Francisco. Tres muestras tienen valores entre 10 y 11%, dos de ellas corresponden a suelos franco arcillosos y la otra a un suelo franco. En la manifestación geotérmica de Alcaparrosa, se obtuvo un valor de 12.85% para materia orgánica, de un suelo franco arenoso. La muestra Ac3 corresponde a un suelo franco arenoso en el cual se midió un contenido de materia orgánica del 7.9%.

### 5.2.3. Conductividad eléctrica

Los valores de conductividad eléctrica, medidos de las muestras de suelo de Acozulco (Tabla 4), varían en un rango de 8.4 a 890  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores más bajos (8.4, 28.4 y 53.1)

corresponden a las muestras Ac2a, Ac2b y Ac4, pertenecientes a las manifestaciones geotérmicas de Los Azufres y Alcaparrosa, respectivamente. Los valores más altos (890 y 714) corresponden a las muestras Ac6 y Ac3, obtenidas de puntos dentro de la zona de estudio, que cuentan con parejas de núcleos de análisis químicos. El punto control (Ac1) tiene una conductividad eléctrica de 202  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este parámetro se relaciona con la presencia de sales disueltas en el extracto del suelo, lo que indica la cantidad de elementos solubles en agua disponibles en el suelo. Por lo que se esperaría que las zonas geotérmicas contengan la menor cantidad de elementos químicos solubles en agua, al contrario de las zonas Ac6 y Ac3, donde tendrían mayor cantidad de elementos químicos solubles.

#### **5.2.4. pH**

De acuerdo a la Tabla 4, los valores de pH varían de un valor mínimo de 2.2 a un máximo de 6.3. Los valores mínimos, de 2.2 y 2.7, corresponden a las manifestaciones geotérmicas de Los Azufres y Alcaparrosa, respectivamente. El pH de mayor valor (6.3) se registró en el punto control Ac1, al suroeste de la zona de estudio. El pH del resto de los suelos fluctúa entre 4.4 y 5.7. De acuerdo a la clasificación de suelos de acuerdo a sus valores de pH (Figura 2), se observa que los suelos de esta región son suelos minerales de regiones húmedas y son materiales acídicos. Todos los suelos tienden a la acidez ( $\text{pH} < 6$ ) desde moderada, fuerte a muy fuerte. Regularmente a pH ácido los elementos químicos del suelo son solubilizados en el agua, lo que permite su transporte.

Los valores máximos y mínimos corresponden a texturas franco arenosas, por lo que no parece haber una correspondencia entre pH y textura del suelo. Mientras que se aprecia que los valores mínimos de pH coinciden con valores mínimos de conductividad eléctrica.

### **5.3. Análisis químico elemental**

Los resultados del análisis por fluorescencia de rayos X se presentan en concentraciones de porcentaje en peso (%w), para elementos mayores y partes por millón (mg/Kg) para elementos traza. En total se determinó que, para fines de discusión en este trabajo, se considerarán 11 elementos mayores y 20 elementos traza, por considerarlos de mayor importancia en la región.

En la Tabla 5, se observan los resultados de la estadística básica de la concentración de los elementos mayores para la fracción superior (0-10 cm) y la profunda (40-50 cm), así como para la temporada de secas y de lluvias. Considerando los valores de la media, en orden de abundancia se tiene presencia de  $\text{Si} > \text{Al} > \text{Fe}$ , la cual no varía independientemente de la estación o de la profundidad. Después se tiene la presencia de  $\text{K} > \text{Ca} > \text{Ti}$  en la época de secas en ambas profundidades. Para secas en la fracción superior el orden de abundancia continúa con

Na>S>Mg>Zr>P. Para secas en la fracción profunda, la abundancia continúa con S>Na>Mg>P>Zr. Observando una variación en las concentraciones de S, Na, P y Zr. Y para la época de lluvias en ambas fracciones, se tiene el siguiente orden de abundancia: S>K=Ca>Ti>Na>Zr>Mg>P. En general, el orden de abundancia de los elementos mayores no varía en la fracción profunda, independientemente de la estacionalidad. Sin embargo, en la fracción superior si se observa una variabilidad estacional de Na, P, S y Zr, lo que indica la posibilidad de procesos dinámicos que involucren estos elementos.

Cabe destacar que el S aumenta su concentración con la profundidad y presenta una concentración menor en la época de secas. En el caso del Na, se aprecia un aumento en su concentración, únicamente en la fracción superior y en la época de secas. Con respecto al resto de los elementos mayores, todos mantienen su rango de concentración, independientemente de la fracción y de la estacionalidad. Para los elementos mayores, no se reportan valores máximos permisibles, sin embargo, se observa que los suelos de la región están empobrecidos en P, con respecto al resto de los nutrientes.

**Tabla 6. Estadística básica de las concentraciones de elementos mayores en suelos superiores y profundos.**

<i>Temporada</i>		<i>Elementos mayores (%w)</i>										
<i>Profundidad</i>		<b>Al</b>	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Ti</b>	<b>Zr</b>
<b>Secas</b> <i>0-10 cm</i>	<b>Max</b>	9.7	2.8	7.6	2.9	0.44	1.9	4.4	2.13	29.5	1.3	0.48
	<b>Min</b>	1.1	0.06	0.35	0.69	0.08	0.10	0.01	0.02	22.2	0.38	0.06
	<b>Media</b>	7.4	1.15	4.67	1.65	0.24	0.75	0.11	0.36	27.75	0.79	0.17
<b>Lluvias</b> <i>0-10 cm</i>	<b>Max</b>	8.9	4.1	8.7	3.1	0.4	1.1	0.18	13.4	30.3	1.6	0.4
	<b>Min</b>	4.5	0.22	2.1	0.5	0.09	0.12	0.05	0.03	21.2	0.62	0.17
	<b>Media</b>	6.9	1.3	5.1	1.3	0.2	0.67	0.1	2.5	24.9	0.92	0.22
<b>Secas</b> <i>40-50 cm</i>	<b>Max</b>	10.2	2.2	7.7	3.6	0.47	1.6	1.2	4.4	29.5	1.3	0.48
	<b>Min</b>	3.99	0.32	0.71	0.42	0.11	0.13	0.02	0.01	19.7	0.28	0.07
	<b>Media</b>	7.51	0.97	4.45	1.29	0.21	0.56	0.18	0.61	24.31	0.8	0.15
<b>Lluvias</b> <i>40-50 cm</i>	<b>Max</b>	10.6	3.2	9	2.3	0.29	0.99	0.22	8.4	33.4	1.67	0.48
	<b>Min</b>	5.3	0.32	0.7	0.42	0.13	0.13	0.03	0.04	19.7	0.59	0.09
	<b>Media</b>	7.04	1.2	4.8	1.2	0.19	0.59	0.11	1.5	25.4	0.97	0.22

En las Tablas 6a y 6b se presentan los resultados de los 21 elementos trazas considerados para esta investigación. Tomando en cuenta los valores de la media, se tiene el siguiente orden de abundancia independiente de la profundidad, en la época de secas Ba>Mn>Sr; para la época de lluvias Ba>Sr>Mn>Zn. El resto de los elementos químicos presenta una abundancia distinta, dependiendo de la temporada y de la fracción del suelo.

De todos los elementos traza sobresalen las altas concentraciones de Ba que andan en el orden de miles de mg/kg. También las de Mn, Sr, Rb, Zn, V y Cl que están en cientos de mg/kg. Y el resto de los elementos traza están por debajo de los 100 mg/kg. En cuanto a los límites

máximos permisibles disponibles para algunos elementos traza (As, Ba, Cr, Mn, Mo, Ni, Pb, Sc, Se, Sb, V, Zn), se observa que los valores máximos de concentración de los elementos están por encima de dichos límites, excepto para el caso del Pb en donde todos sus valores se encuentran por debajo de los límites, lo que indica que al menos un sitio de la zona de estudio presenta este elemento traza por encima de los límites internacionales propuestos.

Para el caso de los elementos Mo, Ho, Sb, Se y Sc; el Ho sólo se encontró en la época de lluvias en ambas fracciones, lo cual se puede deber a procesos de solubilización y/o transporte por lluvia hacia el sitio. El Sc y Se, se encontraron sólo en la época de secas en ambas fracciones, que puede deberse también a procesos de solubilización y/o transporte por lluvia del sitio hacia otro lugar. El Mo sólo se encontró en la época de lluvia y en la fracción profunda y el Sb sólo se detectó en la época de secas en la fracción profunda. Lo que podría indicar una acumulación de estos elementos traza en la parte profunda del suelo por procesos de percolación de fluidos.

**Tabla 7a. Estadística básica de las concentraciones de elementos traza en suelos superiores y profundos. Dónde: bld, bajo el límite de detección y LMP: Límites máximos permisibles.**

<i>Temporada</i>		<i>Elementos traza (mg/kg)</i>										
<i>Profundidad</i>		<b>As</b>	<b>Ba</b>	<b>Br</b>	<b>Cl</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ga</b>	<b>Ho</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Nb</b>
<b>Secas</b> <i>0-10 cm</i>	<b>Max</b>	714	4200	91.1	300	115	85.3	74	bld	2320	bld	170
	<b>Min</b>	bld	591	bld	bld	bld	40.3	14.5	bld	61.2	bld	42.7
	<b>Media</b>	72.2	1140	11.8	112	66	61	32.8	bld	784	bld	98.6
<b>Lluvias</b> <i>0-10 cm</i>	<b>Max</b>	505	2240	13	213	128	83.7	82.6	730	1210	bld	151
	<b>Min</b>	bld	630	bld	bld	31.1	34.9	23.8	bld	31.5	bld	bld
	<b>Media</b>	109	1190	3.14	112	73	56	39.7	106	496	bld	91.3
<b>Secas</b> <i>40-50 cm</i>	<b>Max</b>	2200	1900	151	268	113	357	72	bld	1430	bld	165
	<b>Min</b>	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld
	<b>Media</b>	220	902	19	130	62	86	35	bld	725	bld	80
<b>Lluvias</b> <i>40-50 cm</i>	<b>Max</b>	311	10100	58.5	177	115	90	40	307	1210	82	214
	<b>Min</b>	bld	834	bld	bld	31	35	24	bld	32	bld	bld
	<b>Media</b>	68.4	2487	18.4	130	70	63	32	45	534	13	96
<b>LMP</b>		29*	155*			100*	36*			270-530**	0.5*	

\*Netherlands 1997, concentraciones de fondo en suelos estándar (10-25% materia orgánica).

\*\*Hooda, 2010, valores promedio.

**Tabla 7b. Estadística básica de las concentraciones de elementos traza en suelos superiores y profundos. Dónde: bld, bajo el límite de detección y LMP: Límites máximos permisibles.**

<i>Temporada</i>		<i>Elementos traza (mg/kg)</i>									
<i>Profundidad</i>		<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Rb</b>	<b>Sc</b>	<b>Se</b>	<b>Sr</b>	<b>Sb</b>	<b>V</b>	<b>Y</b>	<b>Zn</b>
<b>Secas</b> <i>0-10 cm</i>	<b>Max</b>	78.8	107	1200	61.1	114	1100	bld	192	101	477
	<b>Min</b>	25.5	bld	63.9	bld	bld	184	bld	bld	bld	18.5
	<b>Media</b>	51.1	9.6	268	8.88	16.6	629	bld	116	25.8	149
<b>Lluvias</b> <i>0-10 cm</i>	<b>Max</b>	91.5	141	229	bld	bld	1580	bld	180	146	298
	<b>Min</b>	bld	bld	bld	bld	bld	371	bld	bld	bld	65.9
	<b>Media</b>	37.2	21.4	124	bld	bld	893	bld	91	76.4	166
<b>Secas</b> <i>40-50 cm</i>	<b>Max</b>	90	187	374	61	345	1000	1100	198	124	262
	<b>Min</b>	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld	bld
	<b>Media</b>	51.5	37.2	150	6.1	34	632	86	115	39	113
<b>Lluvias</b> <i>40-50 cm</i>	<b>Max</b>	356	138	199	bld	bld	1730	bld	182	151	509
	<b>Min</b>	27.5	bld	bld	bld	bld	520	bld	bld	bld	31
	<b>Media</b>	94.5	37.2	110	bld	bld	921	bld	93	67	197
<b>LMP</b>		35*	85*		7**	0.7*		3*	42*		140*

\*Netherlands 1997, concentraciones de fondo en suelos estándar (10-25% materia orgánica).

\*\*Hooda, 2010, valores promedio.

### 5.3.1. Correlaciones

De las correlaciones de Spearman, se consideraron únicamente los pares de elementos que presentaran valores mayores a 0.6. En la Tabla 7 se presentan los resultados para los elementos mayores, donde se obtuvieron en total 28 parejas de elementos con una correlación positiva o negativa mayor a 0.6.

En la Tabla 7 se observa que la correlación entre Ca y Fe se mantiene independientemente de la temporalidad y de la fracción en la columna del suelo, siendo la única correlación que prevalece en el sitio. Así mismo, las parejas de CaMg, CaTi, FeS, FeTi y MgTi, presentan una correlación en la época de lluvias, independientemente de la fracción del suelo; siendo la de FeS una correlación negativa.

Las correlaciones entre AlCa, AlFe, AlMg, CaFe, CaNa, KNa, PS, PZr, SZr y TiZr, pueden asociarse a procesos geológicos regionales, por darse en la fracción profunda en la época de secas. En contraste, las correlaciones entre AlP, CaFe, FeMg y KNa se pueden asociar a procesos antropogénicos como el uso de fertilizantes y/o mejoradores del suelo, por darse en la temporada de secas en la fracción superficial. El incremento del valor de las correlaciones entre KNa y CaMg en la fracción profunda del suelo en comparación con el valor de la fracción somera, sugiere una relación más estrecha entre estos elementos en la profundidad.

Es de importancia resaltar la correlación PZr que en la fracción profunda es positiva para la temporada de secas y en la temporada de lluvias es una correlación negativa.

Tabla 8. Correlaciones de Spearman para elementos mayores.

Pareja	secas		lluvias		Pareja	secas		lluvias	
	0-10	40-50	0-10	40-50		0-10	40-50	0-10	40-50
<b>AlCa</b>	0.83				<b>FeNa</b>	0.71			
<b>AlFe</b>	0.79				<b>FeS</b>	-0.75		-0.61	
<b>AlMg</b>	0.61				<b>FeSi</b>			-0.83	
<b>AlP</b>	0.66			0.87	<b>FeTi</b>	0.78		0.78	
<b>AlSi</b>			0.63		<b>FeZr</b>	-0.62			
<b>CaFe</b>	0.89	0.87	0.89	0.82	<b>KNa</b>	0.66	0.81		
<b>CaMg</b>			0.61		0.81			0.64	
<b>CaNa</b>	0.63		0.61		<b>KS</b>			0.64	
<b>CaP</b>			0.61		<b>KS</b>			0.64	
<b>CaS</b>			-0.61		<b>KSi</b>			0.92	
<b>CaSi</b>			-0.71		<b>MgTi</b>			0.68	
<b>CaTi</b>			0.89		0.84			0.66	
<b>FeK</b>			-0.68		<b>NaTi</b>			0.61	
<b>FeMg</b>	0.76				<b>PS</b>	0.73			
					<b>PZr</b>	0.66		-0.64	
					<b>SZr</b>	0.66			
					<b>TiZr</b>	0.61			

Para el caso de los elementos traza, de los 21 elementos químicos considerados en esta investigación, para hacer la correlación de Spearman solamente se consideraron 14 elementos. Los otros 7 elementos se dejaron fuera, debido a que sólo se detectaron en uno o dos sitios de muestreo, de acuerdo a lo que se presenta en la Tabla 8.

Tabla 9. Concentración de elementos traza (mg/kg) detectados en pocos sitios de muestreo.

Elemento	secas				lluvias				LMP
	0-10	Sitio	40-50	Sitio	0-10	Sitio	40-50	Sitio	
<b>Br</b>	13.4	N	31	2	13	1	20.4	2	
	91.1	SO	151	5			58.5	4	
	34.1	5	49.7	7			13.1	5	
							32.6	6	
<b>Ho</b>					730	1	307	1	
<b>Mo</b>							81.8	1	0.5*
<b>Pb</b>	107	5	119	5	141	1	138	4	85*
			187	6					
			162	7					
<b>Sc</b>	61.1	5	60.9	5					7**
	37.9	7							
<b>Se</b>	85	3	345	3					0.7*
	114	5	75.1	5					
<b>Sb</b>			1100	3					3*

\*Netherlands 1997, concentraciones de fondo en suelos estándar (10-25% materia orgánica).

\*\*Hooda, 2010, valores promedio.

En la Tabla 8 se aprecia que en el extremo norte en donde está la manifestación hidrotermal del Tehuacán y el suroeste que es un pozo de uso y en ocasiones de consumo humano, sólo se detectó Br en la fracción superficial y en la época de secas. En el sitio 1, que se localiza a 500 m al norte de Cuautelolulco, se detectaron Br, Ho, Mo y Pb solo en época de lluvias. El Ho en ambas fracciones. El Br y el Pb sólo en la fracción superior y el Mo sólo en la fracción profunda. El sitio 2 está en San Francisco Terrerillos y aquí sólo se detectó Br en ambas temporadas y en la fracción profunda. En el sitio 3 que corresponde a la manifestación hidrotermal de los Azufres se detectaron Se y Sb, ambos en la temporada de secas. El Sb sólo se detectó en la fracción profunda y el Se en ambas fracciones. Y ambos elementos a concentraciones mayores a lo que recomiendan los límites holandeses. En el sitio 4 que está a 500m al este del sitio 3, se detectaron Br y Pb en la fracción profunda y en la época de lluvias. El sitio 5 que se localiza a 1 km al noreste de Cruz Colorada, presentó el valor más alto de Br de las muestras analizadas (fracción profunda, temporada de secas) pero en la temporada de lluvias no se detectó en la fracción superficial (0-10 cm). El Pb sólo se detectó en la temporada de secas en ambas fracciones al igual que el Sc y el Se. Para estos últimos tres elementos las concentraciones están por arriba de los límites holandeses y británicos. El sitio 6 que se localiza a 300m al sur de la manifestación hidrotermal de Alcaparrosa, presentó Br en la fracción profunda en la época de lluvias. El Pb también se identificó en la fracción profunda pero sólo en la temporada de secas. El sitio 7 es el sitio de la manifestación hidrotermal de Alcaparrosa y aquí se encontraron concentraciones de Br en la temporada de secas en la fracción profunda, al igual que el Pb. Además de Sc en la temporada de secas en la fracción superficial.

De los 14 elementos restantes, se presentan los resultados de las correlaciones de Spearman en la Tabla 9. En la época de secas, fracción superficial sólo se correlacionaron 9 parejas de elementos, en esta misma época fracción profunda, sólo se correlacionaron 4 parejas de elementos. En contraste, en la época de lluvias en la fracción superficial hubo una correlación de 18 parejas de elementos y en la fracción profunda 27 parejas se correlacionaron.

Ninguna pareja de elementos mantuvo su correlación en ambas fracciones y en ambas temporadas de muestreo. Tampoco se mantuvo la correlación en temporada de secas en ambas fracciones. Sin embargo, en la temporada de lluvias el BaCr, CrNb, CrV, CuSr, CuV, CuY, GaNb, NbV, RbV y VY mantuvieron su correlación en ambas fracciones, lo que indica que pueden ser solubles y además transportarse en el perfil del suelo. Las correlaciones entre BaCr, CuV y NiSr se determinaron en la fracción superficial en ambas temporadas, lo que indica que no se transportan en el perfil del suelo. Y el CuGa mantuvo su correlación en ambas épocas en la

fracción profunda, lo que puede sugerir que ambos elementos se encuentran sólo en dicha fracción.

Cabe resaltar que en el caso del BaCr, la correlación siempre fue negativa, al igual que para el CrNb, NbV y RbV. En el caso de CrV, en la fracción superficial de la temporada de lluvias tuvo una correlación negativa, que en la fracción profunda se hace positiva, lo que puede ser un indicador de que estos elementos se unen en la fracción profunda. Caso contrario del GaNb que tienen una correlación positiva en la fracción superficial, que se vuelve negativa en la profunda.

**Tabla 10. Correlaciones de Spearman para elementos traza**

<i>Pareja</i>	<i>secas</i>		<i>lluvias</i>		<i>Pareja</i>	<i>secas</i>		<i>lluvias</i>	
	0-10	40-50	0-10	40-50		0-10	40-50	0-10	40-50
<b>AsBa</b>	0.96				<b>GaNi</b>				0.86
<b>AsCr</b>	-0.71				<b>GaRb</b>				-0.86
<b>BaCr</b>	-0.77		-0.64	-0.61	<b>GaV</b>				0.85
<b>BaNb</b>		0.74			<b>MnNb</b>	-0.61			
<b>BaNi</b>				-0.71	<b>MnNi</b>	0.68		0.83	
<b>CrCu</b>			0.71		<b>MnSr</b>				0.75
<b>CrNb</b>			-0.78	-0.61	<b>MnY</b>				0.96
<b>CrNi</b>				0.64	<b>NbNi</b>	-0.76			-0.86
<b>CrSr</b>			0.78		<b>NbRb</b>				0.86
<b>CrV</b>			-0.70	0.67	<b>NbV</b>			-0.77	-0.90
<b>CuGa</b>		0.65		0.61	<b>NiRb</b>				-0.71
<b>CuMn</b>				0.82	<b>NiSr</b>	0.75		0.61	
<b>CuNb</b>			-0.60		<b>NiV</b>	0.62			0.92
<b>CuNi</b>			0.68		<b>NiZn</b>		0.83		
<b>CuRb</b>			-0.64		<b>RbV</b>			-0.81	-0.83
<b>CuSr</b>			0.68	0.79	<b>SrV</b>		0.62		
<b>CuV</b>	0.63		0.83	0.74	<b>SrY</b>				0.79
<b>CuY</b>			0.82	0.86	<b>SrZn</b>				0.86
<b>CuZn</b>				0.68	<b>VY</b>			0.76	0.61
<b>GaNb</b>			0.67	-0.71	<b>YZn</b>				0.64

### 5.3.2. Índices de calidad del suelo

Para el cálculo de los índices de calidad de suelo, se incluyeron los 11 elementos mayores detectados y 16 elementos traza de los 21 detectados. Los elementos traza que no se consideraron en este análisis fueron Ho, Mo, Sc, Se y Sb, debido a lo antes presentado en la Tabla 8. Sin embargo, el Br y el Pb sí fueron considerados debido al rango de concentraciones

que tienen en comparación a las reportadas para la corteza terrestre (Wedepohl, 1995) y a que el Br está presente en más de un sitio de muestreo.

### **5.3.2.1. Factor de Enriquecimiento**

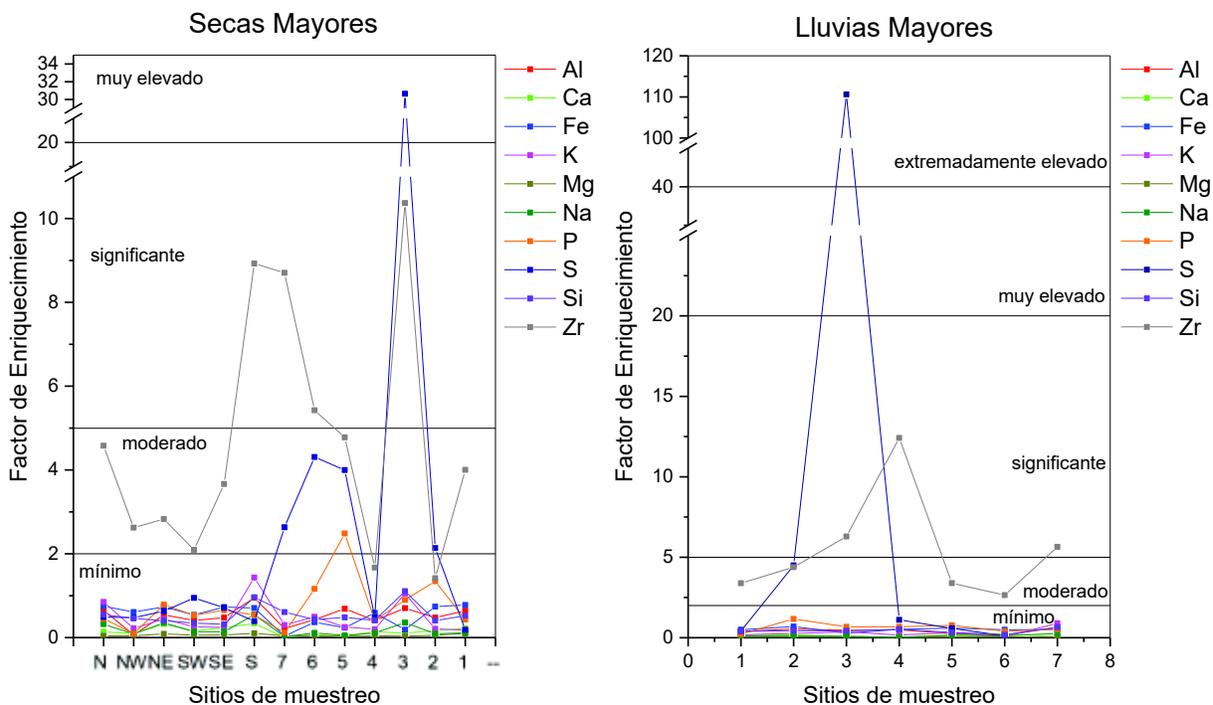
El Factor de Enriquecimiento (EF) se basó en la estandarización de un elemento probado contra uno de referencia en la fracción superficial (0-10 cm). Los elementos de referencia más comunes son Sc, Mn, Ti, Al y Fe (Pacyna y Winchester, 1990; Quevauviller *et al.*, 1989; Reimann y De Caritat, 2005; Schiff y Weisberg, 1999; Sutherland, 2000). Este trabajo utiliza el titanio como elemento litogénico o de referencia.

Representando los análisis en cuatro gráficas que describen el comportamiento del FE en los sitios muestreados (Figuras 19 y 20) que corresponden a los elementos mayores y traza, para la temporada de secas y de lluvias.

En la figura 19, de la temporada de secas se observa que para Al, Ca, Fe, K, Mg, Na y Si no hay enriquecimiento significativo, indicando suelos no contaminados, salvo para P, S y Zr que se encuentran enriquecidos. El P se encuentra enriquecido de manera moderada solo en el sitio 5, en el resto de los sitios, se mantiene un enriquecimiento mínimo, al igual que en la temporada de lluvias. El P se encuentra en el suelo en forma orgánica e inorgánica, se le asocia con la materia orgánica, las arcillas que al ser sometido a varias transformaciones en el suelo hacen que sea menos o más disponible para la planta. El P puede ser alto pero puede ser que la concentración disponible sea muy baja debido a las reacciones en el suelo, sus iones pueden ser adsorbidos por los componentes del suelo o precipitados en productos poco solubles. La concentración de P en la solución del suelo depende del suministro de P por la reacción de desorción de P desde los componentes del suelo o la mineralización del P orgánico. En algunos suelos la desorción es muy lenta, presentando una deficiencia de P en la planta.

El S presenta un enriquecimiento muy elevado en el sitio 3 de Los Azufres, y moderado en los sitios 2, 5, 6 y 7, para la temporada de secas, y un enriquecimiento extremadamente elevado en la temporada de lluvias en el mismo sitio 3 y moderado en el 2. La presencia del azufre en el suelo se relaciona como parte de la materia orgánica y de ciertos minerales (pirita y yeso, principalmente); la forma orgánica es la más abundante en la que la transformación del azufre contenido en la materia orgánica tiene una cierta semejanza con la transformación del nitrógeno orgánico. Por lo general, la carencia de materia orgánica en el suelo está relacionada con la carencia de azufre en el mismo, principalmente por la formación de compuestos orgánicos de S (McGill y Cole 1981).

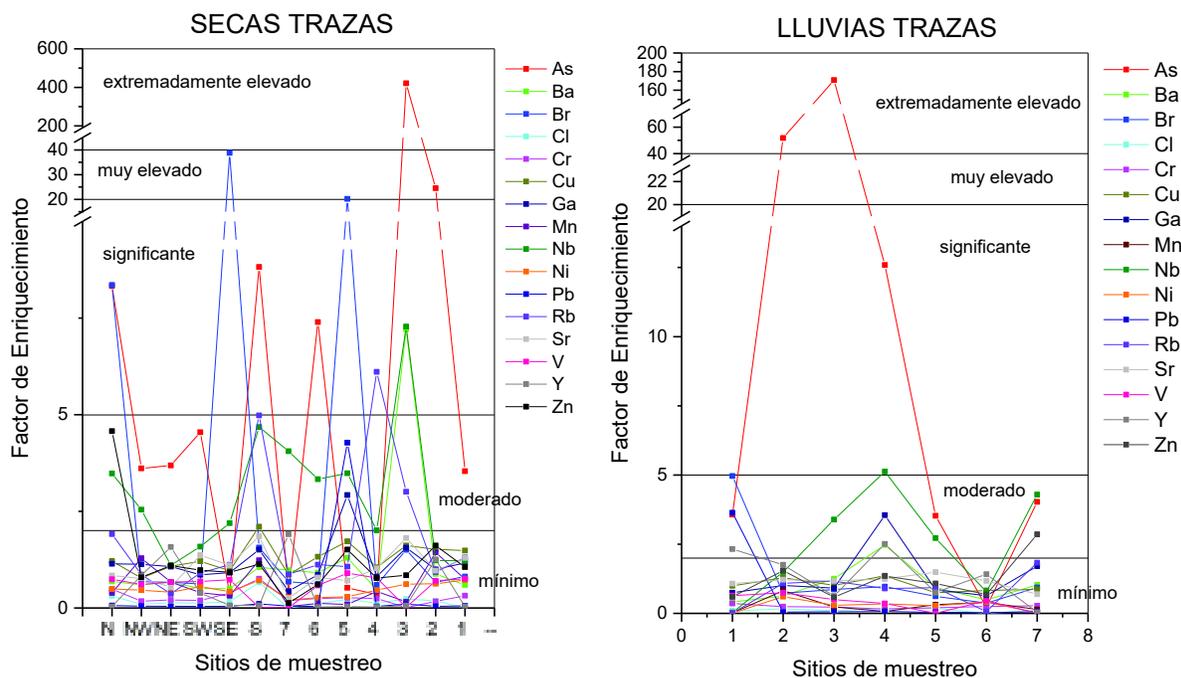
El Zr está enriquecido significativamente para la temporada de secas en los sitios 6, 7 y el extremo sur y para la temporada de lluvias en los sitios 7, 4 y 3. Y tiene un enriquecimiento moderado para la temporada de secas en los otros cinco puntos extremos (N, NW, NE, SW y SE), los sitios 5 y 1; para la temporada de lluvias en los sitios 1, 2, 5 y 6. La presencia de Zr podría corresponder a la acumulación de zircón debido a su resistencia a los procesos de erosión e intemperismo.



**Figura 19. Gráficas de Factor de Enriquecimiento para elementos mayores en la temporada de secas y de lluvias.**

En la figura 20, se aprecian los resultados de los cálculos del factor de enriquecimiento de los elementos traza. Donde el As es el elemento que se detectó en la mayoría de los sitios con enriquecimientos desde mínimo hasta extremadamente elevado. En ambas temporadas, se encontró As con un enriquecimiento extremadamente elevado en el sitio 3 de Los Azufres y en época de lluvias, en el sitio 2 que es el de San Francisco Terrerillos. En la temporada de secas, hay un enriquecimiento muy elevado de As en el mismo sitio 2. Es decir, que el enriquecimiento en este sitio (2) aumenta en temporada de lluvias. El As en la temporada de secas presenta un enriquecimiento significativo en el extremo sur que es el punto control y el sitio 6 que está a 300 m al sur de Alcaparrosa. En temporada de lluvias, el enriquecimiento es significativo en el sitio 4 que está localizado a 500 m al este de Los Azufres. Para el sitio 6 y el 4, este resultado es de esperarse por la cercanía con las manifestaciones hidrotermales, pero para el control, es un

resultado sorprendente, ya que, al no tener influencia aparente del sitio, sugiere que el As de esta zona es de otra fuente. El As se encuentra en forma abundante en sedimentos arcillosos, tiene facilidad para acompañar otros metales, encontrándose fuertemente asociado a depósitos de varios metales y metaloides más valiosos que él, por ejemplo: Au, Ag, Bi, Cu, Pt, Sb y Zn. Por lo que es utilizado como indicador en prospecciones geoquímicas para encontrar yacimientos de minerales enterrados a poca profundidad. También se encuentra frecuentemente asociado con S, Se y Te (Poblete *et al.*, 2015; Kabata-Pendias & Pendias, 2001; Alarcón-Herrera *et al.*, 2012). La presencia de compuestos arsenicales orgánicos en el suelo proviene, generalmente, de la utilización de compuestos inorgánicos (como pesticidas y herbicidas), especialmente por su uso extendido en la agricultura y como aditivo alimentario animal durante el siglo XX, junto con otras actividades antrópicas como la minería, los baños parasiticidas de animales, la conservación de pieles, maderas, entre otros (Alarcón-Herrera *et al.*, 2012; Shankar *et al.*, 2014).



**Figura 20. Gráficas de Factor de Enriquecimiento para elementos trazas en la temporada de secas y de lluvias.**

Otro elemento de importancia en la zona, especialmente en la temporada de secas es el Br, que aparece con un enriquecimiento muy elevado en el extremo SW y el sitio 5 que está a 1 km al noreste de Cruz Colorada, además de que presenta un enriquecimiento significativo en el extremo norte. Y en la época de lluvias presenta un enriquecimiento moderado en el sitio 1 que se localiza a 500 m al norte del poblado de Cuautelolulco.

Es de resaltar, en la temporada de secas, los enriquecimientos significantes de Ba y Nb en el sitio 3 de Los Azufres, y de Rb en el sitio 4 que se localiza a 500 m al este de Los Azufres.

Finalmente, los enriquecimientos moderados en la temporada de secas fueron de Cu en el extremo sur, Ga y Pb en el sitio 5, Nb para los sitios 3, 4, 5 y 7; Rb para el extremo sur y el sitio 3 y Zn en el extremo norte. Para la temporada de lluvias, el sitio 1 tuvo enriquecimientos moderados de Br, Pb e Y, para el sitio 4 de Ba, Nb, Pb e Y, para el sitio 7 que es el de Alcaparrosa, se encontró enriquecimiento moderado de Nb y Zn. Los sitios 3 y 5 también estuvieron enriquecidos moderadamente con Nb.

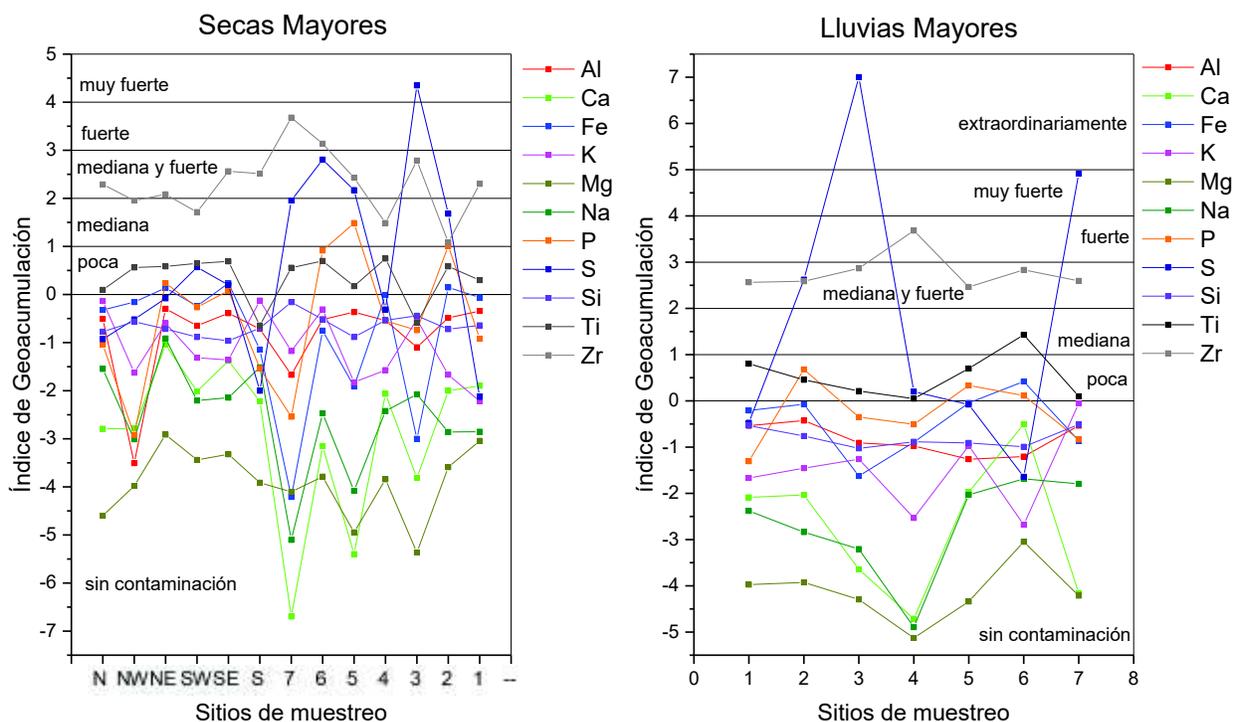
El resto de los elementos traza presentaron factores de enriquecimiento mínimos.

### **5.3.2.2. Índice de geoacumulación**

Este índice, establecido por Müller (1969) sirve para evaluar cuantitativamente la contaminación del suelo a través de los valores presentes de metales frente a los valores de referencia y analizar los resultados obtenidos mediante las clases de  $I_{geo}$ . Este índice ha sido ampliamente utilizado por diferentes autores para establecer el grado de contaminación de los suelos (Castro-González *et al.*, 2019).

Se hicieron cuatro gráficas para ilustrar el comportamiento del índice de geoacumulación de todos los sitios muestreados (Figuras 21 y 22). Un alto porcentaje de los elementos mayores analizados para este estudio, presentan índices de geoacumulación menores que cero, es decir, no hay contaminación por la mayoría de estos elementos, excepto por Fe, P, S, Ti y Zr, en algunos sitios. En las gráficas se incluyen las clases de  $I_{geo}$  propuestas por Muller (1969), desde suelos sin contaminación ( $I_{geo}<0$ ) hasta suelos extraordinariamente contaminados ( $I_{geo}>5$ ).

Al igual que en los resultados del factor de enriquecimiento, en los sitios, el  $I_{geo}$  presenta valores elevados para P, S y Zr. El P corresponde a contaminación mediana en la temporada de secas en el sitio 5 y en la temporada de lluvias pasa a ser poca o nada. Los valores para el S indican contaminación muy fuerte en el sitio 3 de Los Azufres, en época de lluvias el suelo del mismo sitio indica contaminación extraordinariamente elevada. Esta anomalía se asocia a emanaciones de  $H_2S$  relacionadas a procesos geotérmicos. En el caso del Zr, se tiene una contaminación mediana, de mediana a fuerte y fuerte en la temporada de secas mientras que en la época de lluvias la contaminación es de mediana a fuerte y fuerte. Los zircones son minerales muy resistentes a procesos erosivos y procesos de disolución, por lo que, los resultados sugieren que existe un proceso de concentración en la época de lluvias, que se puede deber a procesos de arrastre.

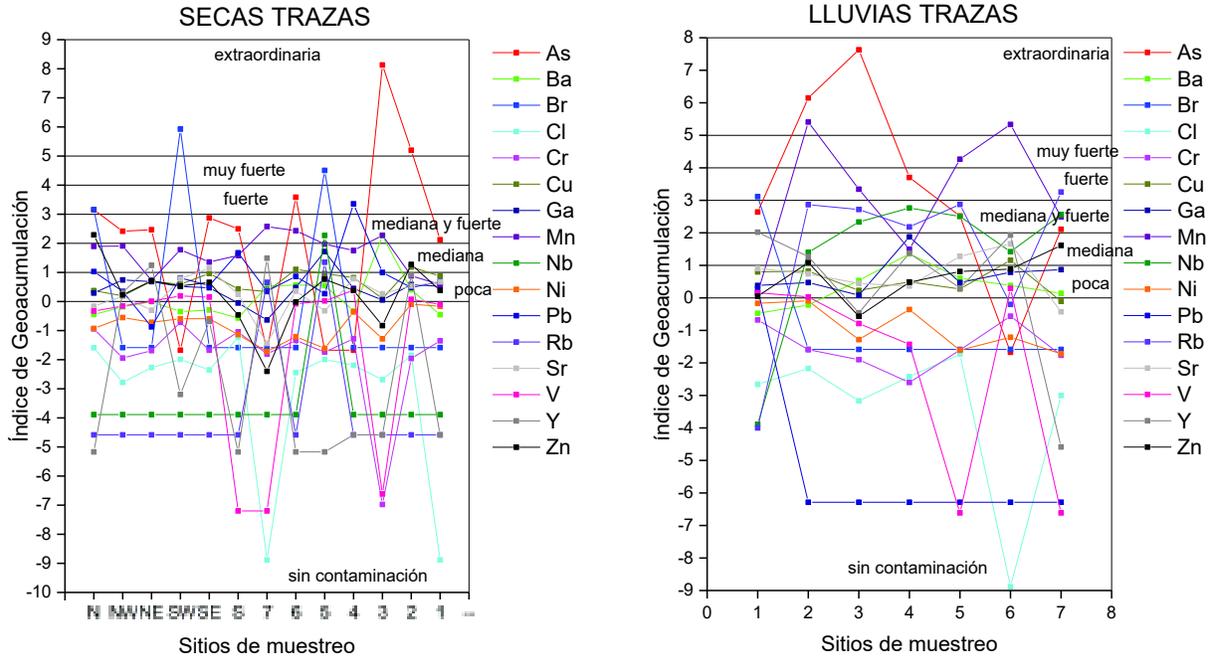


**Figura 21. Gráficas de índice de geoacumulación para elementos mayores.**

No se calculó el factor de enriquecimiento del Ti, debido a que fue tomado como elemento litogénico o de referencia, pero sí fue posible su evaluación con el  $I_{geo}$ . En la figura 21 se observa que presenta una contaminación mediana en el sitio 6, en la época de lluvias. En el resto de los sitios se obtuvieron valores correspondientes a suelos poco contaminados por este elemento en ambas temporadas, excepto en el extremo sur y el sitio 3 donde, en temporada de secas, el valor de  $I_{geo}$  fue menor que 0.

Para el resto de los elementos mayores, su presencia en el sitio es poco significativa, de acuerdo a este índice.

En la figura 22, se presentan los resultados de  $I_{geo}$  de los elementos traza. En la temporada de secas, la mayoría de los casos presentan poca o ninguna contaminación. Los que presentan contaminación mediana en esta temporada son el Mn; el Y en los sitios 7 (manifestación hidrotermal de Alcaparrosa) y NE (arroyo en Ocojala), y el Pb en los sitios S (control), 5 (1km al noreste de Cruz Colorada) y 3 (Los Azufres). El Mn presenta contaminación mediana a fuerte en los sitios 3 (Los Azufres), 6 (300 m sur de Alcaparrosa) y 7 (Alcaparrosa), por lo que esta geoacumulación mediana a fuerte se asocia a las manifestaciones hidrotermales de Los Azufres y Alcaparrosa.



**Figura 22. Gráficas de índice de geoacumulación para elementos traza.**

En el sitio 5 se observa una contaminación mediana de Rb, Ga y Mn; mediana a fuerte de Nb. El As presenta una contaminación mediana a fuerte en los sitios N (manifestación hidrotermal del Tehuacán), NW (600 m noroeste de Jonuco), NE (arroyo Ocojala) y luego disminuye en el SW (pozo de uso humano) y vuelve a aumentar en el S (control) y el SE (presa San Fco.). Este elemento está contaminando fuertemente el sitio 6 (300 m sur de Alcaparrosa), extraordinariamente en los sitios 3 (Azufres) y 2 (San Fco. Terrerillos) y de mediana a fuertemente en el sitio 1 (500 m N Cuautelolulco).

En la temporada de lluvias, la mayoría de los elementos traza se presentan con poca o sin contaminación. Los que tienen una contaminación mediana son el Mn e Y en los sitios 2 (San Fco. Terrerillos), 4 (500 m este de Los Azufres) y 6 (300 m sur de Alcaparrosa), el Sr en los sitios 5 (1 km noreste de Cruz Colorada) y 6 (300 m sur de Alcaparrosa); así como el Ba en el sitio 4 (500 m este de Los Azufres). Los elementos traza que presentan mediana a fuerte son el Mn en el sitio 7 (Alcaparrosa); el Rb en los sitios 2, 3 (Los Azufres), 4 y 5; el Nb en los sitios 3, 4, 5 y 7 y el As en los sitios 1 (500 m norte de Cuautelolulco), 5 y 7.

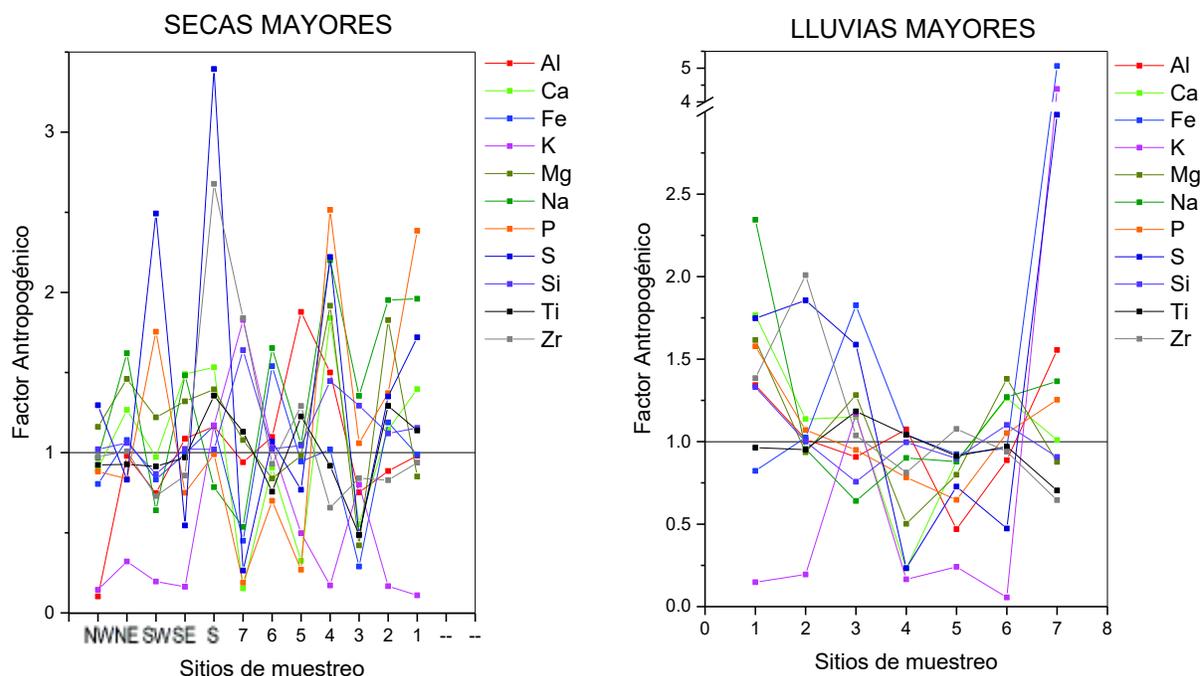
En la temporada de lluvias, los elementos con contaminación fuerte, son el Rb en el sitio 7 (Alcaparrosa), el Br en el sitio 1, el Mn en el sitio 3 (Azufres) y el As en el sitio 4 (500 m este de Azufres). Con contaminación muy fuerte sólo el Mn, en el sitio 5 y con contaminación extraordinaria el As en los sitios 2 (San Fco. Terrerillos) y 3 (Azufres) y el Mn en los sitios 2 y 6 (300 m sur de Alcaparrosa).

### 5.3.2.3. Factor Antropogénico

Se hicieron cuatro gráficas para ilustrar el comportamiento del factor antropogénico de todos los sitios muestreados (Figuras 23 y 24). El extremo norte no se consideró en el análisis de este factor, ya que no se tuvo la fracción profunda de este sitio.

De acuerdo a las gráficas, al menos uno de los elementos mayores en un sitio, presenta un factor antropogénico mayor de 1, lo que significa que el sitio tiene una influencia antropogénica importante. Además de que se observa una gran variabilidad en el área, al no encontrar un elemento presente con valores mayores que 1 en todos los sitios de muestreo. Y si se comparan los resultados de la temporada de secas con los de lluvias, se observa un aumento en el valor de este factor en la temporada de lluvias, únicamente en el caso de los elementos mayores, lo que concuerda con los resultados presentados anteriormente. Para el caso de los elementos traza, este comportamiento es el opuesto.

En la gráfica de secas se observa que los sitios SW, S, 4 y 1 tienen los valores más altos de este factor antropogénico para los elementos de S, Zr y P, que coincide con los factores de enriquecimiento. Los siguientes elementos de importancia antropogénica son el Na, Mg, Al (sitios 5 y 4), el Ca, el Fe y el Ti.



**Figura 23. Gráficas de factor antropogénico para elementos mayores.**

En la temporada de lluvias el factor antropogénico en Alcaparrosa (7) se ve aumentado para Fe, K y S. El Na sigue siendo importante en los sitios 1 (500 m norte de Cuautelolulco), 6

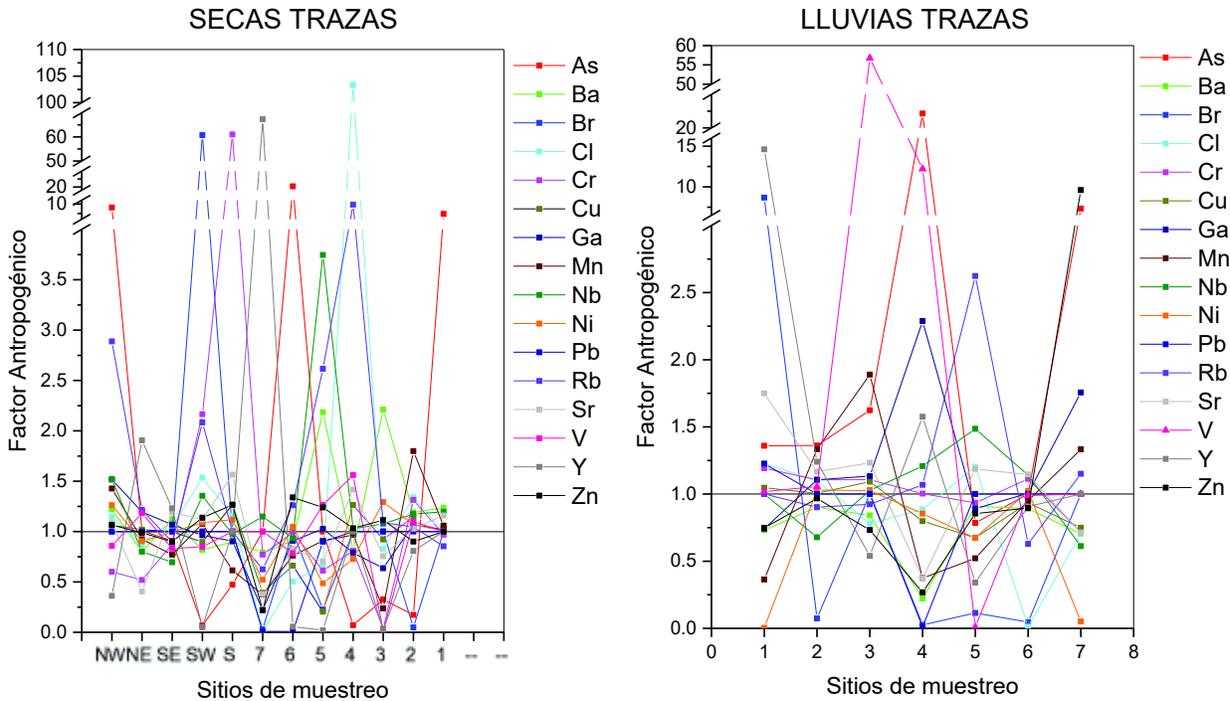
(300 m sur de Alcaparrosa) y 7 (Alcaparrosa). El S también presenta un valor importante de este factor en los sitios 1, 2 (San Francisco Terrerillos) y 3 (Los Azufres). Así como el Zr en el sitio 1 y 2. Y el Fe en el sitio 3. El Al, sólo resalta en el sitio 7; el Ca en el sitio 1; y el Mg en los sitios 3 y 6. El sitio 4, sólo presenta dos elementos ligeramente arriba del 1 que son Al, Ti y Si, el resto de los elementos mayores, presentó valores menores de 1. Y el sitio 5 (1 km noreste de Cruz Colorada) sólo presentó el Zr con valores mayores de 1.

En el caso de los elementos traza (Figura 24), en la temporada de secas, se observan los valores mayores que llegan hasta alrededor de 105, lo que demuestra una gran variabilidad entre las concentraciones de las fracciones someras y las profundas y en la temporada de lluvias, los valores mayores disminuyen hasta 55.

En la temporada de secas, los elementos químicos que presentan los valores más grandes (de 105 a 2) de este factor son  $Cl > Y > Cr > Br > As > Rb > Nb > Ba$ . Y en la temporada de lluvias en un rango de 55 a 2, son:  $V > As > Y > Br > Zn > Rb > Ga$ . Observando una gran variabilidad, aunque hay que observar que la presencia de los elementos antes mencionados sólo es en sitios puntuales.

En la temporada de secas, en los sitios geotérmicos de Los Azufres (3) y de Alcaparrosa (7) el elemento con el valor más alto de este factor (poco más de 2) es el Ba, solo en Los Azufres, en Alcaparrosa, la mayoría de los valores están cerca del 1. Lo que indica que a pesar de que el factor de enriquecimiento y el índice de geoacumulación muestren altos enriquecimientos de elementos mayores y traza en estos sitios; al evaluarlos con el factor antropogénico, se determina que no existe una influencia antropogénica, más bien son enriquecimientos regionales propios de las manifestaciones geotérmicas de la zona.

Sin embargo, se identifican elementos que se pueden asociar a actividades antropogénicas como el uso de agroquímicos, en el caso del As que está presente en el noreste (arroyo Ocojala), en el sitio 6 (300 m sur de Alcaparrosa) y en el sitio 1 (500 m norte de Cuautelolulco). Es de resaltar el Cr en el sitio S, que es el punto control y el Br en el SO que es el pozo de uso humano, estos dos elementos se identificaron en la zona que no tiene una influencia directa de la actividad hidrotermal, por lo que se esperaría que fueran de una fuente antropogénica, propia de esta zona.



**Figura 24. Gráficas de factor antropogénico para elementos traza.**

Se esperaba encontrar indicios de Pb, debido a las actividades de caza, pero este factor no indica esto, al tener valores muy cercanos a 1, al menos en la temporada de secas. Para este mismo elemento, en la temporada de lluvias, se observa su presencia antropogénica en el sitio 4 (500 m de Los Azufres) y en el sitio 7 de Alcaparrosa, ambos lugares localizados en el bosque.

En la temporada de lluvias, resaltan los elementos Br y Sr en el sitio 1 a 500 m al norte de Cuautelolulco.

En los sitios 2 (San Francisco Terrerillos) y 6 (300 m sur de Alcaparrosa), la mayoría de los elementos traza están cercanos a un valor de 1, por lo que podrían considerarse como los sitios de menor influencia antropogénica en esta temporada. En el sitio 3 (Zona hidrotermal de Los Azufres), llama la atención la presencia de As y Mn que pueden deberse a procesos geológicos, ya que en este sitio en la temporada de lluvias el Fe también resalta del resto de los valores para este factor, lo que podría estar relacionado con la presencia de pirita, óxidos y oxihidróxidos de hierro y manganeso con As formando parte de su estructura o adsorbido a su superficie. En el sitio 4 (500 m este de Los Azufres) la presencia del Y, Pb, V y As es de importancia y son elementos que pueden provenir de hidrocarburos, ya que enfrente se llevan a cabo carreras de caballos y algunas de autos, los fines de semana. En el sitio 5 resaltan los elementos Nb y Rb que podrían asociarse a la presencia de caolín en la zona, ya que es usado como material de construcción de caminos y se observó en este sitio una pared blanca de este

material. En el sitio 7 los elementos químicos que presentan valores elevados de este factor son el Zn, As, Pb y Mn que parece ser una combinación entre procesos geotérmicos (As, Mn, S, Fe) y antropogénicos (Pb, Zn y As).

#### **5.4. Caracterización**

Con base en los resultados obtenidos, la zona norte se caracteriza por suelos de textura franca y franco arenosa, valores de pH de 5.6 en promedio con contenidos de materia orgánica entre 11 y 25%. Los elementos con mayor enriquecimiento son el As y el Zr, así como Br en la zona hidrotermal del Tehuacán. Sobresalen valores elevados para el factor antropogénico de Rb, As e Y.

La zona sur se caracteriza por suelos franco arenosos y arcillosos con valores de pH que van de 5.5 a 6.3 y porcentajes de materia orgánica de 3.7 a 16.6. En esta región los elementos más enriquecidos en el suelo son Zr, As y S. Sobresalen valores elevados para el factor antropogénico de Cr, Br, Rb, Ca y P.

En la zona centro donde se analizaron siete puntos en ambas temporadas (secas y lluvias), se observó que los sitios 3 y 7 (zonas hidrotermales) tienen un tipo de suelo franco arenoso con valores de pH de 2.7 y 2.2, respectivamente, con porcentajes de materia orgánica de 2.9 y 12.8. Los elementos enriquecidos en estas dos zonas fueron As, S, Mn, Zr, Nb, Ba y Rb. Antropogénicamente resaltan el As, S, Fe, Mn, Ba, V, Y, K, Zn y Pb. Además, se detectó la presencia de Se y Sb en la zona de Los Azufres y de Sc y Br en la zona de Alcaparrosa. Los sitios 4 y 6 se localizan en las cercanías de los sitios hidrotermales 3 y 7, respectivamente. Sin embargo, se distingue una diferencia química. Por ejemplo, para estos dos sitios no hay enriquecimientos de S, sigue habiendo de As, pero en menor magnitud y hay un mayor enriquecimiento de Pb y Mn. Antropogénicamente, sobresalieron el V, Cl, Rb y As, además de elementos como Ca, Mg, Na, S y P en el sitio cercano a Los Azufres. Siendo estas las bases de la composición química de los fertilizantes inorgánicos (Alloway, 2013). Y de Fe y Na en la zona cercana a Alcaparrosa.

En esta misma zona centro, resalta el sitio 5 ya que se detectó la presencia de Br, Pb, Sc y Se; con enriquecimientos significativos de Br y Mn, con valores altos del factor antropogénico de Ba, Rb y Nb. Esta es la zona en donde estaba expuesta la pared de caolín y posiblemente estos enriquecimientos se deban al aporte de dicha arcilla a los suelos. En los sitios restantes; 1 y 2, sólo se tuvo análisis de textura del sitio 2 de San Francisco Terrerillos, donde es un suelo franco arcilloso con pH ácido de 4.8 y 11% de materia orgánica. En este sitio existe un enriquecimiento importante de As y Mn. Y antropogénicamente, resalta la presencia de Na, Mg

y Mn. El sitio 1, que está al norte de Cuautelolulco, sobre riodacita, fue el único sitio en donde se detectaron Ho y Mo, con enriquecimiento de Br.

En general, se encontraron suelos con cuatro clases texturales distintas dentro de la zona de estudio: franco-arenosos, francos, franco-arcillosos y arcillosos. En lo que respecta a las manifestaciones geotérmicas de Los Azufres y Alcaparrosa, ambas tienen suelos de textura franco-arenosa y pH muy ácidos. De estos dos sitios, tanto la conductividad eléctrica como el contenido de materia orgánica es mayor en Alcaparrosa, la cual se encuentra dentro de una zona boscosa, mientras que en Los Azufres la muestra se recolectó de las inmediaciones de una pequeña laguna, en una zona de pastizales.

Hidrológicamente, en la zona de estudio se encontraron suelos muy permeables, que permiten el flujo de fluidos y su infiltración gracias a su alto contenido de arenas (aquellos con texturas franco-arenosas), como son los del punto control (Ac1), la manifestación Los Azufres (Ac2a), el sitio EAC-3 (Ac3) y Alcaparrosa (Ac4). Hay suelos que retienen mejor la humedad (suelos arcillosos), como es el caso del represo (Ac6). Y hay suelos que son más impermeables debido a su alto porcentaje de limos (texturas francas), como el que corresponde al área de Ocojala (Ac8).

Las dos manifestaciones hidrotermales superficiales resultaron en los valores de pH más ácidos del presente estudio, con 2.2 de pH para la manifestación de Los Azufres y 2.7 para la de Alcaparrosa. En estos sitios se obtuvieron valores bajos de conductividad eléctrica y en ambos se encontraron cuerpos de agua en los cuales se apreciaba el ascenso de burbujas y olor a azufre. El pH más alto se obtuvo del punto control, considerado como el extremo Sur de la zona de estudio, que se encuentra fuera del polígono de exploración de la CFE.

Exceptuando las muestras del punto control (Ac1), del inicio del bosque en Los Azufres (Ac2b) y del represo (Ac6), al resto de los suelos muestreados se les midió un pH <5.5 por lo que podrían presentar deficiencias en calcio, magnesio, sodio o potasio (Cordovilla *et al.*, 1995).

Las muestras exhiben una conductividad eléctrica <500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , por lo que se consideran de buen desarrollo para sembradíos. El único sitio en el que se sobrepasa dicho valor es el represo (Ac6) donde se obtuvo una medición de 890  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , razón por la cual podrían existir problemas para el desarrollo de plantas (Cordovilla *et al.*, 1995).

En ninguno de los sitios muestreados se observó indicio de carbonato de calcio (caliza) presente. El contenido de materia orgánica de los suelos estudiados varía de 2.9 a 24.6 %. Con un promedio de 11.21 % de todas las muestras y un coeficiente de variación del mismo dato del 55.4 %.

En la temporada de secas, en fracción superficial del suelo (0-10 cm) 5 parejas de elementos tuvieron una correlación positiva y 4 parejas una correlación negativa. En la fracción profunda (40-50 cm) 5 parejas de elementos tuvieron una correlación positiva. En la temporada de lluvias, en fracción superficial del suelo (0-10 cm) 11 parejas de elementos tuvieron una correlación positiva y 7 parejas una correlación negativa. En la fracción profunda (40-50 cm) 18 parejas de elementos tuvieron una correlación positiva y 9 parejas una correlación negativa. Esto indica que la lluvia favorece las reacciones químicas en el suelo, sobre todo en la fracción profunda debido a la permeabilidad de los suelos.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

No hay una relación estrecha entre la textura de los suelos analizados y su contenido de materia orgánica.

Los tipos de suelo resultantes fueron: franco arenoso (4), franco arcilloso (2), francos (2) y un suelo arcilloso.

Todos los suelos son ácidos ( $\text{pH} < 6$ ) y los de las zonas geotérmicas presentan una acidez muy fuerte ( $\text{pH}$  entre 2 y 4).

El orden de abundancia de los elementos mayores fue  $\text{Si} > \text{Al} > \text{Fe}$  en ambas temporadas y fracciones de suelo. Este orden continúa con  $\text{Fe} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Ti}$  en la temporada de secas en ambas profundidades, mientras que en la temporada de lluvias el orden continúa con  $\text{S} > \text{K} = \text{Ca} > \text{Ti} > \text{Na} > \text{Zr} > \text{Mg} > \text{P}$  en ambas profundidades.

El orden de abundancia de los elementos traza independientemente de la profundidad, en la época de secas fue  $\text{Ba} > \text{Mn} > \text{Sr}$ ; para la época de lluvias  $\text{Ba} > \text{Sr} > \text{Mn} > \text{Zn}$ . El resto de los elementos químicos presentó una abundancia distinta, dependiendo de la temporada y de la fracción del suelo.

El Ba presentó concentraciones del orden de miles de  $\text{mg/kg}$ . El Mn, Sr, Rb, Zn, V y Cl del orden de cientos de  $\text{mg/kg}$ . Y el resto de los elementos traza están por debajo de los  $100 \text{ mg/kg}$ .

En cuanto a los límites máximos permisibles disponibles para algunos elementos traza en suelos (As, Ba, Cr, Mn, Mo, Ni, Pb, Sc, Se, Sb, V, Zn), se observa que los valores máximos de concentración de los elementos medidos en la zona de estudio, están por encima de dichos límites, excepto para el caso del Pb.

La lluvia favorece las reacciones químicas en el suelo, sobre todo en la fracción profunda debido a la permeabilidad de los suelos.

Se recomienda, para este tipo de muestras donde el pH es inferior a 5.5, hacer análisis que permitan conocer el valor de la saturación por bases (V) y, para  $CE > 800 \mu\text{s}/\text{cm}$ , sería pertinente estudiar qué tipo de sales están presentes (Cordovilla *et al.*, 1995).

Se recomienda hacer el análisis de las demás fracciones del suelo (20-30 cm y 30-40 cm), para identificar los procesos de correlación entre elementos a lo largo del perfil del suelo.

También se recomienda hacer el análisis textural por cada horizonte de suelo, para evaluar los procesos de infiltración del agua.

## 7. REFERENCIAS

- Agarwal, B. K., 1991, X-Ray Spectroscopy: Berlin, Heidelberg, Nueva York, Springer-Verlag, 415 pp.
- Alarcón-Herrera, M. T., Llorens, E., Poch, M., 2012, Remoción de arsénico en agua de consumo humano en Latinoamérica: Chihuahua, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, xxii, 203 pp.
- Alloway, B. J., 2013, Heavy metals in soils. Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability: Berlin, Heidelberg, Nueva York, Springer, 613 pp.
- Álvarez-Morales, Y., Troyo-Diéguez, E., Nieto-Garibay, A., Beltrán-Morales, F. A., Murillo-Amador, B., Cruz-Falcón, A., Navejas-Jiménez, J., 2014, Vulnerabilidad hidroclimática y degradación del suelo en regiones agrícolas semiáridas: Terra Latinoamericana, 32(1), 47-58.
- Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Cisneros, G., Sánchez-Núñez, J. M., Gómez-Vasconcelos, M. G., Pola, A., Sosa-Ceballos, G., García-Tenorio, F., Reyes-Agustín, G., Osorio-Ocampo, S., García-Sánchez, L., Mendiola, I. F., Marti, J., López-Loera, H., Benowitz, J., 2019, Geology of the late Pliocene – Pleistocene Acoculco caldera complex, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México): Journal of Maps, 15(2), 8-18.
- Banaś, D., Kubala-Kukuś, A., Braziewicz, J., Majewska, U., Pajek, M., Wudarczyk-Moćko, J., Czech, K., Garnuszek, M., Stomkiewics, P., Szczepanik, B., 2013, Study of properties of chemically modified samples of halloysite mineral with X-ray fluorescence and X-ray powder diffraction methods: Radiation Physics and Chemistry, 93, 129-134.
- Barbieri, M., 2016, The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination: Journal of Geology & Geophysics, 5(1), 1-4.
- Baver, L. D., 1956, Soil physics: Nueva York, John Wiley & Sons, 489 pp.
- Berhe, A. A., Barnes, R. T., Six, J., Marín-Spiotta, E., 2018, Role of soil erosion in biogeochemical cycling of essential elements: Carbon, nitrogen, and phosphorus: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 46(1), 521-548.
- Birkle, P., Bundschuh, J., 2008, The abundance of natural arsenic in deep thermal fluids of geothermal and petroleum reservoirs in Mexico, *en* Armienta, M. A., Birkle, P., Bhattacharya, P., Bundschuh, J., Matschullat, J., Mukherjee, A. B., (eds), Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America: Wiltshire, CRC Press, 145-153.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., O'Connor, G. A., Orozco, M. S., 1993, Química del suelo: Ciudad de México, Limusa, 370 pp.
- Bouyoucos, G. J., 1927, The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils: Soil Science, 23(5), 343-354.

- Bradl, H., 2005, Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation: Londres, Elsevier, 282 pp.
- Budhu, M., 2007, Soil mechanics and foundations: New Jersey, John Wiley & Sons Inc., 634 pp.
- Burbano, H., 2013, La sociedad depende del todo y las partes: naturaleza y suelo, Tendencias: Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, 14(2), 9-22.
- Callender, E., 2003, Heavy metals in the environment-historical trends, *en* Holland, H. D., Sherwood Lollar, B., Turekian, K. K., (eds.), Environmental Geochemistry: Londres, Elsevier Ltd., 67-106.
- Castro-González, N. P., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R., Tamariz-Flores, J. V., Reyes-Cervantes, E., 2019, Nivel de contaminación de metales y arsénico en aguas residuales y suelos en la subcuenca del alto balsas en Tlaxcala y Puebla, México: Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 35 (2), 335-348.
- Chen, T. B., Zheng, Y. M., Lei, M., Huang, Z. C., Wu, H. T., Chen, H., ... & Tian, Q. , 2005, Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. *Chemosphere*, 60(4), 542-551.
- Chen, X.-G., Lyu, S.-S., Garbe-Schönberg, D., Lebrato, M., Li, X., Zhang, H.-Y., Zhang P.-P., Arthur Chen, C.-T., Ye, Y., 2018, Heavy metals from Kueishantao shallow-sea hydrothermal vents, offshore northeast Taiwan: Journal of Marine Systems, 180(abril 2018), 211-219.
- Cordovilla, M. P., Ocana, A., Ligeró, F., Lluch, C., 1995, Salinity effects on growth analysis and nutrient composition in four-grain legumes-rhizobium symbiosis: Journal of Plant Nutrition, 18(8), 1595-1609.
- Corrales, R., Rejas, J. G., 2010, Caracterización de alteraciones hidrotermales y dinámica de cobertura de suelos mediante métodos de teledetección, en el Valle de Choluteca, Honduras: Posgrados UNAH, II(4), 14-24.
- Davis, H. T., Aelion, C. M., McDermott, S., Lawson, A. B., 2009, Identifying natural and anthropogenic sources of metals in urban and rural soils using GIS-based data, PCA, and spatial interpolation: Environmental Pollution, 157(8-9), 2378-2385.
- De la Cruz, M. V., Castillo-Hernández, D., 1986, Estudio geológico de la zona geotérmica de la caldera de Acoculco, Puebla: Ciudad de México, CFE-GPG, reporte interno, 23 pp.
- Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek, D. F., Stewart, B. A., 1994, Defining soil quality for a sustainable environment: Wisconsin, Soil Science Society of America Inc., 244 pp.
- Doran, J. W., Parkin, T. B., 1994, Defining and assessing soil quality, *en* Doran, J. W., Coleman, D. C., Bezdicek, D. F., Stewart, B. A. (eds.), Defining soil quality for a sustainable environment: Wisconsin, Soil Science Society of America Inc., 1-21.
- Doran, J. W., Zeiss M. R., 2000, Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality: Applied Soil Ecology, 15(1), 3-11.

- Fernandes L. L., Nayak G. N., 2016, Geochemical assessment and fractionation of trace elements in estuarine sedimentary sub-environments, in Mumbai, India. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 6(1), 14-23.
- Folk, R. L., 1954, The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature, *The Journal of Geology*, 62(4), 344-359.
- Foth, H. D., 1990, *Fundamentals of soil science*: Nueva York, John Wiley and Sons, 360 pp.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muniz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R. (eds), 2014, *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*: Luxemburgo, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, 176 pp.
- Gee, G. W., Bauder, J. W., 1986, Particle-size analysis *en* Klute, A., (ed.), *Methods of soil analysis*: Madison, Sociedad Americana de Agronomía (ASA) y Sociedad de Ciencias del Suelo de America (SSSA), 383-411.
- Gee, G. W., Or, D., 2002, Particle-size analysis *en* Dane, J. H., Topp, G. C. (eds.), *Methods of soil analysis*, Part 4: Madison, Sociedad de Ciencias del Suelo de America (SSSA), 255-293.
- Geyne, A. R. Fries, C., Jr., Segerstrom, K., Black, R. F., Wilson, I. F., 1963, *Geología y yacimientos minerales del Distrito de Pachuca, Real del Monte, Edo. De Hidalgo, México*: Ciudad de México, Consejo de Recursos Naturales no Renovables México, 220 pp.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda C., Leirós M. C., Seoane S., 2005, Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties: *Soil Biology and Biochemistry*, 37(5), 877-887.
- Hiriart, G., 2011, *Evaluación de la energía geotérmica en México*: Ciudad de México, Banco Interamericano de Desarrollo (IDB), Comisión Reguladora de Energía (CRE), informe, 164 pp.
- Huluka, G., Miller, R., 2014, Particle size determination by hydrometer method: *Soil Test Methods from the Southeastern United States*, Southern Cooperative Series Bulletin, 419, 180-184.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2013, *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie v (capa unión)*: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, Aguascalientes.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2017, *Anuario estadístico y geográfico de Puebla 2017*: Ciudad de México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 940 pp.
- Islas, J., Manzini, F., Martínez, M., 2004, CO<sub>2</sub> mitigation costs for new renewable energy capacity in the Mexican electricity sector: *Solar Energy*, 76(2004), 499-507.

- Jahn, R., Blume, H. P., Asio, V. B., Spaargaren, O., Schad, P., 2006, Guidelines for soil description (4ta. Ed.): Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 97 pp.
- Jaramillo, D. J., 2002, Introducción a la ciencia del suelo: Medellín, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, 613 pp.
- Jenny, H., 1994, Factors of soil formation: a system of quantitative pedology: Nueva York, Courier Corporation - Dover publications, 281 pp.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 2001, Trace elements in soils and plants: Boca Ratón, CRC Press, 331 pp.
- Keller, E., 1996, Environmental geology: Nueva Jersey, Prentice-Hall, Inc., 560 pp.
- Khademi, H., Gabarrón, M., Abbaspour, A., Martínez-Martínez, S., Faz, A., Acosta, J. A., 2019, Environmental impact assessment of industrial activities on heavy metals distribution in street dust and soil: Chemosphere, 217(febrero 2019), 695-705.
- Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H., 2003, Environmental aspects of geothermal energy utilization: Geothermics, 32(4-6), 451-461.
- Liu, X., Song, Q., Tang, Y., Li, W., Xu, J., Wu, J., Wang, F., Brookes, P., 2013, Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: a multi-medium analysis: The science of the total environment, 463-464C, 530-540.
- Lyttleton, L., H. Buckman, 1944, Edafología: Naturaleza y propiedades del suelo: Buenos Aires, Acme Agency, 479 pp.
- López, A. J., 2005, Manual de edafología. Curso 2005-2006: Sevilla, Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química. Agrícola de la Universidad de Sevilla, 144 pp.
- López-Hernández, A., Martínez, E. I., 1996, Evaluación volcanológica y estructural de la zona geotérmica de Acoculco, Puebla, y su relación con la anomalía termal detectada en el pozo EAC-1: CFE-GPG, internal report OGL-AC-11/96, 38 pp.
- López-Hernández, A., Castillo-Hernández, D., 1997, Exploratory Drilling At Acoculco, Puebla, Mexico: A Hydrothermal System with only Nonthermal Manifestations: Geothermal Resources Council Transactions, 21, 429-433
- López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., Quijano-León, J. L., 2009, Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acoculco Caldera Complex, central Mexico: exploratory studies: Geothermics, 38(3), 279-293.
- Loué, L., 1988, Los microelementos en la agricultura: Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 354 pp.
- Lugo, H. J., 2002, Geomorfología climática: Investigaciones geográficas, 47(abril 2002), 152.
- Maksaev V., 2003, Metalogénesis. Capítulo 8. Alteraciones Hidrotermales (transparencias utilizadas en clase): Santiago, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Departamento de Geología, 9 pp.

- Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., Patra, A. K., 2007, Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1-4), 130-142.
- Mataix-Solera, J., 1999, Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución su conservación y regeneración: Elche, Universidad Miguel Hernández, Tesis Doctoral, 315 pp.
- McGill, W. B., & Cole, C. V., 1981, Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, 26(4), 267-286.
- McLennan, S. M., Anderson, R. B., Bell, J. F., Bridges, J. C., Calef, F., Campbell, J. L., Clark, B. C., Clegg, S., Conrad, P., Cousin, A., Des Marais, D. J., Dromart, G., Dyar, M. D., Edgar, L. A., Ehlmann, B. L., Fabre, C., Forni, O., Gasnault, O., Gellert, R., Gordon, S., Grant, J. A., Grotzinger, J. P., Gupta, S., Herkenhoff, K. E., Hurowitz, J. A., King, P. L., Le Mouélic, S., Leshin, L. A., Lévillé, R., Lewis, K. W., Mangold, N., Maurice, S., Ming, D. W., Morris, R. V., Nachon, M., Newsom, H. E., Ollila, A. M., Perrett, G. M., Rice, M. S., Schmidt, M. E., Schwenger, S. P., Stack, K., Stolper, E. M., Sumner, D. Y., Treiman, A. H., VanBommel, S., Vaniman, D. T., Vasavada, A., Wiens, R. C., Yingst, R. A., M. S. L. Science Team, 2014, Elemental geochemistry of sedimentary rocks at Yellowknife Bay, Gale crater, Mars: *Science*. 343(6169), 1244734.
- Medina-González, H., García-Coronado, J., Núñez-Acosta, D., 2007, El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo: *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3), 19-24.
- Meléndez, B., Fúster, J. M., 1981, *Geología Cuarta edición.*: Madrid, Paraninfo, 823 pp.
- Muller, G., 1969, Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River: *Journal of Geology*, 2, 108-118.
- Olarte, R. L., Muñoz, B. M., Benavides, G. E., Garavito, F., Luna Z., C., Mejía C., L., Rozo, E., Gonzalez Fletcher, A., 1979, *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*: Bogotá, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 664 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2015a, Base referencial mundial del recurso suelo 2014 (Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Actualización 2015): Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 205 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2015b, Status of the World's Soil Resources (SWSR) –Main Report: Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, 650 pp.
- Pacyna, J. M., Winchester, J. W., 1990, Contamination of the global environment as observed in the Arctic: *Global and Planetary Change*, 2(1-2), 149-157.

- Pizarro, F., 1978, Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos: Madrid, Editora Agrícola Española, 521 pp.
- Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2004, Informe Perspectivas del Medio Ambiente en México, 2004 GEO México: Ciudad de México, Instituto Nacional de Ecología, 323 pp.
- Porta, J., López-Acebedo, M., Roquero, C., 1994, Edafología para la agricultura y el medio ambiente: Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 807 pp.
- Poblete, N., Macari, O., Rodríguez, C., 2015, Enriquecimiento y distribución espacial de arsénico en los suelos de las comunas de Quintero y Puchuncaví, *in* XIV Congreso Geológico Chileno: La Serena, Chile. p. 288-291
- Quevauviller, P., Lavigne, R., Cortez, L., 1989, Impact of industrial and mine drainage wastes on the heavy metal distribution in the drainage basin and estuary of the Sado River (Portugal): *Environmental Pollution*, 59(4), 267-286.
- Reimann, C., De Caritat, P., 2005, Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors: *Science of the Total Environment*, 337(1-3), 91-107.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., Jiménez, E. E. G., 2016, Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria: *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 16(2), 66-77.
- Rocha-López, S., Jiménez-Salgado E., Palma-Guzmán H., 2006, Propuesta para dos pozos exploratorios en el proyecto geotérmico de Acoculco, Pue: Comisión Federal de Electricidad, informe interno No. OGL-ACO- 03/06. Inédito.
- Romero, M., 1996, Las Energías Renovables y su Impacto Ambiental en el Balance Energético Mundial, *en* Coloquio Nuevas Tecnologías para el Sector Eléctrico del siglo XXI, Temixco, Morelos: Temixco, Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas, 42 pp.
- Rosas, E., 2017, Hidrología e hidroquímica de tres zonas con potencial geotérmico. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra: Ensenada, Centro de Investigaciones Científicas y de Estudios Superiores de Ensenada (CICESE), 121 pp.
- Rozados, M.J., Suárez, G. M., Méndez, P.H., 2004, Distribución del tamaño de partículas en suelos forestales de Galicia (no España) mediante la aplicación de tecnología de difracción láser: *Cuadernillo de la sociedad española de ciencias forestales*, 20(2005), 209-214.
- Saavedra, J., 2015, El suelo en nuestra vida: Agricultura e Innovación, publicación en línea, EAP Zamorano (2015).
- Sawkins, F. J., 2013, Metal deposits in relation to plate tectonics: Londres, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 461 pp.

- Schiff, K. C., Weisberg, S. B., 1999, Iron as a reference element for determining trace metal enrichment in Southern California coastal shelf sediments: *Marine Environmental Research*, 48(2), 161-176.
- Schoenholtz, S. H., Van Miegroet, H., Burger, J. A., 2000, A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities: *Forest ecology and management*, 138(1-3), 335-356.
- Schulze, D. G., Nagel, J. L., Van Scoyoc, G. E., Henderson, T. L., Baumgardner, M. F., Stott, D. E., 1993, Significance of organic matter in determining soil colors, *en* Bigham, J. M., Ciolkosz, E. J. (eds.), *Soil color: Madison, publicación especial de la Sociedad de Ciencias del Suelo de America (SSSA)*, 71-90.
- Schwertmann, U., 1993, Relations between iron oxides, soil color, and soil formation, *en* Bigham, J. M., Ciolkosz, E. J. (eds.), *Soil color: Madison, publicación especial de la Sociedad de Ciencias del Suelo de America (SSSA)*, 51-69.
- Secretaría de Energía (SENER), 2013, Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032: Ciudad de México, Secretaría de Energía (SENER), 330 pp.
- Senesi, G. S., Campanella, B., Grifoni, E., Legnaioli, S., Lorenzetti, G., Pagnotta, S., Poggialini, F., Palleschi, V., De Pascale, O., 2018, Elemental and mineralogical imaging of a weathered limestone rock by double-pulse micro-Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 143(Mayo 2018), 91-97.
- Shankar, S., Shanker, U., Shikha, 2014, Arsenic contamination of groundwater: a review of sources, prevalence, health risks, and strategies for mitigation: *The scientific world journal*, 2014, 18 pp.
- Silva, A., Montemayor, B., Villarreal Espino-Barros, O., López, P., Reyes, L., Cruz-Angón, A., Rico, F., 2011, *La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado: Ciudad de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)*, 440 pp.
- Singh, A., Sharma, R. K., Agrawal, M., Marshall, F. M., 2010, Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India: *Food and chemical toxicology*, 48(2), 611-619.
- Soil Survey Staff (SSS), 1998, *Keys to Soil Taxonomy (8va. Ed.): Washington D. C., Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (USDA-NRCS)*, 326 pp.
- Soil Survey Staff (SSS), 1999, *Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys Agricultural Handbook 436 (2da. ed.): Washington D. C., Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (USDA-NRCS)*, 869 pp.
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Salazar-Hermenegildo, N., Boijseauneau-López, M. E., Pérez-Orozco, J. D., 2018, *The Acoculco Caldera Complex magmas: Genesis*,

- evolution and relation with the Acoculco geothermal system: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358(junio 2018), 288-306.
- Stenberg, B., 1999, Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators: *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-plant Soil Science*, 49(1), 1-24.
- Sutherland, R. A., 2000, Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii: *Environmental geology*, 39(6), 611-627.
- Tarbutck, E., Lutgens, F., 1999, *Ciencias de la tierra: Una introducción a la Geología Física (6ª Ed.)*: Madrid, Prentice Hall Iberia S. R. L., 572 pp.
- Tello-Hinojosa, E., 1994, *Química de los fluidos hidrotermales de la zona geotérmica de la caldera de Acoculco, Pue.: Comisión Federal de Electricidad (CFE), informe interno No. GQ-013/1994, Octubre/1994. Inédito.*
- Úbeda, X., 1998, *Efectes de les diferents intensitats de foc, durant els incendis forestals, en els paràmetres físico-químics del sòl i en l'increment de l'escolament i l'erosió*: Barcelona, Universidad de Barcelona, Tesis doctoral, 231 pp.
- Verma, S. P., Tapia, F. V., 2001, Estado actual de la investigación geoquímica en el campo monogenético de la Sierra de Chichinautzin: análisis de información y perspectivas: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(1), 1-36.
- Volke, T., Velazco, J. A., de la Rosa, D. A., 2005, *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*: Ciudad de México, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología, 141 pp.
- Wedepohl, K. H., 1995, The composition of the continental crust: *Geochimica et cosmochimica Acta*, 59(7), 1217-1232.
- Worthen, E. L., Aldrich, S. R., 1959, *Suelos agrícolas: su conservación y fertilización*: Ciudad de México, Tela editorial, 416 pp.
- Yi, Y., Yang, Z., Zhang, S., 2011, Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin: *Environmental pollution*, 159(10), 2575-2585.