

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Maestría en Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
con orientación en Geociencias Ambientales**

---

**Geoquímica ambiental en suelo, agua y vegetación de  
la zona de exploración geotérmica de Acoculco,  
Puebla, México.**

Tesis para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

Daniel Vela Godínez  
Ensenada, Baja California, México  
2022

Tesis defendida por  
**Daniel Vela Godínez**

y aprobada por el siguiente Comité

---

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo  
Directora de tesis

Miembros del comité  
Dr. Marco Antonio García Zárate

Dr. Juan Carlos García Ramos

Dr. Claudio Inguaggiato



---

Dr. Javier Alejandro González Ortega  
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

---

Dr. Pedro Negrete Regagnon  
Director de Estudios de Posgrado

*Daniel Vela Godínez © 2022*

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

Resumen de la tesis que presenta **Daniel Vela Godínez** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

### **Geoquímica ambiental en suelo, agua y vegetación de la zona de exploración geotérmica de Acozulco, Puebla, México.**

Resumen aprobado por:

---

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo  
Directora de tesis

Los sistemas hidrotermales han sido ampliamente estudiados por el gran interés que se ha tenido para la generación de energía geotermoeléctrica, pero existen pocos estudios de geoquímica ambiental, especialmente en zonas de baja permeabilidad, como lo ha demostrado ser la zona de exploración geotérmica de Acozulco, Puebla. El sitio está caracterizado por una alteración hidrotermal argílica, manifestaciones frías con fluidos ácidos, emisiones de gases y temperaturas superficiales entre 10 y 26 °C. Dichas condiciones, pueden propiciar el transporte de elementos químicos potencialmente tóxicos entre el suelo, el agua y la vegetación circundante. Por lo anterior, se propone investigar la correlación entre los elementos químicos inorgánicos de importancia ambiental presentes en las diferentes fases del suelo, con su presencia en forma disuelta en el agua y en la vegetación circundante en la zona de exploración geotérmica de Acozulco, Puebla. Para analizar los elementos químicos en las fracciones del suelo, se utilizó el método de extracción secuencial, propuesto por Tessier en 1979 y modificado por Rauret y colaboradores en el 2000. Para el material vegetal, se realizó una digestión ácida con el método propuesto por la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) de Estados Unidos. El análisis y cuantificación de los elementos químicos presentes en las muestras de suelo, agua y vegetación se realizó con equipos de plasma de acoplamiento inductivo con espectrometría de emisión óptica (ICP-OES) para análisis de elementos mayores y con espectrometría de masas (ICP-MS) para análisis de elementos traza. Los resultados más importantes de esta investigación, revelan que los gases como el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S están generando un ambiente ácido, gracias a la disolución de éstos en el agua. Su interacción con el suelo, propicia que los iones metálicos mayoritarios y elementos traza se encuentren principalmente en la fracción intercambiable. A través de reacciones oxidación-reducción pasan a la fracción de hidróxidos de Fe y Mn del suelo pudiendo así ser aprovechados por plantas y hongos circundantes. Estos procesos se observaron en las zonas hidrotermales de Los Azufres y Alcaparrosa, sitios con los menores valores de pH tanto en agua como en el suelo. Es importante resaltar la alta concentración de As en el agua, que sobrepasa 4 veces la concentración que recomienda la NOM-127-SSA1-2017 como límite máximo permisible, así como la presencia de sulfatos y de Fe disuelto. Estas concentraciones representan un riesgo para la salud ambiental y humana en la zona.

**Palabras clave:** Sitios hidrotermales, geoquímica, suelo, agua y vegetación.

Abstract of the thesis presented by **Daniel Vela Godínez** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Science in Earth Sciences with orientation in Environmental Geosciences.

**Environmental geochemistry in soil, water and vegetation of the Acozulco geothermal exploration area, Puebla, Mexico**

Abstract approved by:

---

Dra. Zayre Ivonne González Acevedo  
Thesis Director

Hydrothermal systems have been widely studied due to the great interest in geothermal power generation, but there are few studies of environmental geochemistry, especially in low permeability zones, as the Acozulco geothermal exploration zone, Puebla, has shown to be. The site is characterized by argillic hydrothermal alteration, cold manifestations with acidic fluids, gas emissions and surface temperatures between 10 and 26 °C. These conditions may favor the transport of potentially toxic chemical elements between the soil, water and surrounding vegetation. Therefore, it is proposed to investigate the correlation between the inorganic chemical elements of environmental importance. That might be present in the different phases of the soil, in dissolved form in the water and in the surrounding vegetation in the geothermal exploration zone of Acozulco, Puebla. To analyze the chemical elements in the soil fractions, the sequential extraction method, proposed by Tessier in 1979 and modified by Rauret and collaborators in 2000, was used. For the plant material, an acid digestion was performed using the method proposed by the Environmental Protection Agency (EPA) of the United States. The analysis and quantification of the chemical elements present in soil, water and vegetation samples was carried out with inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) for major element analysis and mass spectrometry (ICP-MS) for trace element analysis. The most important results of this research reveal that gases such as CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S are generating an acidic environment, thanks to their dissolution in water. Their interaction with the soil causes the major ions and trace elements to be found mainly in the exchangeable fraction. Through oxidation-reduction reactions, they pass to the Fe and Mn hydroxide fraction of the soil and can thus be used by the surrounding plants and fungi. These processes were observed in the hydrothermal zones of Los Azufres and Alcaparrosa, sites with the lowest pH values in both water and soil. It is important to highlight the high concentration of As in the water, which exceeds 4 times the concentration recommended by NOM-127-SSA1-2017 as the maximum allowable limit, as well as the presence of sulfates and dissolved Fe. These concentrations represent a risk to environmental and human health in the area.

**Keywords: Hydrothermal sites, geochemistry, soil, water and vegetation.**

## Dedicatoria

*A mis padres **Alejandro y Sonia**  
por haberme enseñado con el ejemplo  
a trabajando para lograr mis metas*

*Y a mi esposa **Malinali**  
por su gran paciencia e infinito amor*

## Agradecimientos

Agradezco al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y al Posgrado de Ciencias de la Tierra por darme la oportunidad de estudiar una Maestría en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales para poder desarrollarme en ese ámbito como profesional.

A la Gerencia de Proyectos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por su apoyo y al fondo SENER/CONACYT de Sustentabilidad Energética proyecto 2015-04-268074, por el apoyo económico a través del paquete de trabajo 9 (Evaluación de impactos ambientales, sociales y económicos de sistemas geotérmico mejorados y supercalientes) del proyecto GEMex (Cooperación Europeo-Mexicana en la investigación geotérmica para el desarrollo de sistemas geotérmico mejorados y supercalientes) logrando así satisfactoriamente los objetivos del presente trabajo.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme un apoyo económico para la realización de esta maestría

A la Dra. Zayre Ivonne Gonzáles Acevedo por la dedicación que le imprime a su trabajo y por la paciencia y el trato tan humilde y humano con el que trabaja con todos sus colegas y en especial con el que me trató como su alumno a lo largo de este proyecto.

A mis sinodales el Dr. Marco Antonio García Zárate, Dr. Juan Carlos García Ramos y al Dr. Claudio Inguaggiato por su paciencia, retroalimentación y consejos de manera respetuosa humana y atenta.

Al Doctor Alejandro Orozco Durán por el apoyo, la guía, las charlas y sobre todo la compañía en esas tardes de trabajo en el laboratorio.

Al M en C Enrique Alfonso Retamoza González por todo su apoyo, disponibilidad y amabilidad para la realización de diversos análisis.

A la Dra. María Lourdes González Arqueros y a su alumna Circe López Guillén de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el aporte de conocimientos a mi formación en ciencias del suelo

Al Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica por abrirnos las puertas de sus laboratorios para diversos análisis realizados y a la Bióloga Belinda Sandoval Rangel por su disponibilidad y amabilidad.

A mi esposa Malinali por estar siempre a mi lado acompañándome en los días de desvelo, tanto de trabajo como de fiesta, por su infinito amor, paciencia, respeto y confianza.

A mi amigo M. en C. Fernando Rodrigo Díaz Jaramillo por haberme influido en tomar la gran decisión de aplicar a la maestría por apoyarme, guiarme, por la compañía y por siempre brindarme tu amistad y grandes consejos

A mi amiga la M. en C. Carolina Balbuena Salomón por apoyarme y darme aliento en la cuando las fuerzas me faltaban para la realización de esta tesis

A mis padres Alejandro y Sonia y mis hermanos Alejandro, Areli y Carlos por siempre brindarme un respaldo enorme y estar presentes a pesar de está tan lejos físicamente y ser siempre mi inspiración.

## Tabla de contenido

Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xvii
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1. Antecedentes .....	2
1.2. Justificación .....	2
1.3. Hipótesis .....	3
1.4. Objetivos .....	3
1.4.1 Objetivo general .....	3
1.4.2 Objetivos específicos .....	4
Capítulo 2. Marco teórico .....	5
2.1. Geoquímica ambiental .....	5
2.2. Elementos químicos inorgánicos de importancia ambiental .....	5
2.3. Sistemas hidrotermales .....	6
2.4. Transporte de elementos en el ambiente.....	7
2.5. Procesos de transporte entre suelo, agua y vegetación.....	8
2.6. Especiación de elementos en el ambiente y extracción secuencial.....	11
Capítulo 3. Zona de estudio.....	13
3.1. Localización .....	13
3.2. Geología y contexto hidrotermal .....	14
3.3. Clima .....	17
3.4. Suelo .....	19
3.5. Hidrología.....	19
3.6. Geoquímica .....	20
Capítulo 4.- Metodología .....	22

4.1. Inventario y estrategias de muestreo .....	22
4.2. Preparación y procesamiento de muestras.....	26
4.3. Análisis de datos.....	32
Capítulo 5. Resultados y Discusión .....	<b>34</b>
5.1. Unidades geopedológicas.....	35
5.2. Análisis por sitio .....	38
5.2.1. Sitio AC1 San José Corral Blanco .....	38
5.2.2 Sitio AC2 El Eco.....	44
5.2.3 Sitio AC3 La Gloria .....	53
5.2.4 Sitio AC4 Cruz Colorada .....	58
5.2.5 Sitio AC5 Terrerillos .....	65
5.2.6 Sitio AC6 La Cañada .....	69
5.2.7 Sitio AC7 Los Azufres .....	77
5.2.8 Sitio AC8 Cañada de Piedras .....	85
5.2.9 Sitio AC9 Alcaparrosa.....	94
5.2.10 Sitio AC10 Ocojala.....	105
5.2.11 Sitio AC11 El Tehuacán .....	111
5.3. Análisis global.....	118
Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones .....	<b>137</b>
Literatura citada.....	138
Anexo .....	<b>143</b>

## Lista de figuras

Figura 1.- Mapa de la localización del área de exploración geotérmica de Aocolco, Puebla.....	13
Figura 2.- Columna litológica del pozo EAC1, tomada de (López-Hernández, 2009).....	15
Figura 3.- Sistema hidrotermal de la caldera Aocolco, Puebla. Tomada de Sosa-Ceballos et. al., 2018. .....	17
Figura 4.- Mapa de la región Chignahuapan-Zacatlán donde se muestran los diversos climas de acuerdo con la clasificación de Köppen (Modificada de Morales, 2014). ....	18
Figura 5.- Variación de la precipitación mensual media (barras amarillas), temperaturas máximas (línea azul), mínimas (línea gris) y media mensual (línea naranja), registradas en la estación meteorológica Chignahuapan. Datos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (1981-2010).....	19
En la superficie de la región, de acuerdo con la ubicación y clasificación utilizada en la carta edafológica editada por INEGI, se representa el tipo de suelo de cada zona. En el caso de la zona de estudio ( <i>Ver Figura 6</i> ), el tipo de suelo encontrado es Andosol, en particular Andosol húmico y Andosol órtico, ambos con una textura media. También se encuentran Luvisoles y Feozem (Morales, 2014).....	19
Figura 6.- Mapa de suelos de la región Chignahuapan-Zacatlán (Modificada de Morales, 2014). ....	20
Figura 7.- Mapa de muestreo en la zona Aocolco, Puebla. ....	24
Figura 8.- Diagrama de flujo de la extracción secuencial (Rauret et al., 2000).....	27
Figura 9.- Diagrama de recobro de los elementos mayoritarios para el material de referencia Metal in Soil SQC001 . ....	28
En cuanto a la obtención del parámetro tasa de infiltración del suelo se realizó mediante el método de doble anillo propuesto por Selker y colaboradores en 1999 y revisado por Alvarado y Barahona en 2017. ....	29
Figura 10.- Diagrama de recobro de los elementos mayoritarios para el material de referencia Metal in Soil SQC001. ....	29
Figura 11.- Diagrama de recobro de los elementos mayoritarios para el material de referencia CBR 679. ....	31
Figura 12.- Diagrama de recobro de los elementos mayoritarios para el material de referencia CBR 679. ....	32
Figura 13.- Mapa de imagen satelital de la zona de estudio, zonas de influencia para cada perfil de suelo muestreado, puntos de suelo, agua vegetación y hongos muestreados, red de caminos y carreteras, escorrentía y cuerpos de agua .....	36

Figura 14.- Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC1. ....	38
Figura 15.- Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC1. ....	39
Figura 16.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC1. ....	40
Figura 17.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC1, muestra B19AC12. ....	42
Figura 18.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC12-01, especie <i>Baccharis conferta</i> , en el sitio AC1.....	42
Figura 19.-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC1, muestra B19AC12.....	43
Figura 20.-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de $\mu\text{g}/\text{kg}$ , en la muestra B19AC12-01, especie <i>Baccharis conferta</i> , en el sitio AC1. ....	43
Figura 21.-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC2. ....	44
Figura 22.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC2. ....	45
Figura 23.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC2. ....	46
Figura 24.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC2, muestra B19AC13.....	47
Figura 25.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC13-01, especie <i>Baccharis conferta</i> , en el sitio AC2.....	48
Figura 26.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC13-02, especie <i>Muhlenbergia macroura</i> en el sitio AC2.....	49
Figura27.-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC2, muestra B19AC13 .....	49
Figura 28.-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de $\mu\text{g}/\text{kg}$ , en la muestra B19AC13-01, especie <i>Baccharis conferta</i> , en el sitio AC2. ....	50
Figura 29.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de $\mu\text{g}/\text{kg}$ , en la muestra B19AC13-02, especie <i>Muhlenbergia macroura</i> en el sitio AC2.....	50
Figura 30.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC2, muestra B19AC14.....	51
Figura 31.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC14-01, especie <i>Muhlenbergia macroura</i> en el sitio AC2.....	51
Figura 32.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC14-02, especie <i>Pinus patula</i> en el sitio AC2.....	52
Figura 33.-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC2, muestra B19AC14.....	52

Figura 34.-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de $\mu\text{g}/\text{kg}$ , en la muestra B19AC14-01, especie <i>Muhlenbergia macroura</i> en el sitio AC2. ....	53
Figura 35.-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de $\mu\text{g}/\text{kg}$ , en la muestra B19AC14-02, especie <i>Pinus patula</i> en el sitio AC2. ....	53
Figura 36.- Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC3. ....	54
Figura 37.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC3. ....	55
En la figura 38 se observa que el tipo de vegetación para el año 1997 era agricultura de temporal. La cubierta vegetal para el año 2016 y el tipo de uso de suelo para el año 2018 ganó terreno al suroeste la vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino (sección B y C). ....	55
Figura 38.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC3. ....	56
Figura 39.- Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC3, muestra B19AC19. ....	57
Figura 40.-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC3, muestra B19AC19.....	58
Figura 41.-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC4. ....	59
Figura 42.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC4. ....	60
Figura 43.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC4. ....	60
Figura 44.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC4, muestra B19AC17.....	62
Figura 45.- Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC4, muestra B19AC17.....	63
Figura 46.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC4, muestra B19AC18.....	64
Figura 47.-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC4, muestra B19AC18.....	64
Figura 48.-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC5. ....	65
Figura 49.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC5. ....	66
Figura 50.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC5. ....	67
Figura 51.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC5, muestra B19AC20.....	68
Figura 52.- Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC5, muestra B19AC20.....	69

Figura 53.-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC6. ....	70
Figura 54.- Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC6. ....	71
Figura 55.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio ACIII. ....	72
Figura 56.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC6, muestra B19AC15. ....	73
Figura 57.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC15-01, especie <i>Baccharis conferta</i> en el sitio AC6.....	74
Figura 58.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC15-02, especie <i>Pinus Patula</i> en el sitio AC6. ....	74
Figura 59.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC15-03, especie <i>Muhlenergia macroura</i> en el sitio AC6.....	75
Figura 60.-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC6, muestra B19AC15. ....	75
Figura 61.-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de µg/kg, en la muestra B19AC15-01, especie <i>Baccharis conferta</i> en el sitio AC6. ....	76
Figura 62.-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de µg/ kg, en la muestra B19AC15-02, especie <i>Pinus Patula</i> en el sitio AC6. ....	76
Figura 63.-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de µg/ kg, en la muestra B19AC15-02, especie <i>Muhlenergia macroura</i> en el sitio AC6. ....	77
Figura 64.-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC7. ....	78
Figura 65.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC7. ....	79
Figura 66.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC7. ....	80
Figura 67.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC7, muestra A15AC1.....	82
Figura 68.-Elementos mayoritarios en el Sitio AC7 Los Azufres, muestra de agua AC15AC1. ....	83
Figura 69.-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC7, muestra A15AC1. ....	84
Figura 70.-Elementos Traza en el Sitio AC7 Los Azufres, muestra de agua AC15AC1. ....	84
Figura 71.-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC8. ....	85
Figura 72.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC8. ....	86

Figura 73.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC8. ....	87
Figura 74.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC8, muestra B19AC16. ....	88
Figura 75.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC16-01, especie <i>Baccharis conferta</i> en el sitio AC6. ....	89
Figura 76.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC16-02, especie <i>Pinus Patula</i> en el sitio AC6. ....	89
Figura 77.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios para la muestra Z2P1 de hongos identificado como <i>Hypomyces lactifluorum</i> . ....	90
Figura 78.-Diagrama que representa los elementos mayoritarios para la muestra Z2P2 de hongos identificado como <i>Amanita muscaria</i> . ....	90
Figura 79.-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC8, muestra B19AC16. ....	91
Figura 80.-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de $\mu\text{g}/\text{kg}$ , en la muestra B19AC16-01, especie <i>Baccharis conferta</i> en el sitio AC8. ....	92
Figura 81.-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de $\mu\text{g}/\text{kg}$ , en la muestra B19AC16-02, especie <i>Pinus Patula</i> en el sitio AC8. ....	92
Figura 82.-Diagrama que representa los elementos traza para la muestra Z2P1 de hongos identificado como <i>Hypomyces lactifluorum</i> . ....	93
Figura 83.-Diagrama que representa los elementos traza para la muestra Z2P2 de hongos identificado como <i>Amanita muscaria</i> . ....	93
Figura 84.-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC9. ....	94
Figura 85.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC9. ....	95
Figura 86.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio ACIX. ....	96
Figura 87.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC9, muestra A18AC08a. ....	98
Figura 88.-Elementos mayoritarios en el Sitio AC9 Alcaparrosa. ....	99
Figura 89.-Elementos mayoritarios encontrados en la muestra Z4P1 <i>Boletus edilus</i> . ....	100
Figura 90.-Elementos mayoritarios encontrados en la muestra Z4P2 <i>Amanita muscaria</i> . ....	100
Figura 91.-Elementos mayoritarios encontrados en la muestra Z4P3 <i>Pleorus sp.</i> ....	101
Figura 92.- Elementos mayoritarios encontrados en la muestra Z4P4 <i>Hydnellum sp.</i> ....	101
Figura 93.- Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC9, muestra A18AC08a. ....	102
Figura 94.-Elementos Traza en el Sitio AC9 Alcaparrosa. ....	103

Figura 95.-Elementos traza encontrados en la muestra Z2P1 <i>Boletus edulis</i> .....	103
Figura 96.-Elementos traza encontrados en la muestra Z4P2 <i>Amanita muscaria</i> .....	104
Figura 97.- Elementos traza encontrados en la muestra Z4P3 <i>Pleurotus sp.</i> .....	104
Figura 98.- Elementos traza encontrados en la muestra Z4P4 <i>Hydnellum sp.</i> .....	105
Figura 99.-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC10.....	106
Figura 100.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC10. ....	107
Figura 101.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC10. ....	108
Figura 102.-Elementos mayoritarios en el Sitio AC10 Ocojala, muestra A18AC30 .....	109
Figura 103.-Elementos mayoritarios encontrados en la muestra Z1P2 de hongos perteneciente a la familia <i>Pleurotus sp.</i> .....	110
Figura 104.-Elementos mayoritarios en el Sitio AC10 Ocojala, muestra A18AC30. ....	110
Figura 105.- Elementos traza encontrados en la muestra Z1P2 de hongos perteneciente a la familia <i>Pleurotus sp.</i> .....	111
Figura 106.-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC11. ....	112
Figura 107.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC11. ....	113
Figura 108.-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC11. ....	114
Figura 109.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC9, muestra A18AC31.....	116
Figura 110.-Elementos mayoritarios en el Sitio AC11 El Tehuacán. ....	116
Figura 111.- Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC11, muestra A18AC31. ....	117
Figura 112.-Elementos traza en el Sitio AC11 El Tehuacán. ....	118
Figura 113.-Diagrama Schoeller que representa la concentración en mg/kg de los elementos analizados en la extracción secuencial para la fracción intercambiable. Los puntos en color claro y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales. ....	121
Figura 114.-Diagrama Schoeller que representa la concentración en mg/kg de los elementos analizados en la extracción secuencial para la fracción de Hidróxidos de Fe y Mn. El punto en color vino y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales. ....	122

- Figura 115.-Diagrama Schoeller que representa la concentración en mg/kg de los elementos analizados en la extracción secuencial para la fracción de la materia orgánica. Los puntos en color negro y líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales..... 123
- Figura 116.- Diagrama Schoeller que representa la concentración en mg/kg de los elementos analizados en la extracción secuencial para la fracción residual. Los puntos en color gris y líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales. .... 124
- Figura 117.-Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos mayoritarios para el agua en una concentración de mg/L. Los sitios que están en color cian y líneas punteadas son considerados hidrotermales..... 125
- Figura 118.-Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos mayoritarios para las plantas en una concentración de mg/kg. BC (*Baccharis conferta*), MM (*Muhlenbergia macroura*) y PP (*Pinus Patula*). .... 126
- Figura 119.-Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos mayoritarios para los hongos en una concentración de mg/kg. Los sitios que están en color morado oscuro y líneas punteadas son considerados hidrotermales. AM (*Amanita muscaria*) y HL (*Hypomyces lactifluorum*). ... 127
- Figura 120.-Diagrama Schoeller que representa la concentración en  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de los elementos traza analizados en la extracción secuencial para la fracción intercambiable. Los puntos en color claro cian y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales..... 128
- Figura 121.-Diagrama Schoeller que representa la concentración en  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de los elementos traza analizados en la extracción secuencial para la fracción de hidróxidos de Fe y Mn. Los puntos de color vino y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales. .... 129
- Figura 122.-Diagrama Schoeller que representa la concentración en  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de los elementos traza analizados en la extracción secuencial para la fracción de la materia orgánica. Los puntos de color negro y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales..... 130
- Figura 123.-Diagrama Schoeller que representa la concentración en  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de los elementos traza analizados en la extracción secuencial para la fracción de residual. Los puntos de color gris y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales..... 131
- Figura 124.-Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos traza para el agua en una concentración de  $\mu\text{g}/\text{L}$ . Los sitios que están en color cian y líneas punteadas son considerados hidrotermales..... 132
- Figura 125.-Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos traza para las plantas en una concentración de  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . BC (*Baccharis conferta*), MM (*Muhlenbergia macroura*) y PP (*Pinus Patula*). .... 133

**Figura 126.-Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos traza para los hongos en una concentración de  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Los sitios que están en color morado oscuro y líneas punteadas son considerados hidrotermales. AM (*Amanita muscaria*) y HL (*Hypomyces lactifluorum*). ..... 134**

## Lista de tablas

Tabla 1.- Muestras de agua colectadas y procesadas, de la zona de Aocolco. *sistemas hidrotermales. .....	22
Tabla 2.- Muestras de suelo recolectadas y procesadas mediante extracción secuencial, de la zona de Aocolco, Puebla .....	23
Tabla 3.- Muestras de vegetación y hongos recolectadas y procesadas de la zona de Aocolco, Puebla. *muestreados en sistemas hidrotermales. ....	23
Tabla 4.- Porcentaje de recuperación para los elementos mayoritarios obtenidos en la extracción secuencial del suelo .....	28
Tabla 5.- Porcentaje de recuperación para los elementos traza obtenidos en la extracción secuencial del suelo .....	29
Tabla 6.- Material de referencia col blanca (CBR 679), elementos mayoritarios. ....	31
Tabla 7.- Material de referencia col blanca (CBR 679), elementos traza. ....	31
Tabla 8.- Sitios muestreados en la zona de estudio. *Sitios hidrotermales. ....	36
Tabla 9.- Unidades geopedológicas construidas a partir de la geología local, el tipo de uso de suelo y la pendiente.....	37
Tabla 10.- Variables que conforman de la estructura del suelo en el sitio AC1. ....	40
Tabla 11.- Variables fisicoquímicas del suelo en el sitio AC1. ....	40
Tabla 12.- Textura del suelo en el sitio AC1.....	41
Tabla 13.- Variables que conforman de la estructura del suelo en el sitio AC2 .....	46
Tabla 14.- Variables fisicoquímicas en el sitio AC2.....	46
Tabla 15.- Textura del suelo en el sitio AC2.....	47
Tabla 16.- Variables que conforman de la estructura del suelo en el sitio AC3 .....	56
Tabla 17.- Variables fisicoquímicas en el sitio AC3.....	56
Tabla 18.- Textura del suelo en el sitio AC3.....	56
Tabla 19.- Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC4 .....	61
Tabla 20.- Variables fisicoquímicas en el sitio AC4.....	61
Tabla 21.- Textura del suelo en el sitio AC4.....	61
Tabla 22.- Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC5 .....	67
Tabla 23.- Variables fisicoquímicas en el sitio AC5.....	67
Tabla 24.- Textura del suelo en el sitio AC5.....	68
Tabla 25.- Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC6 .....	72
Tabla 26.- Variables fisicoquímicas en el sitio AC6.....	72

Tabla 28.- Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC7 .....	81
Tabla 29.- Variables fisicoquímicas el sitio AC7 .....	81
Tabla 30.- Textura del suelo el sitio AC7 .....	81
Tabla 31.- Parámetros medidos para la muestra A18AC06 durante el muestreo. ....	81
Tabla 32.- Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC8 .....	87
Tabla 33.- Variables fisicoquímicas en el sitio AC8 .....	87
Tabla 34.- Textura del suelo en el sitio AC8.....	88
Tabla 35.- Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC9 .....	96
Tabla 36.- Variables fisicoquímicas en el sitio AC9.....	96
Tabla 37.- Textura del suelo en el sitio AC9.....	97
Tabla 38.- Parámetros medidos para la muestra de agua A18AC08.....	97
Tabla 39.- Parámetros medidos para la muestra A18AC30 durante el muestreo. ....	108
Tabla 40.- Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC11 .....	114
Tabla 41.- Variables fisicoquímicas en el sitio AC11.....	114
Tabla 42.- Textura del suelo en el sitio AC11 .....	115
Tabla 43.- Parámetros medidos para la muestra A18AC30 durante el muestreo. ....	115
Tabla 44.- Fracción predominante de cada elemento mayoritario en los 10 sitios de suelo, azul=intercambiable, roja=hidróxidos de Fe y Mn, negro=materia orgánica y amarillo=residual. .....	120
Tabla 45.- Fracción predominante de cada elemento traza en los 10 sitios de suelo, azul=intercambiable, roja=hidróxidos de Fe y Mn, negro=materia orgánica y amarillo=residual. ....	120
Tabla 46.- Límites máximos permisibles para los elementos mayoritarios. ....	124
Tabla 47.- Contenido de S en los puntos hidrotermales.....	125
Tabla 48.- Límites máximos permisibles para los elementos traza. ....	131
Tabla 49.- Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la fracción intercambiable en los suelos de cada sitio. ....	143
Tabla 50.- Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la fracción hidróxidos de Fe y Mn en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado).....	144
Tabla 51.- Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la fracción materia orgánica en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado). ....	145
Tabla 52.- Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la fracción residual en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado). ....	146
Tabla 53.- Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para el agua muestreada de cada sitio. ND (No Detectado). ....	147

Tabla 54.- Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la digestión ácida de las plantas. ND (No Detectado). BC ( <i>Baccharis conferta</i> ), MM ( <i>Muhlenbergia macroura</i> ) y PP ( <i>Pinus Patula</i> ). .....	148
Tabla 55.-Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la digestión ácida de los hongos. AM ( <i>Amanita muscaria</i> ) y HL ( <i>Hypomyces lactifluorum</i> ). .....	149
Tabla 56.- Concentraciones obtenidas de los elementos traza en µg/kg, para la fracción intercambiable en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado). .....	150
Tabla 57.-Concentraciones obtenidas de los elementos traza en µg/kg, para la fracción hidróxidos de Fe y Mn en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado). .....	151
Tabla 58.-Concentraciones obtenidas de los elementos traza en µg/kg, para la fracción materia orgánica en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado). .....	152
Tabla 59.-Concentraciones obtenidas de los elementos traza en µg/kg, para la fracción residual en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado). .....	153
Tabla 60.- Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en µg/kg, para el agua muestreada de cada sitio. ND (No Detectado). .....	154
Tabla 61.- Concentraciones obtenidas de los elementos traza en µg/kg, para la digestión ácida de las plantas. ND (No Detectado). BC ( <i>Baccharis conferta</i> ), MM ( <i>Muhlenbergia macroura</i> ) y PP ( <i>Pinus Patula</i> ). .....	155
Tabla 62.- Concentraciones obtenidas de los elementos traza en µg/kg, para la digestión ácida de los hongos. ND (No Detectado). AM ( <i>Amanita muscaria</i> ) y HL ( <i>Hypomyces lactifluorum</i> ). .....	156

## Capítulo 1. Introducción

---

Los sistemas hidrotermales representan un gran interés por su gran potencial de generación de energía eléctrica sin altas concentraciones de CO<sub>2</sub> como los combustibles fósiles (Dickson y Fanelli, 2004) y han sido estudiados desde diversas disciplinas como geología y diversas ingenierías para implementar formas de obtención de energía eléctrica o térmica.

El presente trabajo es un estudio basado en los principios de la geoquímica ambiental, para responder interrogantes con respecto a los diversos procesos que ocurren dentro de estos sistemas, tomando en cuenta que las aguas ácidas son generadas a través de la interacción de gases de origen geotérmico como el CO<sub>2</sub>, el SO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S en el agua superficial (Santoyo y Barragan, 2010), así como los posibles procesos de transporte de elementos químicos inorgánicos potencialmente tóxicos entre las matrices ambientales de suelo, agua y vegetación (Santoyo y Barragan, 2010).

Este trabajo se desarrolló en un área de 150 km<sup>2</sup>, misma que fue concesionada a la CFE (Comisión Federal de Electricidad) en el año 2015, para realizar actividades de exploración geotérmica. Esta zona está ubicada en el estado de Puebla, México y se le denominó el sistema hidrotermal de Aocolco, el cual es parte del sistema del complejo volcánico de la caldera Tulancingo-Aocolco formando parte de la Faja Volcánica Transmexicana.

Las poblaciones humanas de la zona, históricamente se han dedicado a la agricultura y a la crianza de ganado ovino principalmente. Pero a su vez el bosque de pino de los alrededores es parte de su vida, recolectan madera para mantener calientes los hogares y cocinar, consumen las plantas locales y los hongos y utilizan el agua superficial y subterránea de los alrededores para su consumo y las actividades cotidianas.

Se han realizado algunos estudios de naturaleza geoquímica (Peiffer et al., 2014; Quinto et al., 1995), pero ninguno ha combinado las tres matrices ambientales, el suelo, agua y la vegetación para la identificación de procesos de transporte de los elementos químicos inorgánicos potencialmente tóxicos y si existe alguna influencia del sistema hidrotermal.

## 1.1. Antecedentes

El sistema hidrotermal de Aocolco es un sistema geotérmico oculto ubicado en el Cinturón Volcánico Mexicano que se ha caracterizado por una alteración hidrotermal argílica, aguas superficiales frías con fluidos ácidos, emisiones de gases y temperaturas superficiales entre 10 y 26 °C (López Hernández, 2009; Sosa-Ceballos et al., 2018a)

Se realizó un programa de prospección temprana llevado a cabo por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México basado en la perforación de pozos exploratorios (EAC-1 y EAC-2). El registro de temperaturas de fondo de pozo de unos 300 °C a 2 km de profundidad, indica un gradiente geotérmico anómalo de ~150 °C/km. (López Hernández, 2009; Sosa-Ceballos et al., 2018a).

Peiffer y coautores, (2014) realizaron un estudio de naturaleza geoquímica para confirmar la clasificación hidrogeoquímica de algunas de las fuentes de agua y las emanaciones de gas, en donde se encontró que las aguas son de tipo sulfatadas ácidas para algunas aguas superficiales frías aguas bicarbonatadas sódicas para algunas aguas superficiales frías situados en la periferia de la estructura de la caldera y aguas bicarbonatadas cálcicas para algunas aguas superficiales frías situados en el sur del sistema hidrotermal.

Quinto y coautores, (1995) presentan en lo referente a impacto ambiental, un estudio donde se detectó que las aguas procedentes de los afluentes de los Azufres y Alcaparrosa presentan concentraciones anómalas de elementos traza contaminantes, con niveles ligeramente superiores a los límites máximos establecidos por las normas técnicas ecológicas.

## 1.2. Justificación

En la actualidad existe un gran interés en los procesos hidrotermales que están sucediendo en la superficie de la corteza terrestre, ya que tienen un gran potencial de generación directa e indirecta de energía térmica y/o eléctrica y México no es la excepción, explorando este tipo de sistemas.

La generación de energía a través de la geotermia, es un tipo de energía limpia y alternativa, incluso renovable (Dickson y Fanelli, 2004), sin embargo, al tratarse de una actividad antropogénica no está exenta de generar cierto impacto ambiental.

Por ello, es importante realizar estudios de tipo geoquímico ambiental para saber cuáles son los procesos que están ocurriendo en cuanto al transporte de elementos químicos de importancia ambiental en agua, suelo y vegetación y que tipos de procesos ocurren en las zonas exploradas antes de que el sitio se comience a aprovechar para la generación de energía eléctrica y/o aplicaciones directas. Así se podrá tener una línea base ambiental de la zona, que servirá como *estatus quo* para posteriores monitoreos de la zona, en caso de que un campo geotermoeléctrico o que los usos directos del calor geotérmico sean desarrollados.

A su vez, la humanidad se encuentra en un momento particular en el que se está buscando el aprovechamiento de los recursos naturales de una manera sostenible, minimizando el impacto ambiental. Para ello, la generación de conocimiento científico en este campo es de primordial importancia para determinar los posibles efectos ambientales que se tendrían con este tipo de energía.

### **1.3. Hipótesis**

Los minerales que conforman el suelo al reaccionar con el agua acidificada por los gases de origen geotérmico se van disolviendo y pasan a ser parte de la carga iónica del agua. Dichos elementos pueden quedarse en el suelo o ser absorbidos por las plantas.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Investigar la correlación entre los elementos químicos inorgánicos de importancia ambiental presentes en las diferentes fases del suelo con su presencia en forma disuelta en el agua y en la vegetación circundante.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la concentración de los elementos químicos inorgánicos de importancia ambiental en las fases intercambiable, óxidos de hierro y manganeso, materia orgánica o fase mineral de los suelos de la zona de exploración geotérmica de Aocolco, Puebla.
- Determinar la concentración de los elementos químicos inorgánicos de importancia ambiental presentes en la vegetación circundante de los sitios de muestreo de suelo.
- Correlacionar las concentraciones de las fases del suelo con las concentraciones presentes en el agua cercana.
- Correlacionar las concentraciones presentes en las fases del suelo con las concentraciones presentes en la vegetación circundante.
- Identificar procesos de transporte en las tres matrices ambientales.

## Capítulo 2. Marco teórico

---

En el presente capítulo se realiza una revisión de los diversos conceptos y teorías que servirán como introducción al lector y a su vez enunciar los procesos, mecanismos y fenómenos que se utilizarán como sustento durante la discusión y de los argumentos principales de esta tesis.

### 2.1. Geoquímica ambiental

Es una ciencia que trata de identificar y entender los procesos ocurridos dentro de los ambientes desde una mirada integral apoyándose de otras ciencias como la química, la biología y la física para descifrar problemas ambientales (Eby, 2016).

Según Siegel (2002), la geoquímica ambiental es la disciplina que usa la química de los sólidos, líquidos, gases y formas de vida contenidos en la Tierra para evaluar los impactos de la contaminación por especies químicas o elementos que son de importancia ambiental en los ecosistemas de nuestro planeta. Integrando las condiciones físicas, químicas y biológicas de un entorno, como la temperatura el estado de la materia, la acidez (pH), potencial de oxidación-reducción, actividad bacteriana, y demanda biológica de oxígeno (DBO).

Estos y otros factores influyen en la movilización, dispersión, deposición, distribución, y concentración de metales/metaloides potencialmente tóxicos que pueden perjudicar la salud de los organismos de un ecosistema (Siegel, 2002).

### 2.2. Elementos químicos inorgánicos de importancia ambiental

La gama de elementos químicos analizados en los proyectos medioambientales incluye elementos radiactivos, compuestos orgánicos, organometálicos, metales pesados, metaloides y sus especies químicas, entre otros.

Esta tesis se enfoca a los elementos químicos inorgánicos de importancia ambiental que se encuentran catalogados por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020), elementos mayoritarios como: Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, S y elementos traza como: As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, V, U y Zn.

Los elementos traza que se consideran en este trabajo, son elementos químicos que derivan del intemperismo de las rocas o son introducidos a la atmósfera y/o la hidrósfera por las actividades humanas. Según Drever (1988), la presencia de estos elementos y sus diferentes especies químicas potencialmente depende de:

- a). Los minerales de los que provienen
- b). La intensidad del intemperismo al que esté sujeta la fuente
- c). Algunas actividades humanas

Pueden estar presentes en elementos altamente resistentes al intemperismo como el zirconio o apatito, a su vez pueden estar en depósitos de importancia económica como los del oro, la plata, el cobre, entre otros. También fluidos hidrotermales contenidos en alguna cámara magmática en forma de sulfuros, que al descomponerse liberan los elementos traza contenidos en ellos (Drever, 1988).

La actividad humana como la quema de combustibles fósiles, la minería, entre otros, puede ser fuente de estos elementos. Cuando se queman los combustibles fósiles los elementos traza se liberan a la atmósfera. Cuando las rocas son trituradas y tratadas químicamente para la obtención de los elementos que busca la minería, los residuos pueden contener elementos traza y moverse por ríos y agua subterránea mediante la lluvia y la escorrentía. A su vez, algunas industrias en sus desechos liberan estos elementos, ya sea a la atmósfera y/o a la hidrósfera (Drever, 1988).

### **2.3. Sistemas hidrotermales**

Los sistemas hidrotermales son un conjunto de procesos que redistribuyen la energía y la masa en respuesta a la circulación del agua en estado líquido. Estos sistemas están activos hoy en día dentro de las placas continentales y oceánicas; algunos de estos que ya no están activos conforman un registro amplio de la geología del planeta. A través de la historia de la Tierra han servido como amortiguadores para estabilizar las condiciones de perturbación tanto físicas como químicas en la corteza a través de los fluidos geotérmicos (Norton, 1984).

El origen del agua que contiene los fluidos geotérmicos puede ser muy variada, puede provenir del agua meteórica, infiltrándose cientos de metros o algunos kilómetros a través de fallas o fracturas en el terreno u horizontes permeables del mismo. O bien, puede tratarse de agua que se quedó atrapada en los sedimentos (Nicholson K., 1993). Otras fuentes son agua que proviene del metamorfismo de las rocas (aguas metamórficas) o del magma (aguas juveniles) (Nicholson K., 1993).

El agua meteórica penetra la corteza terrestre a través de las zonas permeables, las fallas o fracturas, y circula a diferentes profundidades, se calienta y reacciona con las rocas circundantes, provocando que el agua suba por convección. En este punto el agua tiene alto contenido de cloro (alrededor de 1,000 a 10,000 mg/kg) y temperaturas de alrededor de 350°C. Estas aguas son denominadas como aguas geotérmicas cloruradas y de éstas se derivan todas las demás de manera directa o indirecta (Nicholson K., 1993).

Las aguas bicarbonatadas y bicarbonatadas-sulfatadas provienen de sistemas con un enriquecimiento en CO<sub>2</sub> y la condensación de éste en aguas subterráneas poco oxigenadas. Este tipo de guas son comunes en sistemas donde hay desgasificación del suelo. Por otro lado las aguas sulfatadas provienen de la disolución de H<sub>2</sub>S y SO<sub>2</sub> en el agua (Nicholson K., 1993).

Los sistemas hidrotermales pueden generarse por muchos tipos de perturbaciones en el terreno que están relacionados con anomalías térmicas inducidas por el magma las cuales son las más activas. Los sistemas hidrotermales probablemente sean los fenómenos más comunes que ocurren dentro de la corteza terrestre. Aunque los flujos de los fluidos geotérmicos afectan una gran extensión de la roca contenida en el terreno, desde el tope hasta la base de la corteza terrestre, generalmente no se reconocen a menos de que exista una perturbación en la superficie o que se realicen estudios sobre las capas del subsuelo (Norton L. D., 1984).

## **2.4. Transporte de elementos en el ambiente**

Los elementos químicos pueden ser movilizados por vectores físicos, químicos y biológicos. Los elementos se pueden mover en forma de iones (cationes y aniones) en una solución acuosa e incorporados a una fase sólida inorgánica mediante procesos de absorción y/o adsorción. Lo mismo sucede para las fases orgánicas sólidas (Siegel, 2002).

De este modo, los elementos químicos son transportados a los entornos de depósito en la Tierra o en las masas de agua, a través del agua, el viento y el hielo en los glaciares, ya sea en el drenaje superficial, las vías de flujo de los acuíferos, las corrientes de agua y atmosféricas impulsadas por el viento (Siegel R.F., 2002). Estos elementos químicos movilizados pueden ser transportados a otro entorno en concentraciones significativamente más altas que los niveles naturales encontrados en el entorno al que fueron movilizados. Si esto sucede pueden ser elementos que estarían disponibles para las formas de vida de dicho ambiente o formando nuevos minerales, dependiendo de las condiciones del entorno (Siegel R.F., 2002).

Uno de los principales fenómenos que deriva en el transporte de muchos elementos es la lluvia, siendo uno de los motores que mueve grandes cantidades de elementos. Cuando la lluvia cae al terreno ocurren diferentes procesos, una parte de ella se queda entre las hojas, otra se escurre al terreno por la superficie y otra parte se infiltra por el terreno (Drever, 1988).

Los principales procesos de transporte de elementos que contiene el agua que está presente en el suelo son:

Los movimientos de infiltración bajo el efecto de la gravedad denominado como percolación o drenaje, con movimientos descendentes o laterales a través del suelo. Teniendo en cuenta algunas propiedades del suelo como la permeabilidad o la velocidad de percolación que depende de la textura y de la estructura del suelo (López, 2000).

Los movimientos de difusión capilar no ligados a la gravedad sino, sobre todo, a diferencias de humedad entre dos puntos del suelo son otro tipo de transporte. Estos movimientos se pueden efectuar en todas direcciones y depende de la capacidad de retención del agua en los suelos (López, 2000).

## **2.5. Procesos de transporte entre suelo, agua y vegetación.**

En general, los procesos de transporte se pueden clasificar en dos tipos:

1. El transporte donde no existe ningún tipo de interacción con el medio por el cual se van transportando, como la advección, la difusión y la dispersión. La **advección**, es el arrastre de las sustancias contaminantes

por el agua, es el transporte más simple de las sustancias en un medio poroso. La **difusión** es el movimiento de los elementos donde se encuentran mayormente concentrados a sitios con menos concentración, este fenómeno no considera la porosidad del medio. La **dispersión** es provocada por el movimiento del flujo a través del medio poroso, donde las moléculas que encuentran un camino más tortuoso se retrasan, las que encuentran caminos más anchos avanzan rápidamente y las que circulan por el centro de los canales avanzan más rápido que las que circulan cerca de los granos (Sánchez San Román, 2012).

2. El transporte donde si ocurre algún tipo de interacción entre sustancias contenidas en el medio por donde se va transportando los elementos como absorción, adsorción, sorción, precipitación/disolución, intercambio iónico, biodegradación, reacciones de óxido-reducción, etc. (Sánchez San Román, 2012). La **absorción**, es un fenómeno que implica la penetración de los elementos o compuestos en cuestión al interior de un sólido. La **adsorción** es la adherencia de un elemento en la superficie de un sólido, mientras que la **sorción** implica ambos procesos. La **precipitación/disolución** dependen de alcanzar el estado de saturación del elemento o compuesto en cuestión para que se cumpla el fenómeno (Sánchez San Román, 2012). El **intercambio iónico** es una reacción donde los iones móviles de un sólido se cambian por distintos iones de carga similar de la disolución (Nuffield Fundation, 1994). Por otro lado, la **biodegradación** involucra la digestión, asimilación y metabolización de los elementos o compuestos en cuestión. En muchas ocasiones en la biodegradación se transforman sustancias toxicas en sustancias de carácter menos tóxico, o bien las convierten en inocuas para el medio ambiente y las poblaciones humanas (Dulio Torres Rodríguez, 2003). Por ultimo las **reacciones redox** son interacciones entre los diversos elementos caracterizado por la pérdida o ganancia de electrones. La oxidación se distingue por un aumento en el número de oxidación y la reducción se caracteriza por la disminución del número de oxidación debido a la ganancia de electrones (Chang y Goldsbey, 2013) .

Estos procesos de transporte se presentan en el suelo y dependen de variables como el pH, la conductividad eléctrica, el potencial de reducción ( $E^\circ$ ), las condiciones de humedad del suelo, la temperatura, la cantidad de oxígeno disuelto en el agua y/o el suelo, y algunas variables físicas como la capacidad que tiene el suelo de retener agua; el punto de marchitez y la porosidad del suelo (López, 2000).

En las plantas, la forma en como toman las raíces los elementos que requieren del ambiente para crear su propio alimento está dictado por su propia anatomía, pero principalmente lo hacen por las raíces, siendo éstas un órgano especializado para el soporte y la absorción de iones inorgánicos que se encuentran en el suelo y en el agua que contiene el suelo (Robledo *et al.*, 2008).

La absorción de los diferentes elementos hacia la planta depende de la estructura de sus raíces y a su vez de la biodisponibilidad de los elementos. También depende de las condiciones físicas y químicas del suelo, además de factores biológicos que condicionan la solubilidad y especiación química de los elementos (De Cires, 2009). De manera general, los elementos indispensables para la planta son integrados mediante las raíces y son transportados a través del xilema hacia las partes superiores de la misma. Estando ahí, se realiza la fotosíntesis donde todos esos elementos son transformados en moléculas para su propio uso y después ocurre el fenómeno de translocación que es cuando estos productos de la fotosíntesis son transportados a otros tejidos superiores de las plantas (Reven *et al.*, 1992).

Los elementos o compuestos, después de ser transportados, llegan a los diferentes sitios de la planta donde pueden ser bioacumulados. La bioacumulación se define como un proceso activo en el que un individuo está tomando de su entorno algunos elementos o compuestos y también se define de manera estática cuando se refiere a la simple acumulación en los tejidos que componen al individuo. Ocurre cuando estos elementos después de ser transportados, llegan a los diferentes sitios de la planta donde pueden ser acumulados dependiendo de si son elementos hidrofílicos (afines con el agua) o lipofílicos (afines con los lípidos) pudiendo llegar a muchas partes de la planta (Streit, 1992).

Este proceso de bioacumulación y de transporte a través de las plantas es importante porque puede aumentar la persistencia de sustancias o elementos en los ecosistemas, ya que se fijan en los tejidos de los organismos en lugar de estar expuestos a la degradación directa de forma física, química o biológica en el ambiente (Streit, 1992).

Las plantas y animales al entrar en épocas de escasez de alimentos utilizan las reservas de su organismo y de esta forma pueden liberar esos elementos y pueden ser perjudiciales para el individuo en cuestión o siguiendo la cadena alimenticia, otros organismos pueden interactuar con dichas plantas e incorporarlas a su sistema por diferentes vías algunas de ellas son la oral, la cutánea, la aérea, entre otras (Streit, 1992).

Según la Organización Mundial de la Salud, la exposición prolongada a diversos elementos de importancia ambiental como el arsénico, a través del consumo de agua contaminada o comida preparada con esta y cultivos ricos en arsénico pueden causar intoxicación crónica causando efectos como lesiones cutáneas y cáncer de piel (OMS, 2018)

## 2.6. Especiación de elementos en el ambiente y extracción secuencial

Una gran parte de los estudios realizados sobre suelos y sedimentos se refieren a la concentración total de metales. El uso de esta concentración total, empleado como criterio de evaluación para la determinación de los efectos de contaminación por metales pesados significaría que todas las formas químicas en las que puede encontrarse un elemento causan o producen el mismo impacto sobre el medio ambiente, lo que claramente es insostenible (Vilar et al., 2003).

A su vez los diferentes elementos están inmersos dentro de un sistema reactivo gobernado por un conjunto de equilibrios que controlan las concentraciones de dichos elementos en la disolución del suelo por medio de reacciones redox, reacciones de intercambio catiónico y adsorción y diversos factores como la concentración acuosa, pH, potencial redox, temperatura del suelo, cantidad de sitios de sorción asociados a la fase sólida (relacionado con la textura del suelo), entre otros (Vilar et al., 2003).

Para obtener resultados más precisos se han propuesto metodologías como la extracción secuencial que están basadas en la solubilidad con un determinado extractante para cada fracción del suelo, basadas en diferentes parámetros como la disponibilidad para las plantas o determinado por el tamaño de partículas (Martínez y Rivero, 2005).

Para esta tesis se utilizó la metodología propuesta por Rauret et al., 2000, lo que permite separar el suelo en cuatro fracciones donde cada una de estas es tratada con diferentes disolventes y se va disminuyendo el pH por la dificultad de extracción de la misma:

La primera es la **fracción intercambiable**, donde se sabe que la composición iónica del agua puede afectar los procesos de sorción-desorción sobre los principales constituyentes del suelo (arcillas, óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso y ácidos húmicos) (Tessier et al., 1979a).

La segunda, **fracción unida a hidróxidos de hierro y manganeso**, se presenta como nódulos, concreciones, cemento entre partículas o simplemente como revestimiento de las mismas, siendo estos hidróxidos excelentes recolectores o sumideros de metales trazas y son termodinámicamente inestables en condiciones anóxicas (Tessier et al., 1979a).

La tercera, es la **fracción unida a materia orgánica**, los elementos traza pueden estar ligados a la materia orgánica de varias formas, presentes en organismos vivos, detritus, recubrimiento de partículas minerales,

entre otros. Las propiedades de complejación y peptización de la materia orgánica, especialmente en ácidos húmicos y fúlvicos, así como los procesos de bioacumulación de ciertos organismos están reconocidos como mecanismos que integran estos elementos. En condiciones de oxidación en las aguas naturales la materia orgánica puede degradarse y liberar metales traza solubles (Tessier et al., 1979a).

Por último, la **fracción residual**, después de eliminar las tres fracciones anteriores el residual debería contener principalmente minerales primarios y secundarios que pueden contener metales traza dentro de su estructura cristalina; no se esperan estos elementos en solución durante un periodo de tiempo razonable en condiciones que se dan normalmente en la naturaleza (Tessier et al., 1979a).

## Capítulo 3. Zona de estudio

En el presente capítulo se hace una descripción de varios aspectos relacionados con la zona de estudio de la presente tesis, como la localización, la geología, el clima, el tipo de suelo, la hidrología, la geoquímica, entre otros.

### 3.1. Localización

La zona de exploración geotérmica de Acozulco, es parte del complejo volcánico de Tulancingo-Acozulco, el cual se localiza en el centro oriente de México al sureste de Tulancingo en los límites de los estados de Hidalgo y Puebla formando parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT).

Desde el año 2015 la Secretaría de Energía nombró a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) como permisionario para realizar actividades de exploración de recursos geotérmicos en el área geotérmica denominada Acozulco, Puebla, en donde se delimitó un polígono de 150 km<sup>2</sup> (SENER, 2015). Siendo ésta la zona de estudio contemplada para esta investigación (Ver Figura 1).

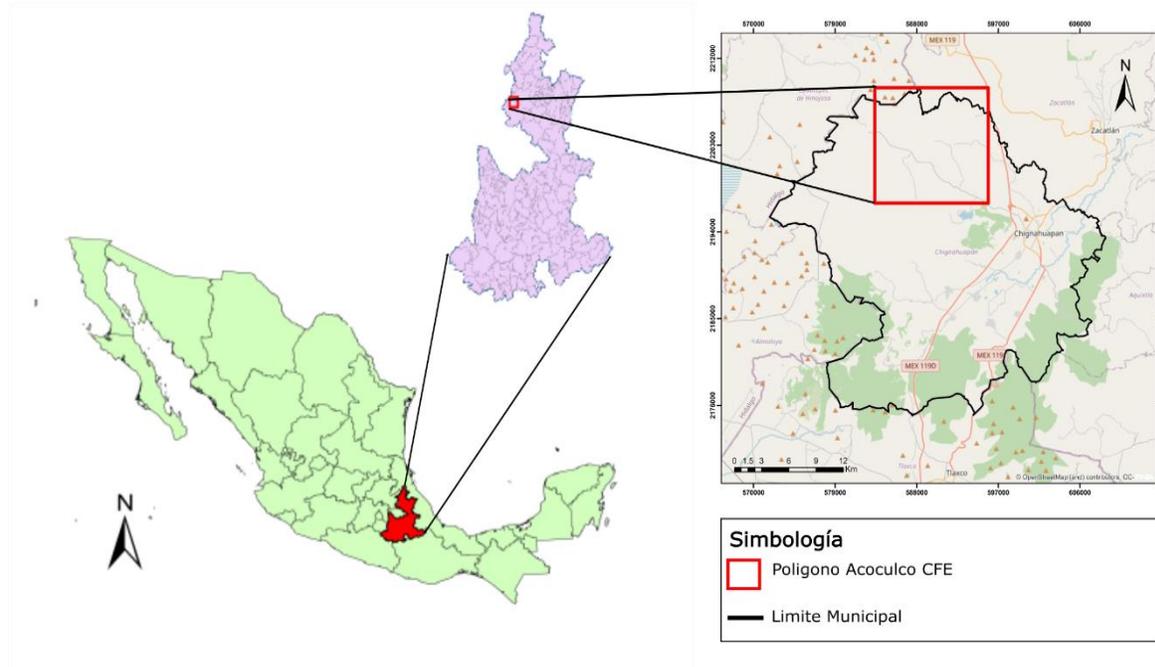


Figura 1.- Mapa de la localización del área de exploración geotérmica de Acozulco, Puebla.

### 3.2. Geología y contexto hidrotermal

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), se extiende desde Nayarit en el oeste hasta Veracruz en el este y constituye un arco volcánico continental relacionado con la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la placa de Norteamérica a lo largo de la trinchera Mesoamericana. Se divide en tres sectores, occidental, central y oriental que presenta diferencias significativas en lo que respecta al tipo de vulcanismo y su composición química (Ferrari, 2000).

Este trabajo se enfoca en el sector oriental que es donde se ubica el complejo volcánico Tulancingo-Acozulco, en particular la zona de Acozulco.

El sector oriental del sistema está emplazado en grandes estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición andesítica a riolítica y una pequeña parte asociada a volcanes monogenéticos de composición basáltica y numerosos sistemas hidrotermales (Ferrari, 2000).

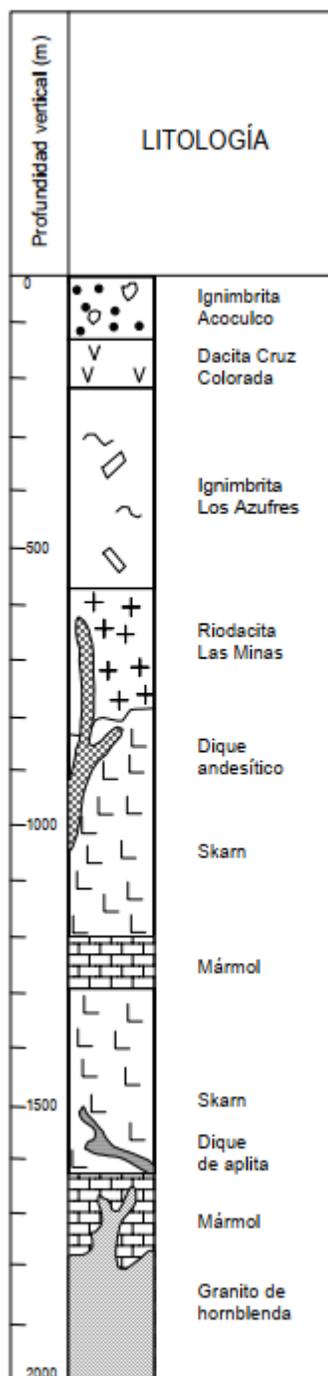
La actividad volcánica del complejo ocurrió en cuatro etapas principales. La más antigua corresponde al vulcanismo de Pachuca-Apan-Cerro Grande, la segunda relacionada con la caldera de Tulancingo de 3.0 a 2.7 Ma con 32 km de diámetro, la tercera asociada a la caldera de Acozulco de 1.7 Ma a 0.24 Ma con 18 km de diámetro; y una cuarta etapa incluye el vulcanismo periférico de tipo máfico Tezontepec-Apan 1.8 Ma a 0.2 Ma (Gutiérrez & González, 2016; López-Hernández, 2009).

Dentro de los esfuerzos que ha realizado la CFE para la exploración de esta zona han sido la perforación de dos pozos exploratorios, EAC1 y EAC2, con el objetivo de recopilar datos en torno a la geología del lugar, la temperatura y la permeabilidad del sitio.

El pozo EAC1 (*Ver Figura 2*), se encuentra cercano al sitio de los Azufres, se perforó hasta llegar a una profundidad de 2000 m y se encontraron tres unidades litológicas. La más somera que llega hasta los 790 m de profundidad consiste en rocas volcánicas del Plioceno al Cuaternario, incluyen riodacita e ignimbrita, esta unidad presenta un sellado intenso por los fluidos hidrotermales que van por las fracturas y fallas de la zona (López-Hernández et al., 2009).

La segunda unidad litológica que comprende de los 870 m hasta los 1660 m, conformada por una columna de roca metamórfica, compuesta principalmente por skarn con dos zonas delgadas de mármol, con un metamorfismo local de las rocas presentes de la Sierra Madre Oriental ocasionado por el granito, siendo

éste la tercera unidad litológica más profunda que va de los 1660 m a los 2000 m de profundidad (López-Hernández et al., 2009).



**Figura 2.-** Columna litológica del pozo EAC1, tomada de (López-Hernández, 2009)

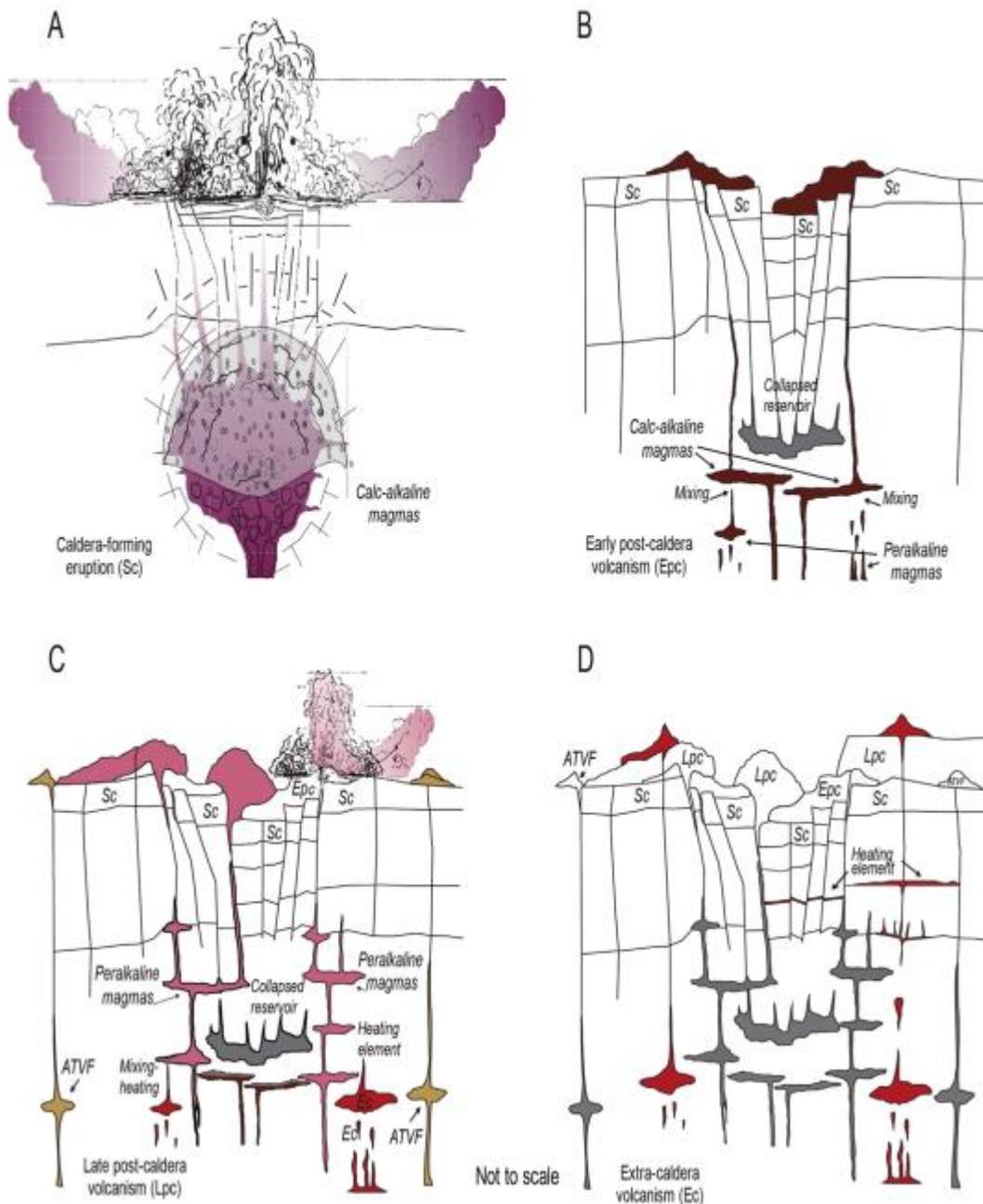
Se encuentran en el sitio dos principales fallas que van de NO-SE y NE-SO, con unas zonas de permeabilidad que propicia un camino para los fluidos hidrotermales. En la superficie, estas fallas se ven interferidas por la alineación de los conos volcánicos (Geyne *et al.*, 1963).

En cuanto a la baja permeabilidad del sitio, se debe a la baja porosidad del skarn y el granito que se encuentran en la zona. Probablemente en la época de actividad, los fluidos hidrotermales estaban restringidos a la zona de fallas, llegando a los depósitos subyacentes y moviéndose lateralmente formando una capa sello muy eficaz. Esta capa ha persistido debido a que no han ocurrido eventos importantes tectónicos o magmáticos que puedan haber reactivado las fallas.

La geología de Acozulco ha sido estudiada por diversos autores como De la Cruz y Castillo-Hernández, (1986), los cuales sugieren que la actividad hidrotermal proviene de las zonas magmáticas.

Se realizó un programa de exploración dentro de la zona de Acozulco por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México, donde llamó la atención esta área en particular por la presencia de alteraciones hidrotermales superficiales, aguas superficiales ácidas frías y desgasificación de algunas zonas donde en ocasiones mataba algunos animales al acercarse a la zona (Romero y Hernández, 1981).

Por otro lado, Sosa y colaboradores en el año 2018 estudiaron el sistema hidrotermal de Acozulco y concluyeron que es resultado de la erupción de la ignimbrita de Acozulco, la cual, produjo un colapso del reservorio que modificó el campo de tensiones local. El colapso del reservorio dificultó el ascenso del material magmático a través del sistema de tuberías. Los diversos tipos de magmas tanto calco-alcalinos como per-alcalinos genéticamente no relacionados que se encontraban en el sitio, fluyeron horizontalmente formando nuevos reservorios y posteriormente de forma vertical formando domos en superficie. Al final del agotamiento del magma calco-alcalino, predominó el magma per-alcalino y el sistema de esfuerzos se modificó, promoviendo el ascenso y estancamiento del material por debajo del centro de la estructura de la caldera, otros más se estancaron a poca profundidad y cristalizaron y otros, llegaron a superficie lo cual forma un enjambre de sills y diques poco profundos y domos en superficie (Ver Figura 3) (Sosa-Ceballos *et al.*, 2018a).



**Figura 3.-** Sistema hidrotermal de la caldera Acozul, Puebla. Tomada de Sosa-Ceballos et. al., 2018.

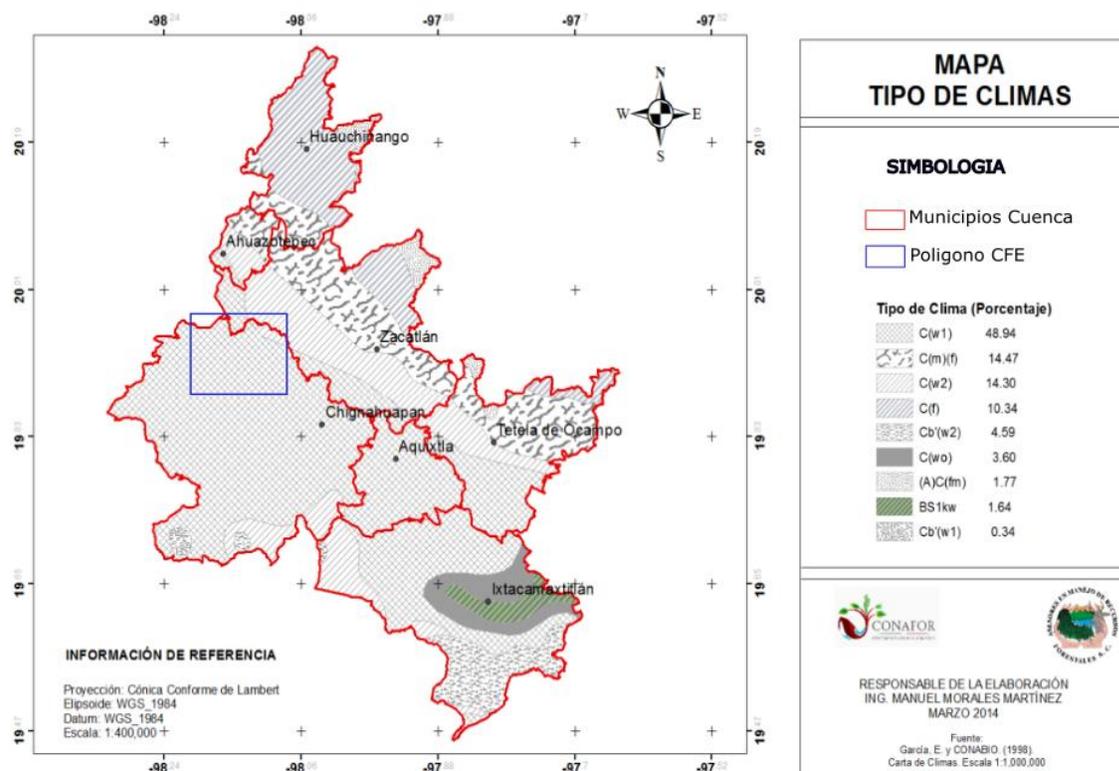
### 3.3. Clima

La variedad climática de la región se debe a factores como latitud, altitud, características del relieve orográfico, la distribución de la región respecto a la distancia al mar y a las diferentes presiones atmosféricas a las que está sujeta.

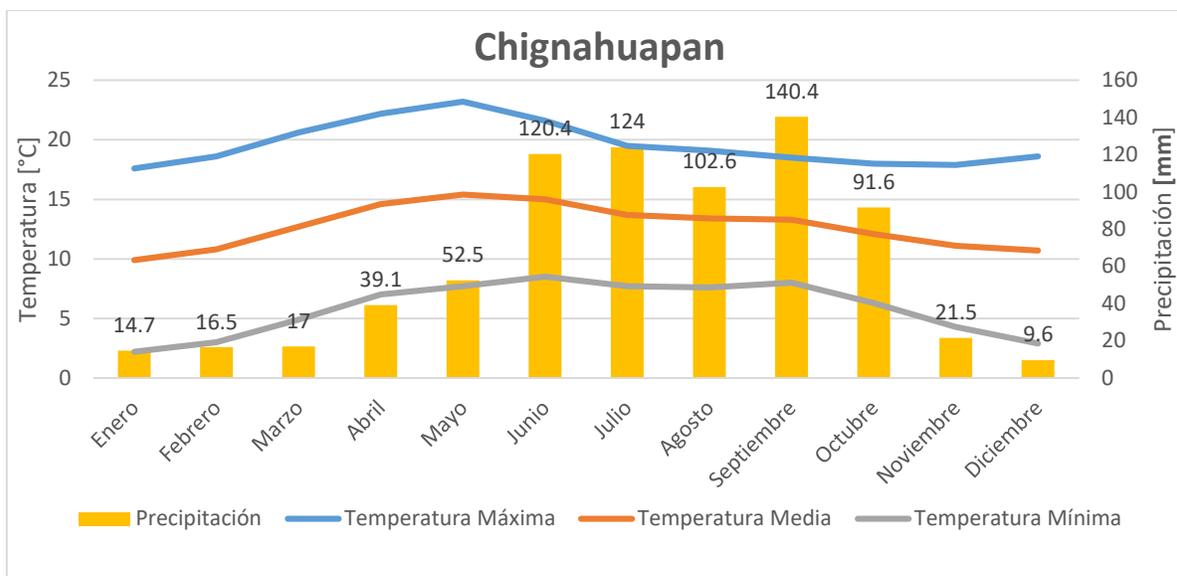
La zona del polígono se encuentra dentro del municipio de Chignahuapan donde predomina un clima templado subhúmedo con lluvias en verano ( $C(w_1)$ ), dentro de la clasificación de Köppen) (Morales M., 2014) (Ver Figura 4). La temperatura media anual está entre 12 y 18 °C y la precipitación total anual varía entre 600 a 1000 mm con lluvias en verano.

A partir de los datos meteorológicos tomados entre 1981 y 2010, de la estación Chignahuapan a 2,291 msnm (Ver Figura 5), la cual se encuentra dentro de la zona de estudio, se sabe que la temperatura media anual del sitio es de 12.7 °C y el promedio de precipitación media anual es de 749.9 mm.

El climatograma de la estación muestra que la temporada de lluvias comienza en el mes de junio y termina en el mes de octubre, acumulándose el 77% de la precipitación total anual. En el mes de noviembre, se registra un descenso abrupto de la precipitación, extendiéndose la época de secas hasta el mes de mayo.



**Figura 4.-** Mapa de la región Chignahuapan-Zacatlán donde se muestran los diversos climas de acuerdo con la clasificación de Köppen (Modificada de Morales, 2014).



**Figura 5.-** Variación de la precipitación mensual media (barras amarillas), temperaturas máximas (línea azul), mínimas (línea gris) y media mensual (línea naranja), registradas en la estación meteorológica Chignahuapan. Datos obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (1981-2010).

### 3.4. Suelo

En la superficie de la región, de acuerdo con la ubicación y clasificación utilizada en la carta edafológica editada por INEGI, se representa el tipo de suelo de cada zona. En el caso de la zona de estudio (*Ver Figura 6*), el tipo de suelo encontrado es Andosol, en particular Andosol húmico y Andosol órtico, ambos con una textura media. También se encuentran Luvisoles y Feozem (Morales, 2014).

### 3.5. Hidrología

La caldera de Aocolco en la parte oeste se caracteriza por presentar una morfología cómica joven, cortada por un patrón de drenaje radial y al este se forma un patrón de drenaje subparalelo rectangular, siendo un reflejo de las rocas plegadas del basamento en esta localidad (De la Cruz y Castillo-Hernández, 1986).

Dentro de la zona existen pocos estudios hidrológicos, sin embargo, López-Hernández (2009), reporta durante su trabajo en campo una precipitación de 1000 mm en la zona de mayor elevación y 600 mm cerca de las planicies circunvecinas. Esto indica que la recarga del sistema hidrotermal es potencialmente factible a partir de la percolación del agua meteórica a través de las fracturas que no han sido selladas por la alteración hidrotermal hacia los flancos de la zona.

La zona de estudio se encuentra dentro de dos cuencas en la zona oeste se encuentra la del Pánuco, que tiene una superficie de 2819.36 km<sup>2</sup> dentro de la cuenca R. Moctezuma. En la sección este se encuentra la cuenca Laxaxalpan con una superficie de 1608.16 km<sup>2</sup>. La primera entra en la categoría de “grande” y la segunda en “intermedio-grande” según la clasificación de Campos-Aranda (1992) (Verdugo, 2017).

Las cuencas de esta zona son cuencas maduras o de pie de montaña, lo que significa que conforme aumenta el área acumulada, la velocidad disminuye a lo largo de las cuencas, las cuencas tienen velocidades similares cuenca arriba y cuenca abajo (Verdugo, 2017).

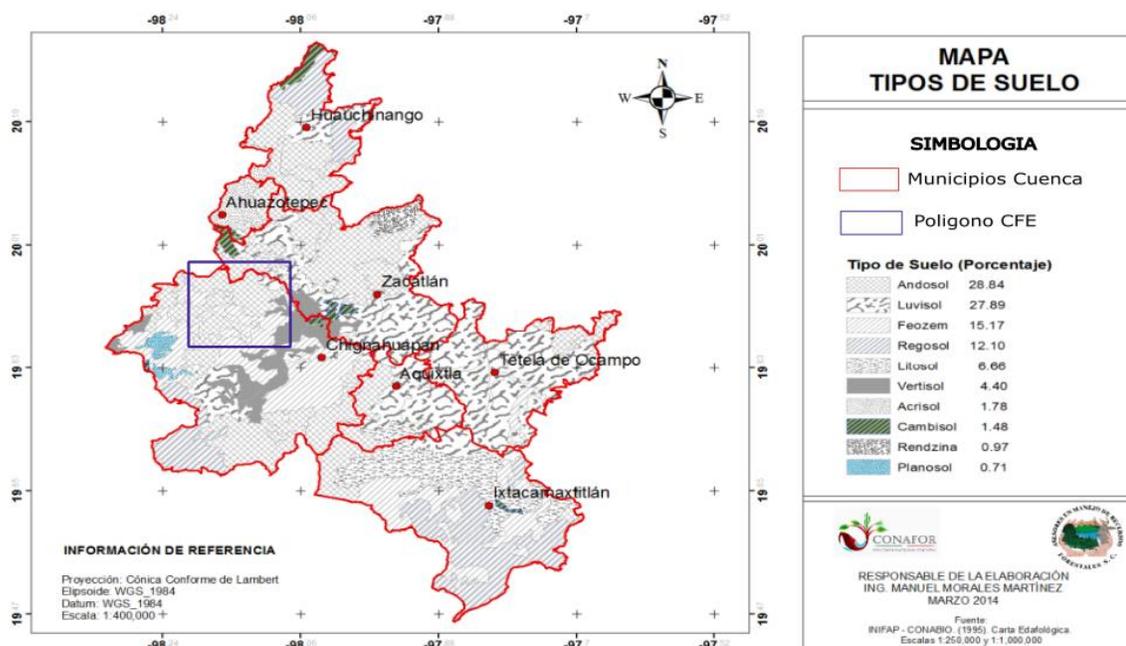


Figura 6.- Mapa de suelos de la región Chignahuapan-Zacatlán (Modificada de Morales, 2014).

### 3.6. Geoquímica

Quinto y coautores (1995), realizaron un estudio geoquímico de las aguas termales en la zona geotérmica de la caldera de Acoculco y su evaluación desde un punto de vista de impacto ambiental, donde se muestreó una serie de aguas superficiales en siete localidades pertenecientes a los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla. El estudio indicó presencia de aguas de tipo bicarbonatadas sódicas, bicarbonatadas cálcicas y aguas sulfatadas cálcicas; reportando a su vez, concentraciones anómalas de elementos trazas contaminantes en la zona de Los Azufres y La Alcaparrosa, ligeramente por encima de las normas técnicas ecológicas, lo anterior puede ser un riesgo a las poblaciones que están en contacto

directo con este tipo de aguas, pero no se tiene reporte de concentraciones de elementos químicos en suelo o vegetación de la zona.

De acuerdo con Verdugo (2017), los valores de isótopos estables en muestras de agua superficial de Acoculco en los años 2015 y 2016 el deuterio ( $^2\text{H}$ ) va de -77.36 a -7.98 ‰ y para oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ ) va desde -11.29 a 0.94 en la época de lluvias y de secas, respectivamente. Lo que es un indicador de que las aguas con influencia hidrotermal, son principalmente de origen meteórico y no subterráneo. A su vez Verdugo (2017) encuentra valores de pH que van desde los 3.8 hasta los 8.6 en algunos casos.

Verdugo (2017) analizó, concentraciones de nitratos en las mismas aguas, encontrando valores desde 10.5 a 57mg/L que superan la NOM-127-SSA1-1994 que señala un límite de 10 mg/L. Los valores encontrados de nitritos tienen valores de 0.043 mg/L, representando valores muy pequeños, comparados con los límites impuestos por la OMS (2006) y CONAGUA (DOF, 1994), que son de 3 y 1 mg/L respectivamente. Los valores reportados de cloruros y fosfatos también se encuentran por debajo de sus respectivos límites permisivos. Sin embargo, los sulfatos se encuentran por arriba de los 400 ppm permitidos para el agua potable, con un valor de 540 ppm, lo que podría representar la interacción entre los gases hidrotermales, las rocas y el agua (Collao et al., 2002). Todos los compuestos mencionados anteriormente son indicadores de la calidad del agua tanto para consumo y riego de cultivos, por eso es importante realizar una evaluación de estos parámetros en el sitio (Bolaños-Alfaro et al., 2017).

Peiffer y colaboradores (2014) reportan que las aguas que descargan dentro y fuera de la caldera de Acoculco se originan en aguas subterráneas poco profundas en las que se condensa gases geotérmicos ricos en  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{CO}_2$ , esto puede ocasionar aguas ácidas o híper ácidas, propiciando que elementos metálicos de carácter tóxico se encuentren como iones y puedan ser transportados con facilidad hacia las poblaciones humanas aledañas.

A través de la anterior revisión bibliográfica, se propuso el siguiente muestreo y la metodología para responder algunas de las interrogantes que se habían generado en trabajos anteriores como los diversos procesos de transporte de elementos químicos de importancia ambiental.

## Capítulo 4.- Metodología

---

En el presente capítulo se realiza un resumen breve de metodología utilizada en esta investigación. Dado que se trabajó con tres matrices ambientales, se especifica cuáles fueron los métodos utilizados para cada una de éstas y los diversos materiales de referencia utilizados.

### 4.1. Inventario y estrategias de muestreo

Al momento de comenzar esta investigación ya se contaba con un inventario de muestras de suelo, agua y vegetación. Se trabajó con diferentes muestreos realizados a lo largo de los años 2018 y 2019 en la temporada de secas y lluvias.

Se realizó de esta manera dado que esta tesis tuvo lugar durante el periodo de la cuarentena ocasionada por la pandemia del virus SARS-COV-2 y hubo muchas restricciones de movilidad durante ese periodo, lo que impidió realizar un muestreo para ese año.

Se trabajó con cuatro muestras de agua superficial, tres de las cuales están influenciadas por el hidrotermalismo natural de la zona (*Ver Tabla 1*).

**Tabla 1.-** Muestras de agua colectadas y procesadas, de la zona de Aocolco. \*sistemas hidrotermales.

Tipo de muestra	Sitio	Colecta (etiqueta)
Agua	<b>AC7*</b> Los Azufres	<b>15AC1</b>
	<b>AC9*</b> Alcaparrosa	<b>19AC20</b>
	AC10 Ocojala	18AC30
	<b>AC11*</b> El Tehuacán	<b>18AC12</b>

Se trabajaron 10 muestras de suelo a lo largo de toda la zona de estudio (*Ver Tabla 2*).

Se trabajaron diversas especies de plantas y hongos recolectadas a lo largo de la zona de estudio (*Ver Tabla 3*).

**Tabla 2.-** Muestras de suelo recolectadas y procesadas mediante extracción secuencial, de la zona de Acozulco, Puebla. \*sistemas hidrotermales.

Tipo de muestra	Sitio		Colecta (etiqueta)
Suelo	AC1	San José Corral Blanco	B19AC-12
	AC2	El Eco	B19AC-13
			B19AC-14
	AC3	La Gloria	B19AC-19
	AC4	Cruz Colorada	B19AC-17
			B19AC-18
	AC5	Terrerillos	B19AC-20
	AC6	La Cañada	B19AC-15
	<b>AC7*</b>	<b>Los Azufres</b>	<b>A15AC1</b>
	AC8	Cañada de Piedras	B19AC-16
	<b>AC9*</b>	<b>Alcaparrosa</b>	<b>A18AC08a</b>
<b>AC11*</b>	<b>El Tehuacán</b>	<b>A18AC31</b>	

**Tabla 3.-** Muestras de vegetación y hongos recolectadas y procesadas de la zona de Acozulco, Puebla. \*muestreados en sistemas hidrotermales.

Tipo de muestra	Sitio		Colecta (etiqueta)	Especie
Planta	AC1	San José Corral Blanco	B19ACP12-01	<i>Baccharis conferta</i>
			B19ACP13-01	<i>Baccharis conferta</i>
	AC2	El Eco	B19ACP13-02	<i>Muhlenbergia macroura</i>
			B19ACP14-01	<i>Muhlenbergia macroura</i>
			B19ACP14-02	<i>Pinus patula</i>
	AC6	La Cañada	B19ACP15-01	<i>Baccharis conferta</i>
			B19ACP15-02	<i>Pinus patula</i>
			B19ACP15-03	<i>Muhlenbergia macroura</i>
	AC8	Cañada de Piedras	B19ACP16-01	<i>Baccharis conferta</i>
	Hongo	AC8	Cañada de Piedras	Z2P1
Z2P2				<i>Amanita muscaria</i>
AC9*		Alcaparrosa	Z4P1	<i>Boletus edulis</i>
			Z4P2	<i>Amanita muscaria</i>
			Z4P3	<i>Pleurotus sp</i>
			Z4P4	<i>Hydnum sp</i>
AC10		Ocojala	Z1P2	<i>Pleurotus sp</i>

En el siguiente mapa (Ver Figura 7), se presenta la distribución espacial del muestreo de agua, suelo y vegetación considerada para esta investigación.

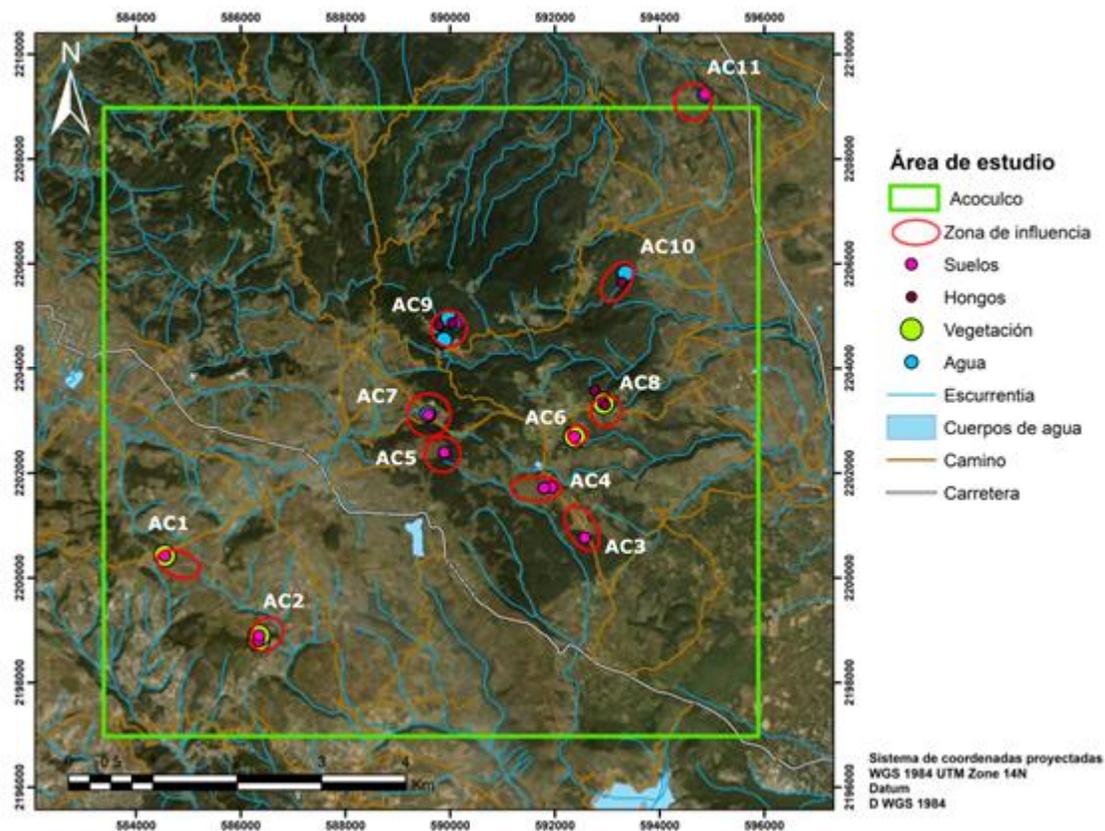


Figura 7.- Mapa de muestreo en la zona Acozulco, Puebla.

## Suelo

En cada sitio se muestrearon de 1 a 2 puntos (Ver Tabla 2 y Figura 7) con una profundidad máxima de 80 cm, dependiendo del sitio. También se tiene la descripción de las características macromorfológicas por horizontes, el análisis granulométrico y mediciones de pH, conductividad eléctrica y carbón orgánico total por horizonte.

Se cuenta también con la descripción de evidencias de procesos hídricos de erosión *in situ* y la medición de la capacidad de infiltración del suelo.

Para muestras del suelo se tomaron las siguientes variables en el campo: % de Rocas, % humedad *in situ*, % humedad, raíces, Tasa de infiltración, densidad aparente y temperatura.

Las variables: pH, conductividad eléctrica y textura (método de Boyoucos), se midieron en el laboratorio de Edafología de la Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El carbono orgánico (%), se analizó en el Laboratorio de fertilidad de suelos y química Ambiental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco Edo. Méx.

## **Agua**

Para las muestras de agua analizadas, se cuenta con los resultados de parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (TDS) y oxígeno disuelto); aniones disueltos determinados en campo por colorimetría (nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )). Elementos mayores y trazas, medidos con técnicas de ICP-OES e ICP-MS en el Laboratorio Analítico de Recursos Naturales (NRAL) y Laboratorio de Suelos, Agua, Aire y Plantas ultra limpio y libre de metales (SWAMP) de la Universidad de Alberta en Canadá, respectivamente.

Las muestras de agua de cada sitio de recolección fueron filtradas con un filtro de celulosa de tamaño de poro de  $0.2 \mu\text{m}$  y se acidificaron un 2% con ácido nítrico ultrapuro ( $\text{HNO}_3$ ) y después se refrigeraron hasta su análisis.

## **Vegetación**

Se tomaron dos criterios para el muestreo de las especies vegetales; el primero, que las especies a muestrear estuvieran presentes con una cobertura mayor al 5% del área muestreada y el segundo criterio que fueran especies con una cobertura mayor al 10% en la zona de estudio.

En campo, se seleccionaron los sitios de colecta a partir de los puntos de muestreo correspondientes a los estudios de erosión (B19Ac) del PT9 en el proyecto GEMex los cuales fueron determinados a partir de unidades geopedológicas y ambientales.

Se colectaron las raíces, hojas y tallo de las diferentes especies, utilizando pinzas de jardinería, se limpió la zona del corte, se prensó el material vegetal y se guardó en bolsas plásticas y se mantuvieron en refrigeración durante el transporte y bajo congelación para su posterior análisis. En la tabla 3 se presenta el listado de muestras de vegetación que se utilizaron para este estudio.

## 4.2. Preparación y procesamiento de muestras

### Suelo

Las muestras de suelo fueron preparadas para el proceso de extracción secuencial en el laboratorio de análisis de rocas en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y el Centro de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) y analizadas por ICP-MS e ICP-OES, en los NRAL y SWAMP del departamento de Recursos Renovables, de la Facultad de Agricultura, Vida y Ciencias Ambientales de la Universidad de Alberta, en Canadá.

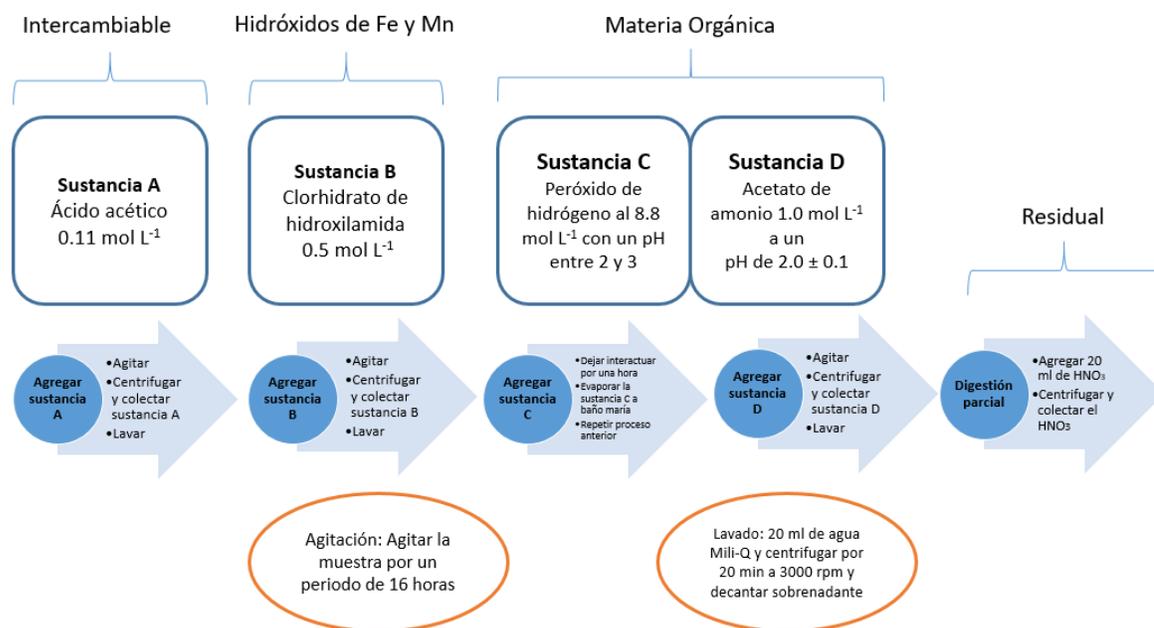
Para la preparación del suelo se pesaron 10 g de cada una de las muestras, se les hizo pasar un rodillo para separar completamente los terrones que se pudieron formar, se separaron con un tamiz de 2 mm y para el análisis se guardó la fracción menor.

Estas muestras se llevaron a un congelador, dejándose durante un día para después meterlas en viales y procesarlas en una liofilizadora, Labconco ConsoleFreeZone 12 L. Estas muestras se dejaron durante 72 horas para asegurar su completo secado en frío.

Posterior al secado, las muestras se llevaron un molino de disco vibratorio Retsch RS&NBSP 200 en contenedor de ágata a 700 rpm durante un minuto y medio para pulverizar completamente la muestra y se almacenaron en viales de plástico previamente lavados en una solución de 10% peso de HNO<sub>3</sub> ultrapuro para evitar contaminación.

Las muestras de suelo se trabajaron mediante la metodología de extracción secuencial. De la cual, se realizó una revisión bibliográfica y se concluyó que el mejor método para el tipo de suelo que se analizó es el propuesto por Rauret y colaboradores (2000) (*Ver Figura 8*).

Se trabajó con 1g de suelo de cada muestra previamente procesada, con materiales lavados en una solución de 10% peso de HNO<sub>3</sub> ultrapuro. Las preparaciones de las soluciones se realizaron con agua ultrapura o Milli-Q, dentro de una campana de extracción en cada uno de los 4 pasos descritos a continuación:



**Figura 8.-** Diagrama de flujo de la extracción secuencial (Rauret et al., 2000).

La digestión ácida se realizó con el horno de microondas MARS 6 a una temperatura de  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 15 minutos y se utilizó únicamente  $\text{HNO}_3$  ya que el  $\text{HCl}$  causa interferencias de análisis en el ICP-MS. Aunque se sabe que este ácido no garantiza la disolución de silicatos, no causa interferencias al analizar por ICP-MS y a condiciones ambientales es muy difícil la disolución de silicatos, por lo que no se consideraron relevantes en esta investigación (Hung *et al.*, 2004; Son *et al.*, 2019).

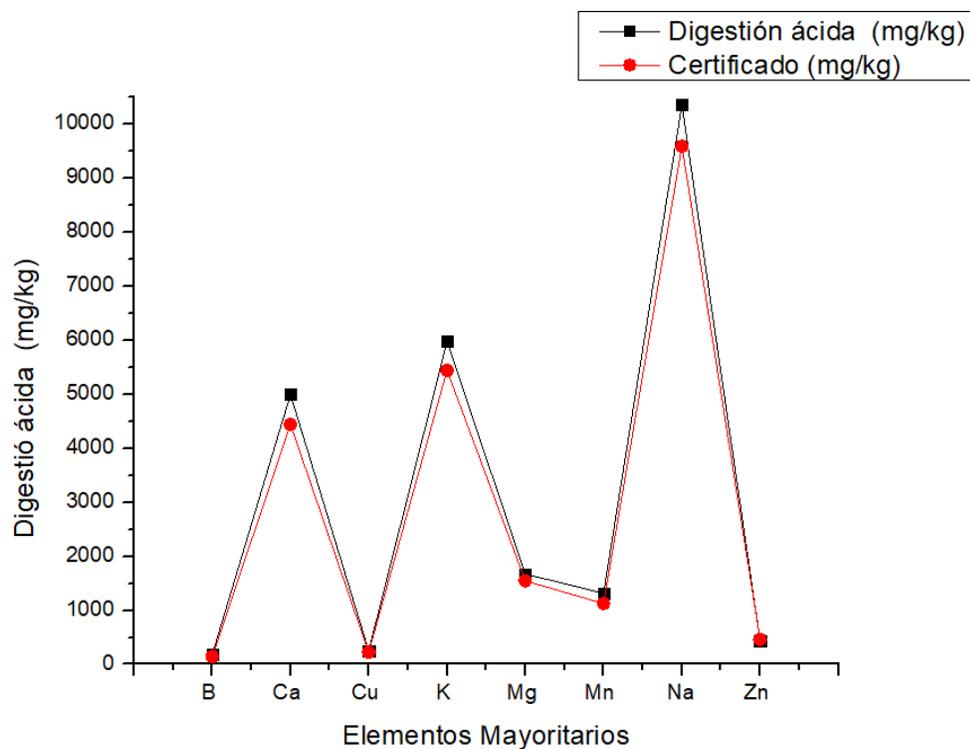
En el caso del suelo, se utilizó el material de referencia Sigma Aldrich, Metal in Soil SQC001-30G, el cual fue procesado con la metodología anteriormente descrita. A su vez, se preparó un blanco utilizado para saber si hubo algún tipo de contaminación durante el procedimiento de preparación y análisis de las muestras.

El recobro obtenido para el material de referencia del suelo se presenta en las figuras 9 y 10 y en las tablas 4 y 5. Se hizo un comparativo entre los elementos que se analizaron y los presentados en el certificado de referencia para el material.

Se realizó la extracción secuencial de los lavados realizados de cada una de las fracciones y se integró al análisis de la extracción, en la elaboración de los diagramas de la extracción secuencial y los diagramas de Schoeller que más adelante serán explicados.

**Tabla 4.-** Porcentaje de recuperación para los elementos mayoritarios obtenidos en la extracción secuencial del suelo

Elementos mayoritarios	Recuperación (%)
B	128
Ca	113
Cu	112
K	110
Mg	108
Mn	117
Na	108
Zn	95

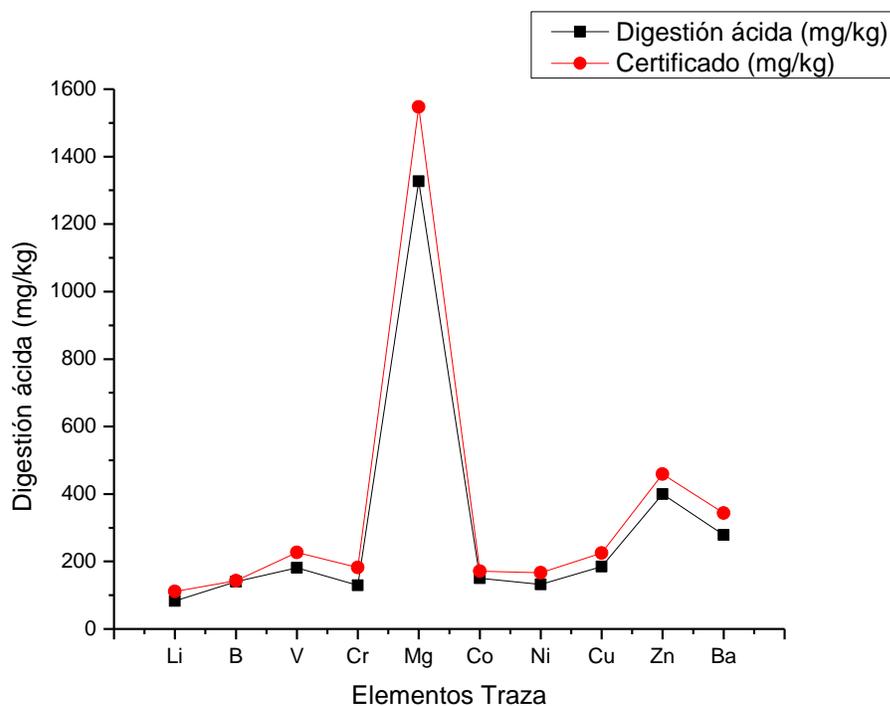


**Figura 9.-** Diagrama de recobro de los elementos mayoritarios para el material de referencia Metal in Soil SQC001 .

En cuanto a la obtención del parámetro tasa de infiltración del suelo se realizó mediante el método de doble anillo propuesto por Selker y colaboradores en 1999 y revisado por Alvarado y Barahona en 2017.

**Tabla 5.-** Porcentaje de recuperación para los elementos traza obtenidos en la extracción secuencial del suelo

Elementos Trazo	Recuperación (%)
Li	74
B	98
V	79
Cr	71
Mg	85
Co	87
Ni	79
Cu	81
Zn	87
Ba	81



**Figura 10.-** Diagrama de recobro de los elementos mayoritarios para el material de referencia Metal in Soil SQC001.

## Vegetación

Al momento de utilizar las muestras de vegetación para su análisis se lavaron con agua ultrapura y una solución de HCl 0.1 M, se secaron con un paño estéril para remover partículas de suelo u otras partículas que tuvieran en la superficie y de esta manera, eliminar alguna contaminación proveniente de esa fuente; después, se metieron a un congelador.

Posterior al congelamiento se llevaron a una liofilizadora Labconco ConsoleFreeZone 12L durante 48 horas para retirar completamente la humedad. El proceso de molienda se realizó con un mortero de ágata, colectando así aproximadamente 10 g de cada muestra de vegetación. Cabe señalar, que no se hizo una separación entre raíces, tallos y hojas, más bien se mezclaron los componentes de la planta y se hizo una muestra mixta.

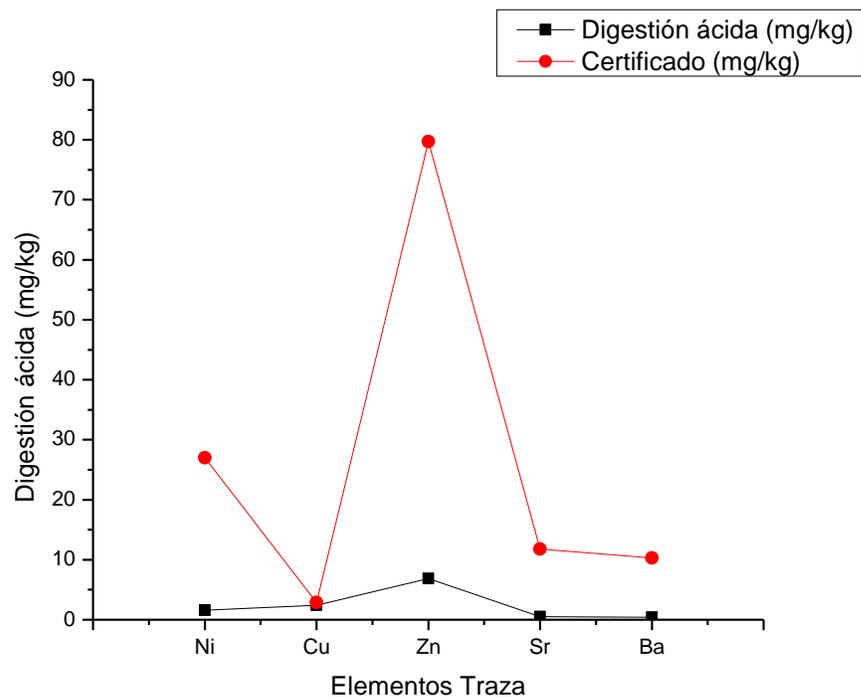
Al tener el material ya molido se procedió con la digestión ácida en el horno de microondas MARS 6 siguiendo el método que recomienda la EPA para el material vegetal: 0.5 g de muestra, con 4 mL de HCl a 200 °C, durante 15 minutos a una presión de 800 psi, El método está incluido en el menú del horno de microondas MARS 6 (Shadow, 2019), sin embargo, se recomienda usar HCl en lugar de HNO<sub>3</sub>, que fue lo que se usó, para evitar interferencias en el análisis con ICP-MS.

El análisis se realizó con ICP-MS e ICP-OES, utilizando 0.25 g de material vegetal y 3mL de HNO<sub>3</sub> para la digestión. Al terminar la digestión se colectó el sobrenadante y se realizó una dilución de las muestras 1/50 con agua Milli-Q, esto para evitar una saturación en los equipos de ICP-MS y ICP-OES. Finalmente, se tomaron 0.25 mL de las muestras digerida y se le agregaron 12.25 mL de agua Milli-Q. Cabe resaltar que en todo el proceso se utilizó un material de referencia vegetal de la Comisión Europea CBR 679 (polvo de col blanca). Así como, un blanco de digestión y uno de dilución, mismos que se restaron de las concentraciones reportadas para las muestras.

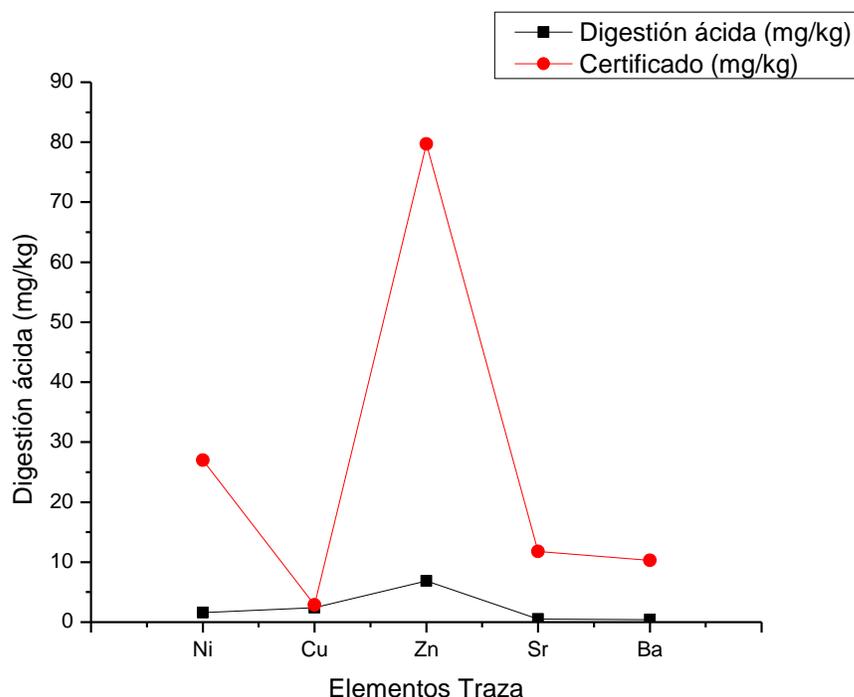
La tasa de recobro para este material fue bastante bajo, no se logró identificar el error, sin embargo, se decidió trabajar los resultados de forma semi-cuantitativa y únicamente para comparación entre muestras. A continuación, se presentan las tablas 6 y 7 de recobro y los diagramas que los representan (*Ver Figuras 11 y 12*).

**Tabla 6.-** Material de referencia col blanca (CBR 679), elementos mayoritarios.

Elementos mayoritarios	Recuperación (%)
<b>Ca</b>	3.7
<b>Mg</b>	2.9
<b>P</b>	3.3

**Figura 11.-** Diagrama de recobro de los elementos mayoritarios para el material de referencia CBR 679.**Tabla 7.-** Material de referencia col blanca (CBR 679), elementos traza.

Elementos traza	Recuperación (%)
<b>Cr</b>	4.6
<b>Ni</b>	6
<b>Cu</b>	83.7
<b>Zn</b>	8.6
<b>Sr</b>	4.11
<b>Cd</b>	3.42
<b>Sb</b>	0.03
<b>Ba</b>	3.91



**Figura 12.-** Diagrama de recobro de los elementos mayoritarios para el material de referencia CBR 679.

### 4.3. Análisis de datos

#### Agua, Suelo y Vegetación.

La construcción de los diagramas presentados en la sección de resultados para el análisis de la extracción secuencial de los suelos procesados por esta técnica, se realizó a través de la utilización de una hoja de cálculo para el manejo de los datos y posteriormente la utilización del software Origin Pro 8.5 para señalar el porcentaje obtenido de cada fracción del mismo. Los datos utilizados para la construcción de los diagramas se encuentran en el presente anexo (*Ver Tablas 49 a 62*).

Al igual que los diagramas que se presentan en la sección de análisis global se integran los diagramas de Schoeller modificados, mostrando la concentración de cada una de las muestras procesadas.

Las unidades geopedológicas se realizaron con datos tomados en el área de estudio y datos tomados de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) mediante la herramienta computacional QGIS por el equipo de la Dra Lourdes González Arqueros de la Universidad la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

### **Construcción de mapas y análisis espacial.**

Los mapas se realizaron en con el software ArcMap 10.7.1, con datos obtenidos del portal de internet del Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI), agrupándose en tres bloques la información para su manejo y análisis.

1º. Relieve y dirección de flujo donde se contempla la imagen satelital, las curvas de nivel y la dirección de flujo. Con este bloque se construyó la zona de influencia, la cual determina cual es el posible flujo del agua y suelo, por donde pueden ocurrir procesos de transporte.

2º. Rasgos geológicos, contempla las unidades geopedológicas, las cuales están construidas con la geología local, el tipo de uso de suelo y la pendiente, también está la geología del sitio y las fallas cercanas a la zona de influencia.

3º. Cobertura vegetal, contempla la vegetación para el año 1997, la vegetación para el año 2016 y el tipo de uso de suelo para el año 2018, lo que implica un cambio temporal en la cubierta vegetal del sitio.

## Capítulo 5. Resultados y Discusión

---

El análisis de los resultados y su respectiva discusión está dividido en tres subcapítulos. En el primer subcapítulo se describen las unidades geopedológicas a partir de las variables geológicas, el tipo de uso de suelo y la pendiente.

En el segundo subcapítulo, se presentan los resultados y la discusión a partir del análisis por sitio. A partir de la construcción de 9 mapas por sitio, agrupados de tres en tres. En cada mapa se muestra a su vez la zona de influencia determinada a partir del primer grupo de variables. Dicha zona, indica para donde ocurre el movimiento o flujo del agua y para donde se pueden desplazar por gravedad las partículas de suelo ya sea en suspensión o por arrastre del flujo de agua o por eventos de remoción en masa o procesos de erosión hídrica.

- El primer grupo se denomina “Relieve y dirección de flujo” y contempla la imagen satelital del sitio, las curvas de nivel y la dirección de flujo del agua.

- El segundo grupo se denomina “Rasgos geológicos”, que contempla las unidades geopedológicas (*Ver Tabla 1*), la geología local y las fallas geológicas locales y regionales.

- El tercer grupo denominado “Cubierta vegetal” conformado por el tipo de uso de suelo para el año 2018, la cubierta vegetal en el año 1997 y la cubierta vegetal en el año 2016.

Además de estos mapas, se presentan las variables del suelo determinadas en el campo y en el laboratorio (mencionadas en la metodología) y se agruparon de acuerdo con lo siguiente:

1. **Su relación con la estructura del suelo** - % rocas, estabilidad de agregados, raíces, Tasa de infiltración (cm/ha), densidad aparente ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).
2. **Sus variables fisicoquímicas** - temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), humedad in situ (%), humedad (%), carbono orgánico (%), pH, CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
3. **Su textura** – porcentaje de arcilla, limo y arena del suelo.

Posteriormente se presentan y discuten los resultados de la extracción secuencial a partir de los resultados de los elementos químicos mayores y traza potencialmente tóxicos, asociados a las fases del suelo: intercambiable, hidróxidos de Fe y Mn, materia orgánica y residual.

Finalmente, se presentan los resultados de los análisis de agua y vegetación, en el caso de que existan datos para el sitio.

En el tercer subcapítulo, se hace un análisis global del sitio, comenzando con el resumen de la extracción secuencial de todos los sitios, resaltando los que presentan hidrotermalismo. Así como los sitios con análisis de agua y de la vegetación. Esto a partir de tablas y diagramas de Schoeller modificados que muestran la concentración de los elementos mayoritarios y trazas de cada una de las fracciones del suelo, el agua y la vegetación (dividida en hongos y plantas).

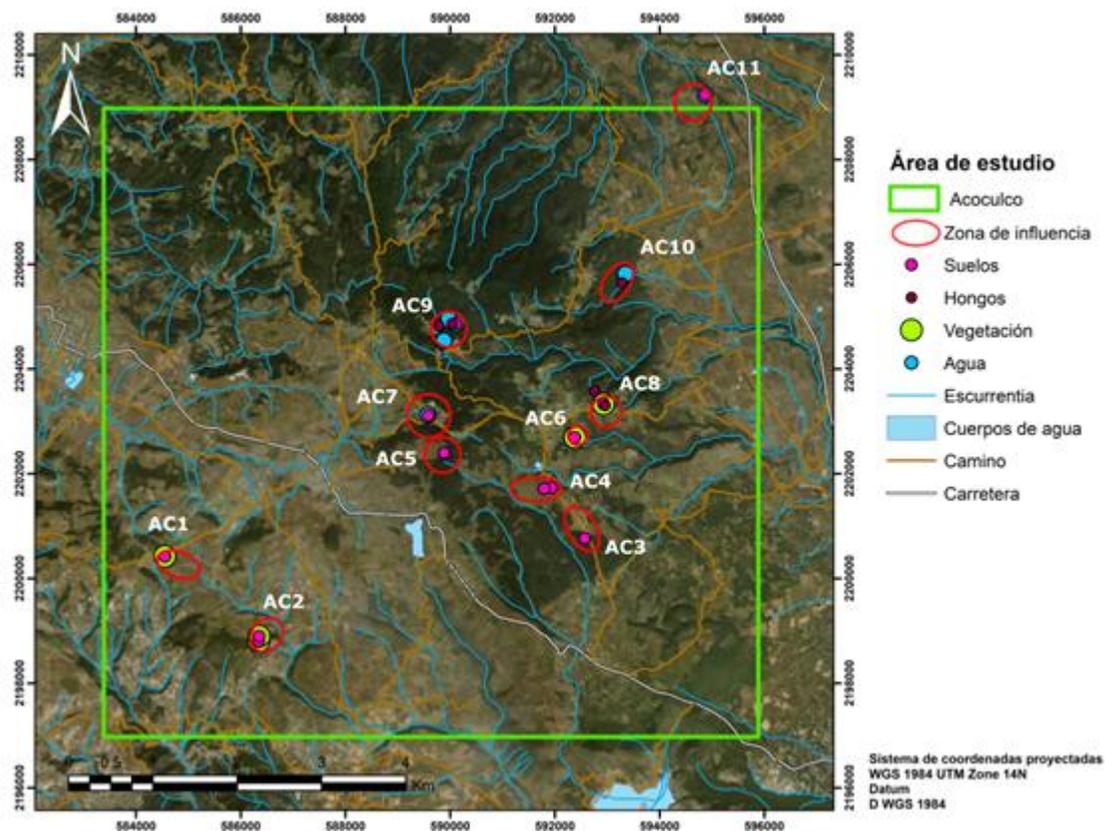
Haciendo una discusión global en donde se proponen algunos procesos de transporte de elementos químicos potencialmente tóxicos entre las tres variables ambientales (suelo, agua y vegetación).

Los diagramas de extracción secuencial del suelo, los diagramas de concentraciones de la digestión de plantas y hongos los diagramas de las concentraciones de elementos para el agua y los diagramas de Schoeller tanto del suelo, agua y vegetación se construyeron con los datos presentados en el anexo.

## **5.1. Unidades geopedológicas**

Este estudio está realizado con un muestreo de suelo tomado en el año 2019 a lo largo del polígono de la zona de estudio (*Ver Figura 13*) con nueve perfiles muestreados. Y tres sitios más, dos de ellos en el año 2018 y otro más en el 2015. La numeración del muestreo comienza al suroeste y continua en una diagonal hasta llegar al último perfil muestreado localizado al noreste de la zona de estudio.

Cada sitio se nombró de acuerdo con la población más cercana, como muestra la tabla 8.



**Figura 13.-** Mapa de imagen satelital de la zona de estudio, zonas de influencia para cada perfil de suelo muestreado, puntos de suelo, agua vegetación y hongos muestreados, red de caminos y carreteras, escorrentía y cuerpos de agua

**Tabla 8.-** Sitios muestreados en la zona de estudio. \*Sitios hidrotermales.

Sitio	
AC1	San José Corral Blanco
AC2	El Eco
AC3	La Gloria
AC4	Cruz Colorada
AC5	Terrerillos
AC6	La Cañada
AC7*	<b>Los Azufres</b>
AC8	Cañada de Piedras
AC9*	<b>Alcaparrosa</b>
AC10	Ocojala
AC11*	<b>El Tehuacán</b>

Las unidades geopedológicas identificadas fueron 19, de acuerdo con la tabla 9. En donde se identifican a través de tres variables, el tipo de roca, el tipo de uso de suelo y la pendiente, que a su vez están divididas como sigue:

**Tipo de roca:** ígnea extrusiva básica, ígnea extrusiva intermedia e ígnea extrusiva ácida.

**Tipos de uso de suelo:** Vegetación secundaria arbustiva, bosque de pino-encino, agricultura de temporal, anual y permanente y Bosque de pino.

**Pendiente:** menor a 10 grados, 10-15 grados y mayor a 15 grados

**Tabla 9.-** Unidades geopedológicas construidas a partir de la geología local, el tipo de uso de suelo y la pendiente.

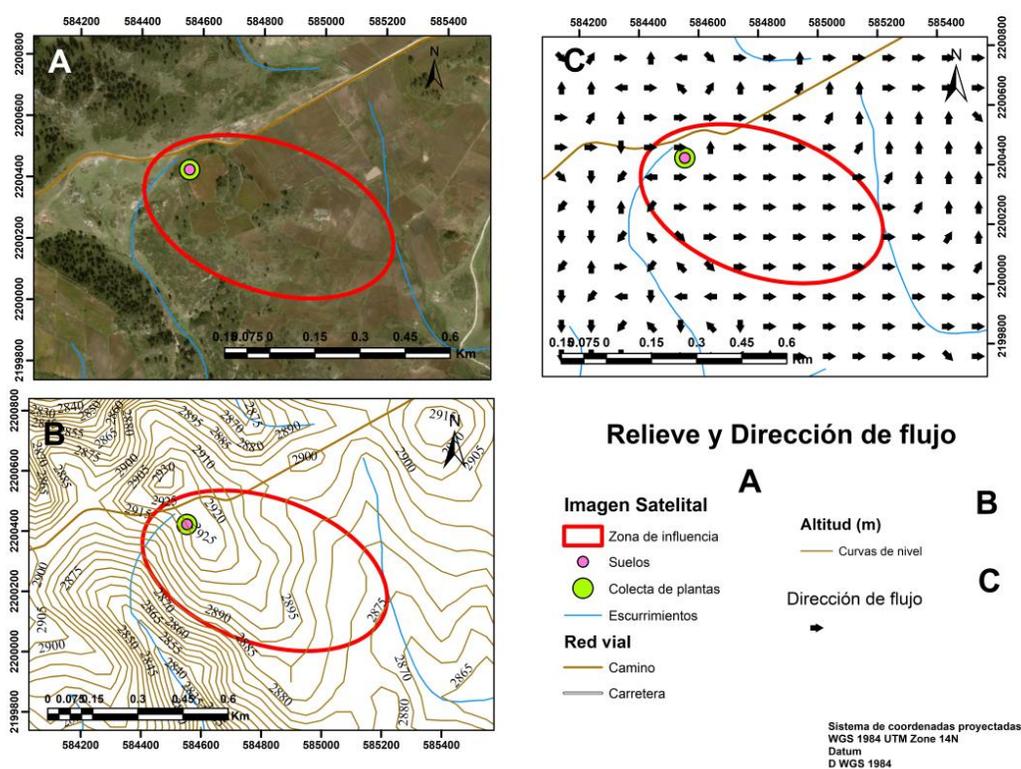
Unidad	Tipo de roca	Tipo de uso de suelo	Pendiente
1	Ígnea extrusiva básica	Vegetación secundaria arbustiva y bosque de pino-encino	<10
2	Ígnea extrusiva intermedia	Vegetación secundaria arbustiva y bosque de pino-encino	<10
3	Ígnea extrusiva básica	Bosque de pino	<10
4	Ígnea extrusiva ácida	Agricultura de temporal, anual y permanente,	<10
5	Ígnea extrusiva básica	Agricultura de temporal, anual y permanente	<10
6	Ígnea extrusiva intermedia	Agricultura de temporal, anual y permanente	<10
7	Ígnea extrusiva ácida	Vegetación secundaria arbustiva y bosque de pino-encino,	10-15
8	Ígnea extrusiva intermedia,	Vegetación secundaria arbustiva y bosque de pino-encino	10-15
9	Ígnea extrusiva ácida	Bosque de pino	10-15
10	Ígnea extrusiva básica	Bosque de pino	10-15
11	Ígnea extrusiva intermedia,	Bosque de pino	10-15
12	Ígnea extrusiva ácida	Agricultura de temporal, anual y permanente	10-15
13	Ígnea extrusiva básica	Agricultura de temporal, anual y permanente	10-15
14	Ígnea extrusiva intermedia	Agricultura de temporal anual y permanente	10-15
15	Ígnea extrusiva básica	Vegetación secundaria arbustiva	>15
16	Ígnea extrusiva ácida	Bosque de pino	>15
17	Ígnea extrusiva básica	Bosque de pino	>15
18	Ígnea extrusiva ácida	Agricultura de temporal, anual y permanente	>15
19	Ígnea extrusiva básica	Agricultura de temporal anual y permanente	>15

## 5.2. Análisis por sitio

### 5.2.1. Sitio AC1 San José Corral Blanco

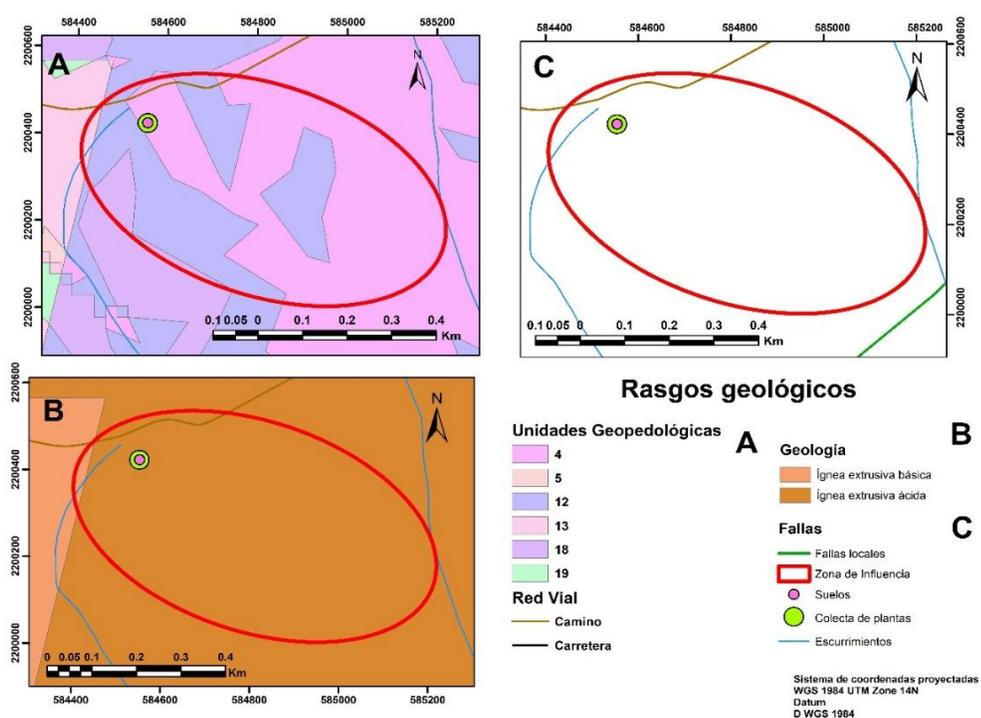
En este sitio se tienen el perfil de suelo B19AC12, procesado por extracción secuencial y una muestra de vegetación B19AC12-01 (*Baccharis conferta*), procesada por digestión ácida.

Con base en la figura 14, en la sección A se aprecia una zona de cultivo exactamente donde se localiza el sitio de muestreo de suelo y de vegetación recolectada. Para la sección B se aprecia que el sitio está a 2950 msnm y para la sección C la dirección de flujo se orienta hacia el sureste, lo cual direcciona la zona de influencia en esa dirección. Dicha zona de influencia tiene una longitud de 830 m hacia el sureste, con una amplitud de 490 m.



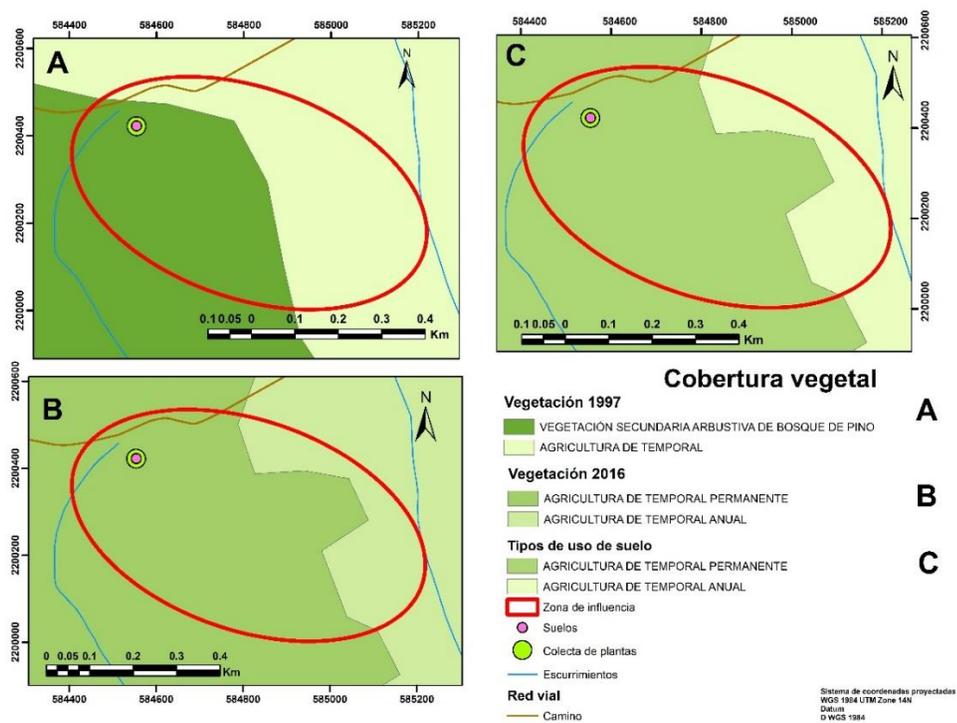
**Figura 14.-** Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC1.

En la figura 15, se identifica que la unidad geopedológica sobre la que se encuentra el sitio, es la unidad 4, correspondiente a roca ígnea extrusiva ácida, vegetación secundaria arbustiva y bosque de pino-encino y una pendiente menor a 10 grados. La falla que se encuentra más cerca es la de Los Azufres siendo esta una falla de tipo normal, aunque se sale de la zona de influencia. En figura 15C, se identifica un escurrimiento cercano, que puede tener influencia en los procesos de disolución y transporte.



**Figura 15.-** Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC1.

De acuerdo con la figura 16. La sección A muestra la cubierta vegetal en el año de 1997, la cual consistía principalmente en vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino en la parte oeste y suroeste de la zona; y la parte este y noreste agricultura de temporal. Para las dos siguientes imágenes (B y C), se observa que ya toda la zona se convirtió en una zona de agricultura ya sea de temporal anual o temporal permanente, sufriendo un cambio de uso de suelo en un lapso aproximado de 20 años.



**Figura 16.-** Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC1.

A continuación, se presentan los resultados de las variables que conforman la estructura del suelo, las variables fisicoquímicas y la textura del perfil B19AC12 para el horizonte Ap1 (Ver Tabla 10, 11 y 12).

**Tabla 10.-** Variables que conforman de la estructura del suelo en el sitio AC1.

Perfil	Horizonte	% Rocas	Estabilidad de agregados	Raíces	Densidad aparente	Tasa de infiltración
					mg/m <sup>3</sup>	cm/ha
B19AC12	Ap1	17	baja	abundantes	1.08	10.8

**Tabla 11.-** Variables fisicoquímicas del suelo en el sitio AC1.

Perfil	Horizonte	T	Humedad in situ	Humedad	Carbono orgánico	pH	CE
		°C	%		μS/cm		
B19AC12	Ap1	11.8	5.3	7.76	2	5.2	110

**Tabla 12.-** Textura del suelo en el sitio AC1.

Perfil	Horizonte	Textura	Porcentaje (%)		
			Arcilla	Limo	Arena
B19AC12	Ap1	franca	13.85	40	46.15

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas para el análisis de la extracción secuencial y la digestión ácida de la vegetación (Ver Figuras 17, 18, 19 y 20).

Para los diagramas de extracción secuencial (Ver Figura 5 y 7) se tienen cuatro diferentes fracciones:

La primera en color azul es la **fracción intercambiable**.

La segunda en color rojo, **fracción unida a hidróxidos de hierro y manganeso**

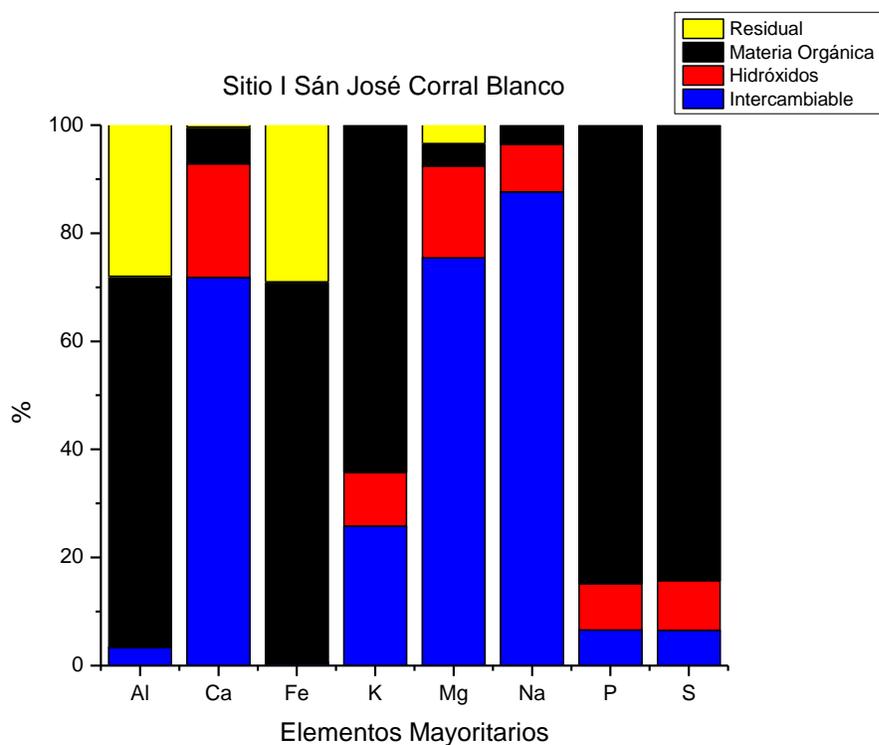
La tercera en color negro, es la **fracción unida a materia orgánica**,

Y por último la **fracción residual**, de color amarillo.

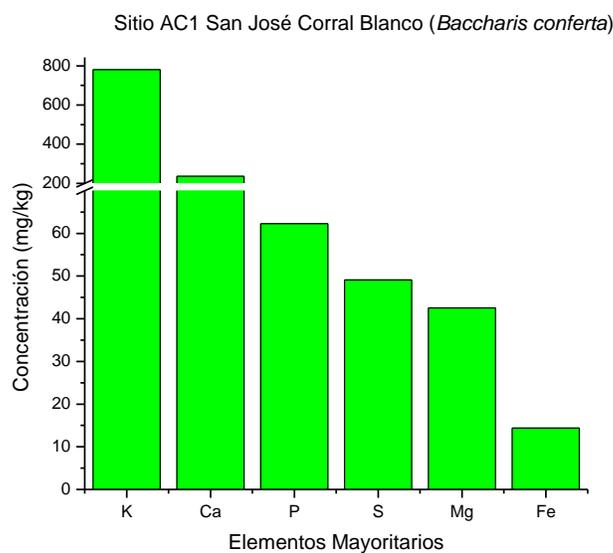
Los elementos mayoritarios que se encuentran en la fracción intercambiable son principalmente el Ca, K, Mg y N, siendo elementos que se pueden dispersar de manera más rápida ya que están en una forma disuelta como iones. Un ejemplo puede ser el Ca y el Mg que se encuentran como carbonato, que pueden estar presentes en el acuífero en forma de caliza o dolomita o presentes en el suelo, al entrar en contacto con dióxido de carbono disuelto en el agua se transforman en bicarbonato soluble y esto hace que se tengan los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en suspensión (Chang y Goldsbey, 2013).

En la figura 18 se puede observar el contenido de los elementos mayoritarios presentes en la especie *Baccharis conferta*, obtenidos por digestión ácida.

Esta planta se ha encontrado en algunos sitios de la región de Pachuca en diversos jales mineros asociados a pasivos ambientales creciendo en suelos con un contenido de arenas, limo y arcilla muy parecido a los encontrados en esta zona y considerada con un amplio potencial de fitoremediación por su capacidad de tolerar ambientes inhóspitos y/o contaminados (Juárez et al., 2010)



**Figura 17.**-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC1, muestra B19AC12.



**Figura 18.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC12-01, especie *Baccharis conferta*, en el sitio AC1.

Este perfil de suelo está dominado principalmente por las fracciones de materia orgánica y residual, lo que significa que la mayoría de los elementos están en fases que son difíciles de obtener para los organismos en las condiciones que se encuentran en la naturaleza en tiempos relativamente rápidos (Tessier et al., 1979b) El cobre, por ejemplo, es un elemento que se encuentra en la fase de materia orgánica y también

se encuentra en las plantas (Ver Figuras 19 y 20). Es probable que esté como ion divalente ( $\text{Cu}^{2+}$ ) en suelos aireados o en su forma monovalente ( $\text{Cu}^+$ ) en suelos húmedos con baja concentración de oxígeno (Morales, 2012) que son las condiciones en las que las plantas pueden disponer de este elemento.

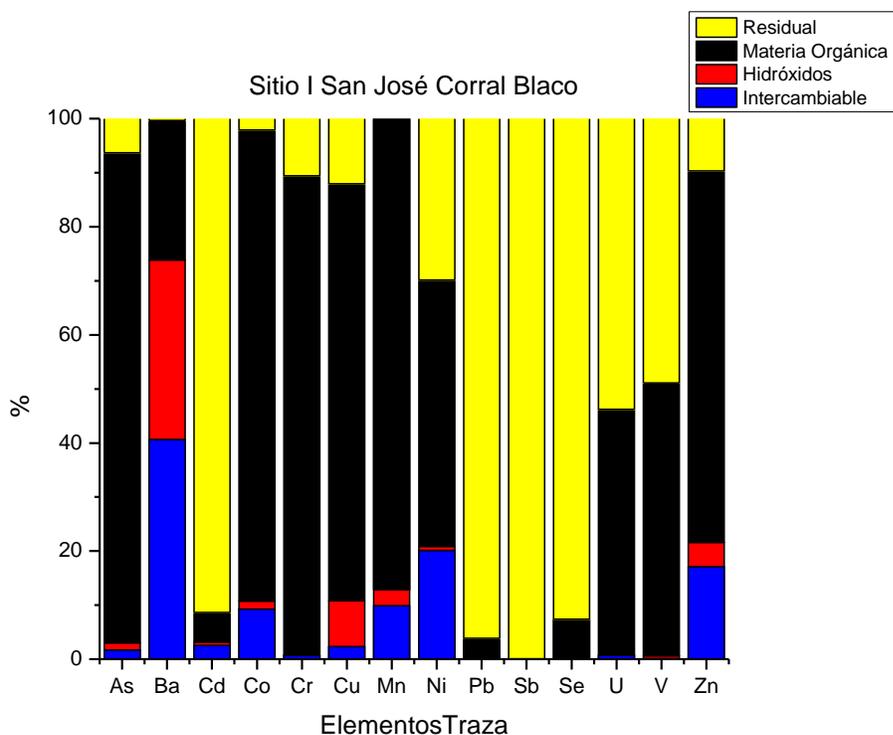


Figura 19.-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC1, muestra B19AC12.

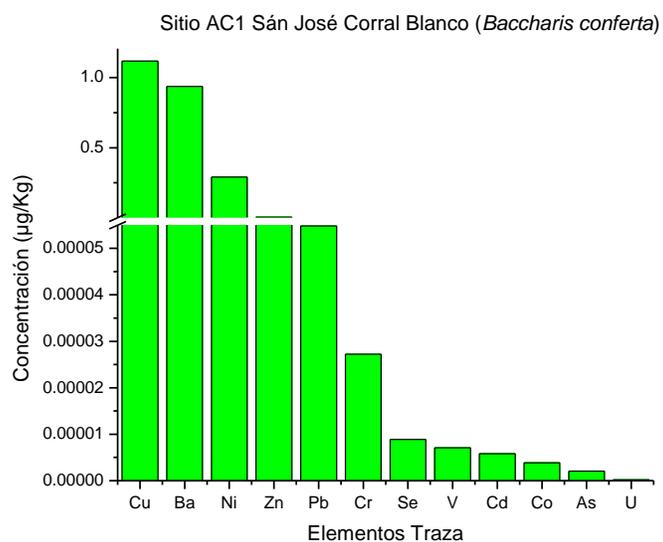
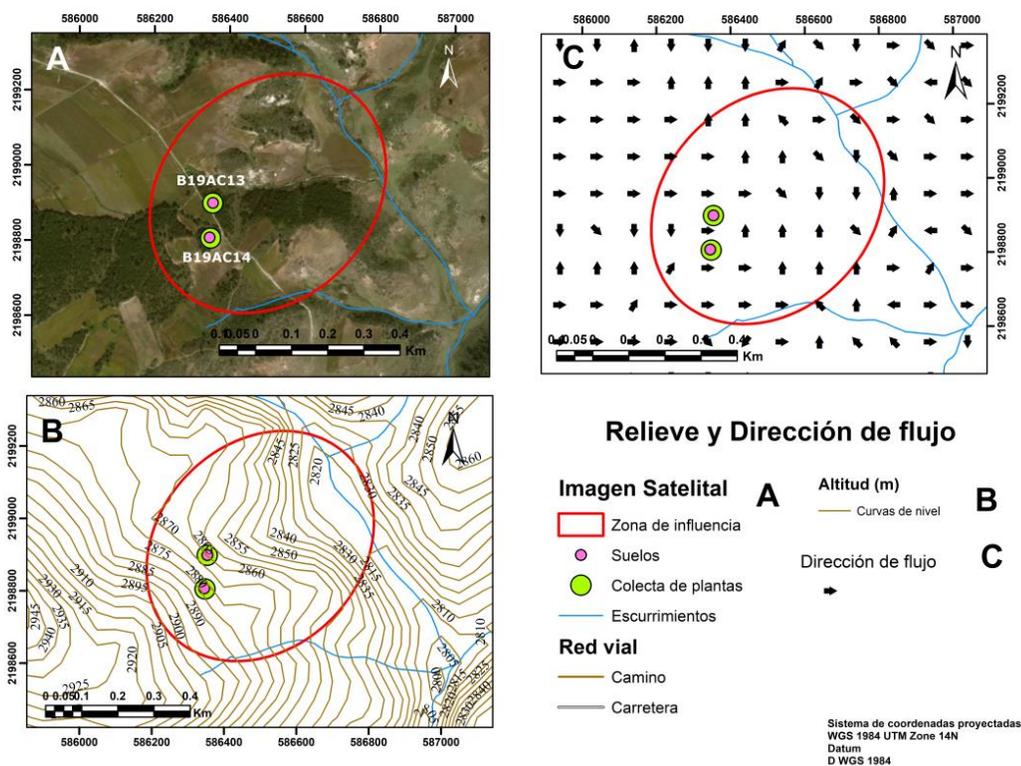


Figura 20.-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , en la muestra B19AC12-01, especie *Baccharis conferta*, en el sitio AC1.

## 5.2.2 Sitio AC2 El Eco

Para este sitio se tienen dos perfiles de suelo, B19AC13 y B19AC14, procesados por extracción secuencial y cuatro muestras de vegetación B19AC13-01 (*Baccharis conferta*), B19AC13-02 (*Muhlenbergia macroura*), B19AC14-01 (*Muhlenbergia macroura*) y B19AC14-02 (*Pinus patula*) procesadas por digestión ácida.

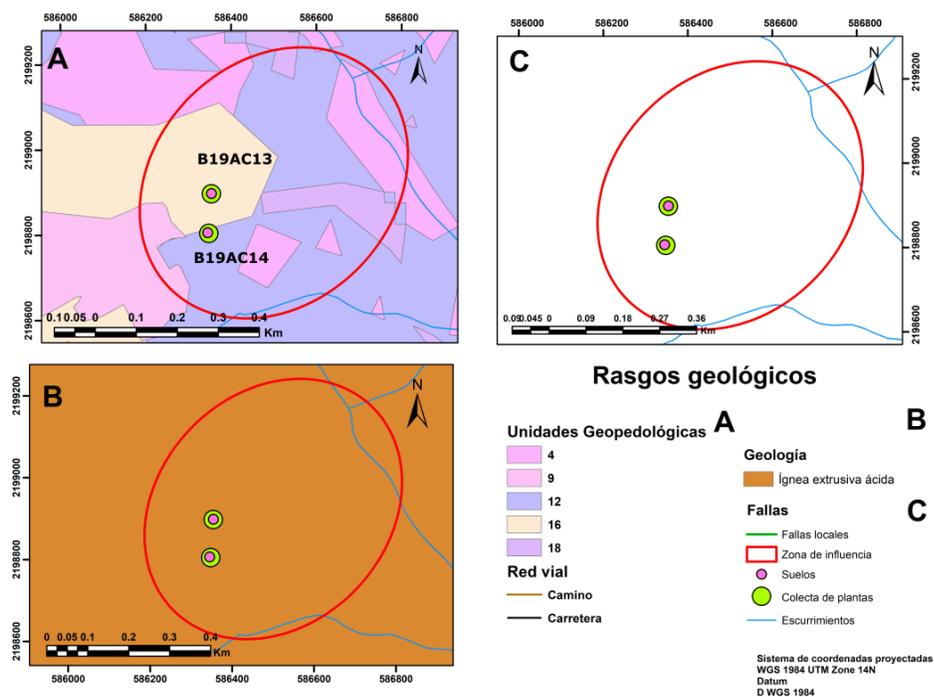
La sección A de la figura 21, muestra la imagen satelital de los puntos de muestreo cercanos a un camino dentro de un parche de vegetación y en la zona circundante se encuentra una zona de cultivo. La sección B muestra el sitio B19AC13 que se encuentra a 2865 msnm y el perfil B19AC14 que se encuentra a 2875 msnm. Para la sección C del mapa muestra la dirección de flujo que va hacia el noreste lo que determina la dirección de la zona de influencia. Dicha zona de influencia tiene 690 m de longitud y 560 m de ancho.



**Figura 21.**-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC2.

Con base en el mapa de la figura 22, el perfil B19AC13 se encuentra en la unidad geopedológica dieciséis caracterizada por tener un tipo de roca ígnea extrusiva ácida, un tipo de vegetación de bosque de pino y

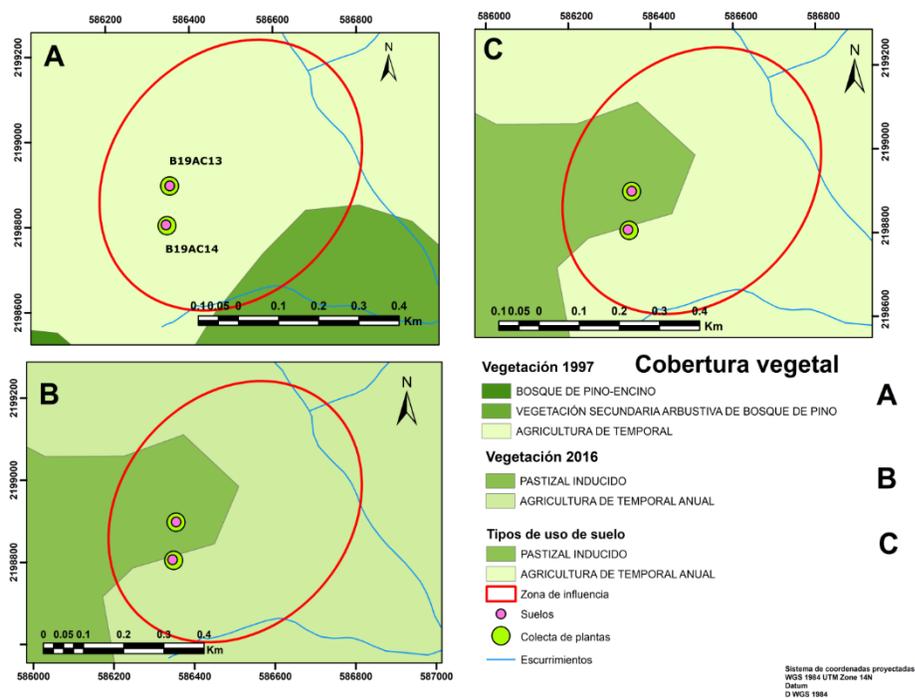
una pendiente mayor a 15 grados (sección A). El perfil de suelo B19AC14 se encuentra en la unidad geopedológica doce, situada sobre una roca ígnea extrusiva ácida, el uso de suelo es de tipo agricultura de temporal, anual y permanente y una pendiente entre 10 y 15 grados. La sección C del mapa representa las zonas de falla, pero no existe alguna cerca de la zona de influencia para este sitio.



**Figura 22.-**Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC2.

La sección A de la figura 23 muestra que la cubierta vegetal para el año 1996 era agricultura de temporal en los dos perfiles de suelo, las secciones B y C muestran que el perfil B19AC13 está dentro de una zona de pastizal inducido y el perfil B19AC14 está en una zona de temporal anual.

Según un estudio realizado por Manjarrez y Bernal, 2018 Puebla es un estado en el que la agroindustria ha ido en incremento y por lo tanto el cambio de uso de suelo ya sea de bosque o de cubierta vegetal propia del lugar ha cambiado a uso de suelo agrícola, así como datos de campo reportados para la zona indican que el uso de suelo es agrícola para consumo local y de forrajeo para alimento del ganado local.



**Figura 23.-** Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC2.

Las tablas 13, 14 y 15 contienen los resultados de las variables que comprenden la estructura del suelo, las variables fisicoquímicas y la textura y porcentaje de arcilla, limo y arena para los dos perfiles de suelo B19AC13 y B19AC14.

**Tabla 13.-** Variables que conforman de la estructura del suelo en el sitio AC2

Perfil	Horizonte	% Rocas	Estabilidad de agregados	Raíces	Densidad aparente	Tasa de infiltración
					mg/m <sup>3</sup>	cm/ha
B19AC13	A	57	muy alta	abundantes	1.08	674.4
B19AC14	A	47	muy alta	abundantes	0.92	82

**Tabla 14.-** Variables fisicoquímicas en el sitio AC2

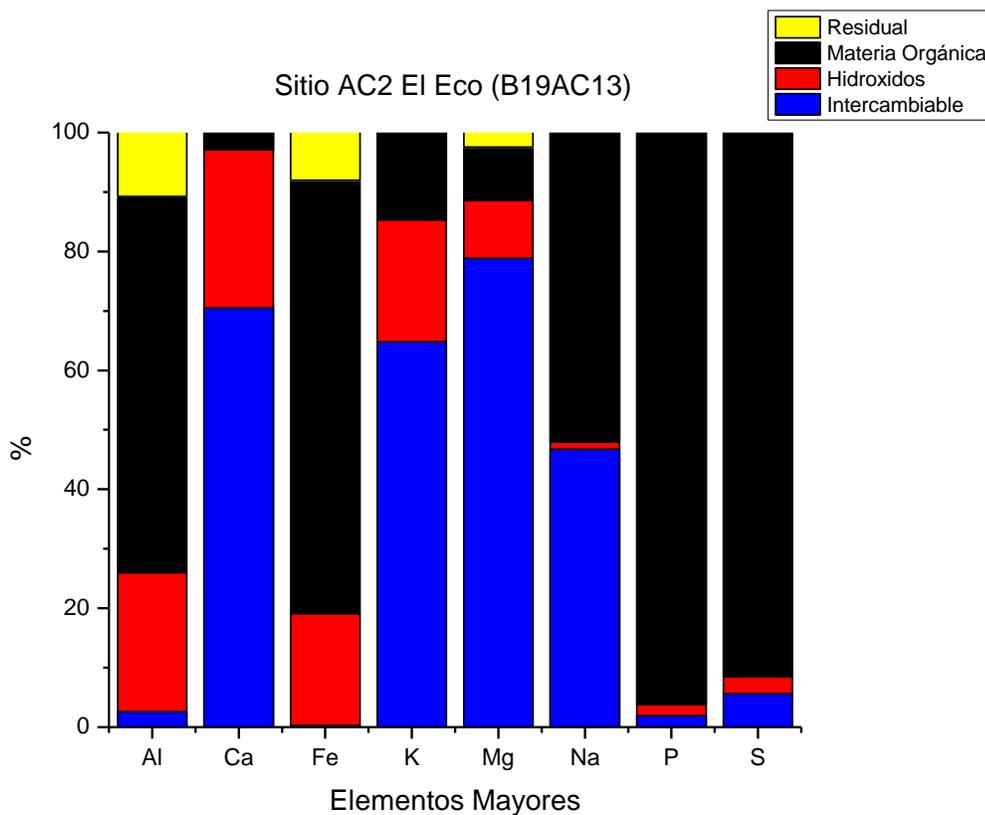
Perfil	Horizonte	T	Humedad in situ	Humedad	Carbono orgánico	pH	CE
		°C	%				μS/cm
B19AC13	A	12.7	15	21.3	5.4	5.8	80
B19AC14	A	12.6	10.5	25.26	3.6	6	90

**Tabla 15.-** Textura del suelo en el sitio AC2

Perfil	Horizonte	Textura	Porcentaje (%)		
			Arcilla	Limo	Arena
<b>B19AC13</b>	A	franco arcillo arenoso	23.85	25	51.15
<b>B19AC14</b>	A	franco arcillo arenoso	21.35	22.5	56.15

A continuación, se presentan las gráficas con el porcentaje del contenido de los elementos en las fracciones intercambiables, hidróxidos, la materia orgánica y el residual y la digestión acida de las plantas (Ver Figuras 24 y 25).

La figura 24 muestra las diversas fracciones de la extracción secuencial. Se revela que las fracciones predominantes son la intercambiable y la de la materia orgánica. El contenido de P y S se puede asociar como parte la materia orgánica, siendo estos elementos parte fundamental del humus y los procesos que ocurren dentro de esta fase (Lancho, 1982).



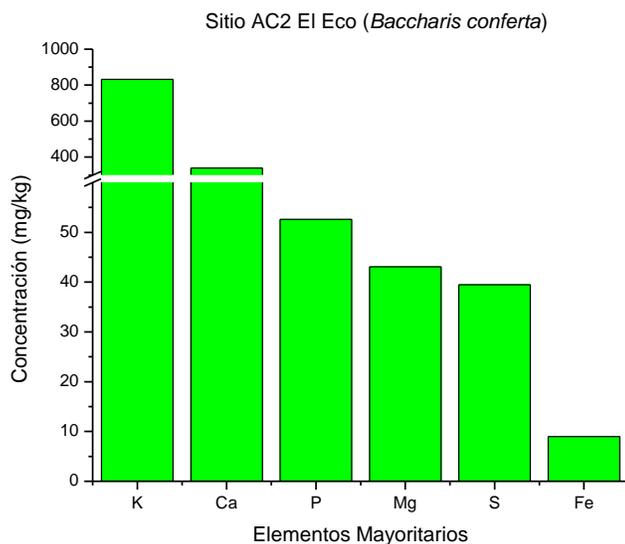
**Figura 24.-**Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC2, muestra B19AC13.

Se puede observar en la figura 25 el contenido de los elementos mayoritarios obtenidos en la digestión ácida para la especie *Baccharis conferta*. La figura 26 muestra el contenido de los elementos mayoritarios para la especie *Muhlenbergia macroura*.

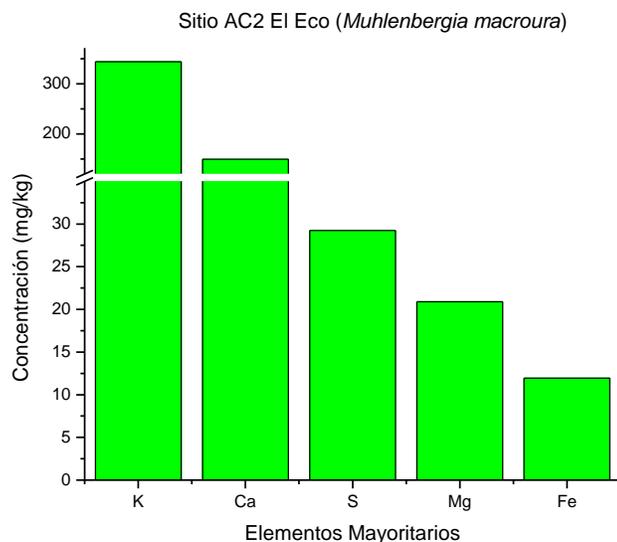
Según un estudio realizado por Quiroz y colaboradores (2002), la especie *Muhlenbergia macroura*, es una especie bioacumuladora de Pb y Zn, y a su vez permite la movilización de estos elementos a través de la generación de lixiviados, lo que fomenta que se integren a fracciones como la intercambiable y se puedan movilizar como iones a través del agua.

Posteriormente a través de reacciones de óxido-reducción integrarse a la fracción de hidróxidos; aunque también depende de la granulometría y la salinidad del suelo para su movilización (Roca et al., 2007). Se puede observar en la figura 27, que tanto el Zn, como el Pb están en las fracciones intercambiables y de hidróxidos.

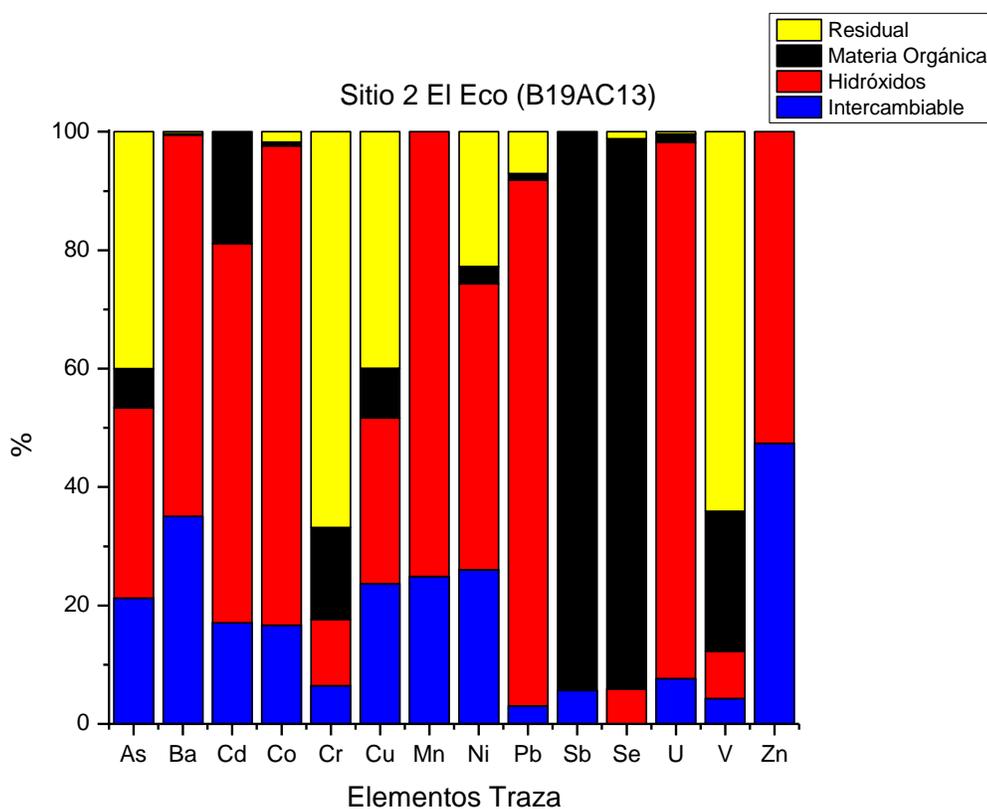
Para las figuras 29 y 30 se observa la presencia del Zn y Pb, para las dos especies de plantas, *Baccharis conferta* y *Muhlenbergia macroura*. Y aunque no se consideran sus concentraciones, dados los bajos porcentajes de recuperación obtenidos en la metodología empleada, no se descarta su presencia cualitativamente comparado con los otros elementos encontrados.



**Figura 25.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC13-01, especie *Baccharis conferta*, en el sitio AC2.

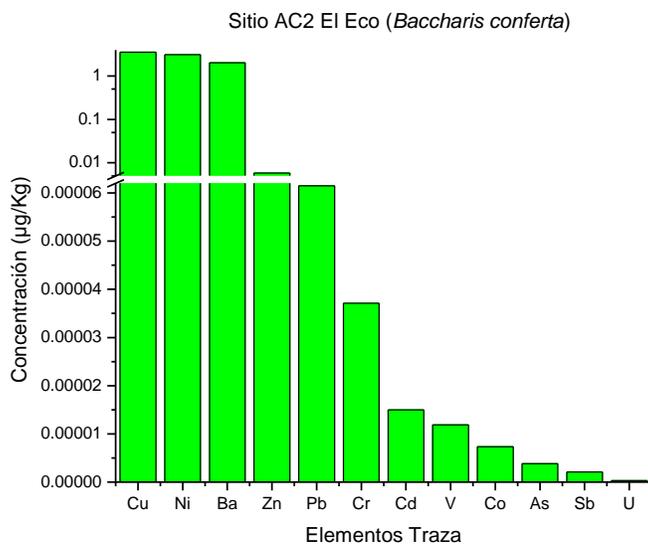


**Figura 26.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC13-02, especie *Muhlenbergia macroura* en el sitio AC2.

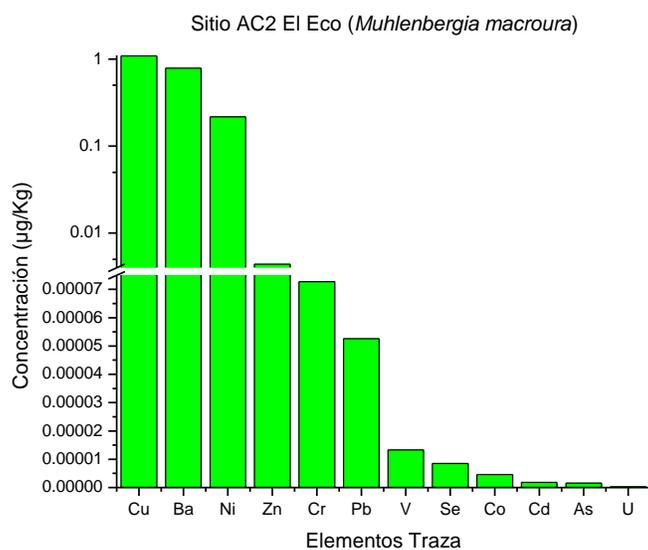


**Figura 27.**-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC2, muestra B19AC13

En la figura 28 se muestra el contenido de los elementos traza obtenido por la digestión ácida para la especie *Baccharis conferta*; la figura 29 muestra los elementos traza encontrados en la especie *Muhlenbergia macroura*.



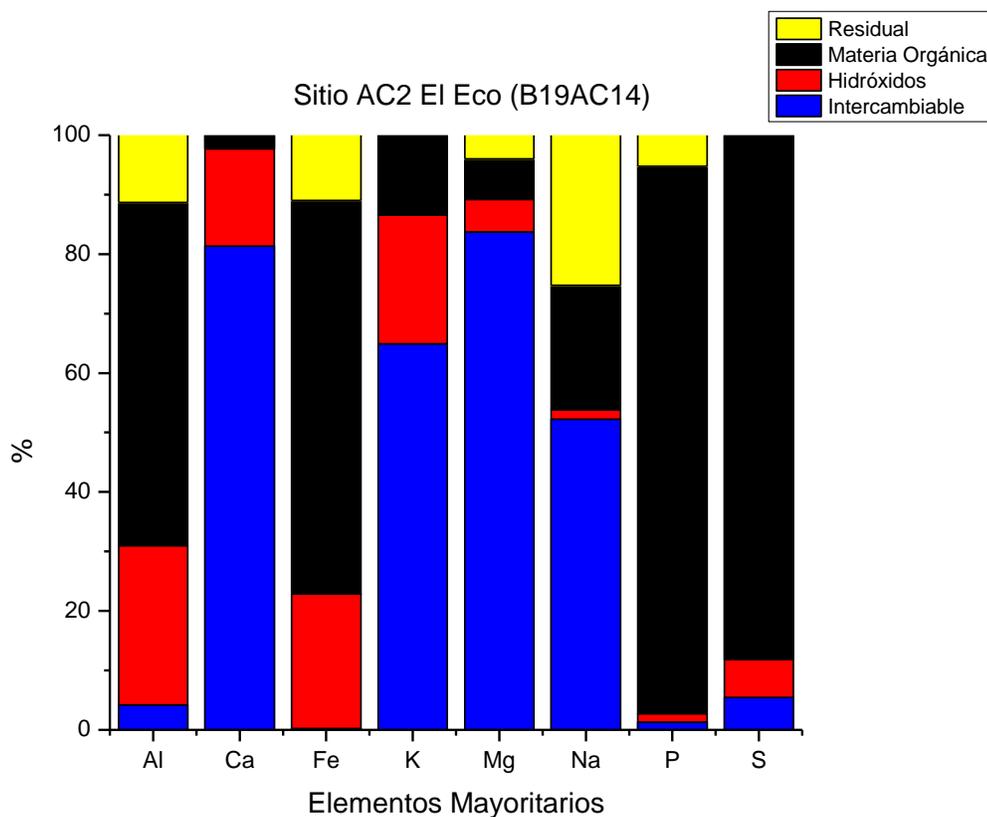
**Figura 28.**-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de µg/kg, en la muestra B19AC13-01, especie *Baccharis conferta*, en el sitio AC2.



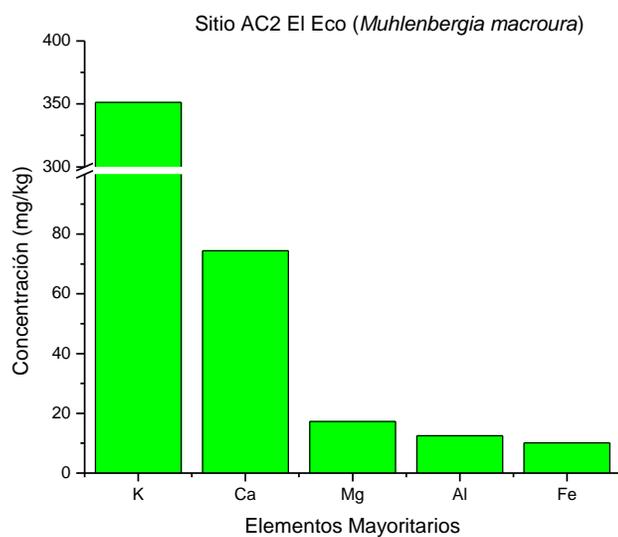
**Figura 29.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de µg/kg, en la muestra B19AC13-02, especie *Muhlenbergia macroura* en el sitio AC2.

Para el perfil de suelo B19 AC14 (Ver Figuras 30 y 33) y los diagramas de las plantas (Ver Figuras 31, 32, 34 y 35), es muy probable que tengan la misma dinámica que el punto anterior dada la cercanía de los puntos entre sí y la dirección de flujo. Solo hay una diferencia en cuanto al Pb, (Ver Figuras 19 y 27), en el sitio 1 San José Corral Blanco (Ver Figura 19) se encuentra en la fase residual, lo que se puede asociar al material

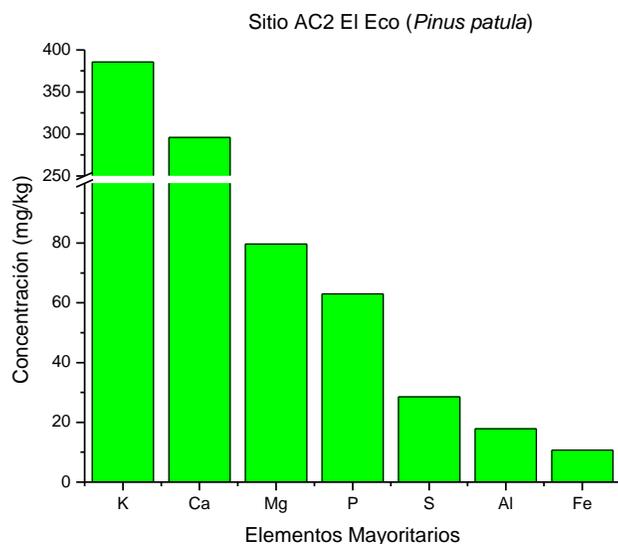
parental del suelo, que en este caso son rocas ígneas ácidas. Para el Zn, Sosa-Ceballos y colaboradores (2018) reconoce la existencia de magmas en la zona con contenido de Zn en su composición, lo cual explica su presencia en la zona.



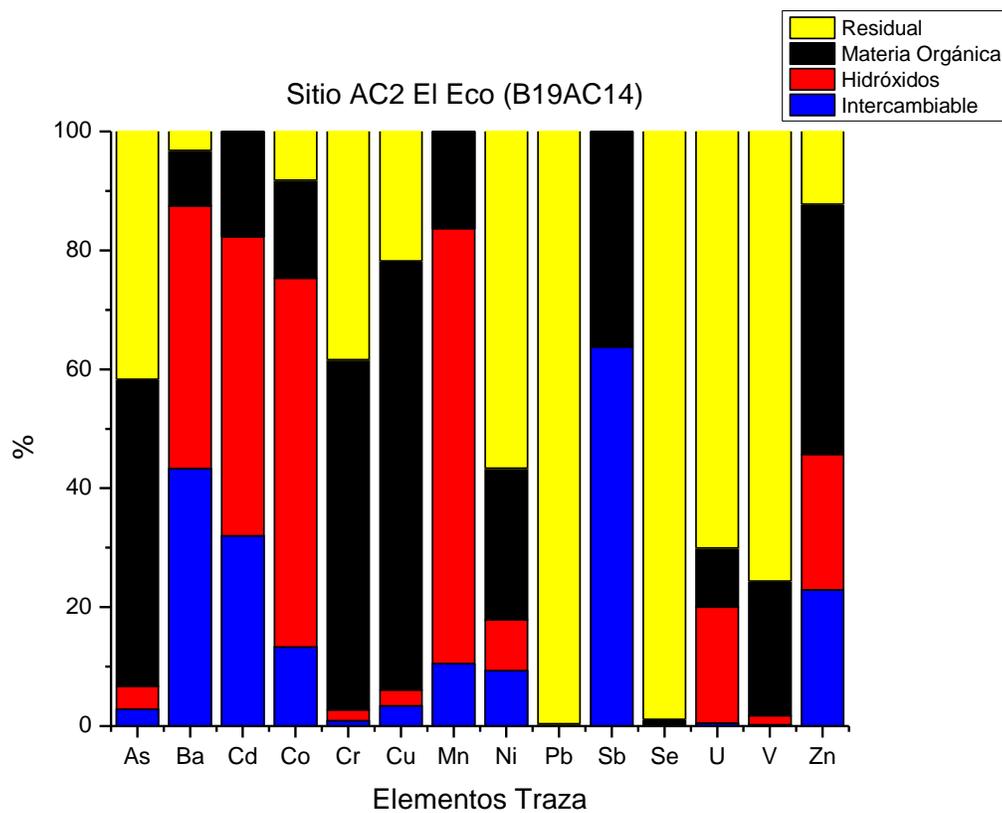
**Figura 30.**-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC2, muestra B19AC14.



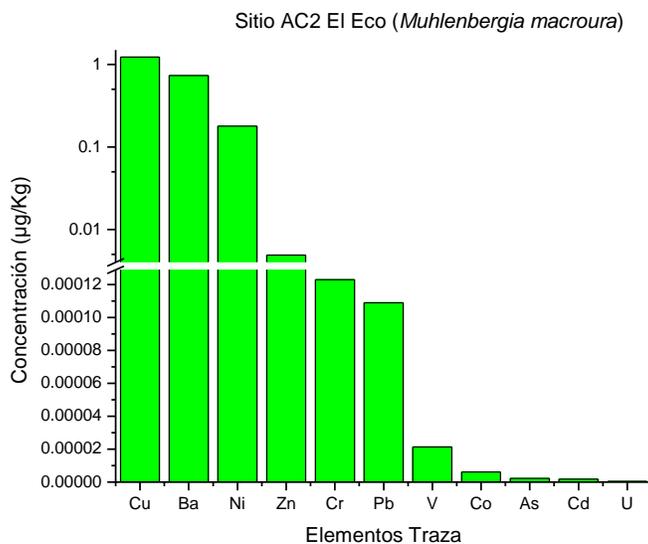
**Figura 31.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC14-01, especie *Muhlenbergia macroura* en el sitio AC2.



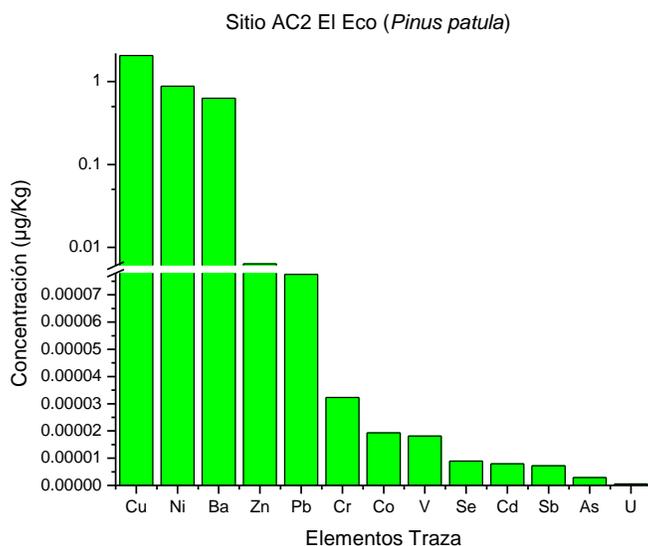
**Figura 32.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC14-02, especie *Pinus patula* en el sitio AC2.



**Figura 33.**-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC2, muestra B19AC14.



**Figura 34.**-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de µg/kg, en la muestra B19AC14-01, especie *Muhlenbergia macroura* en el sitio AC2.



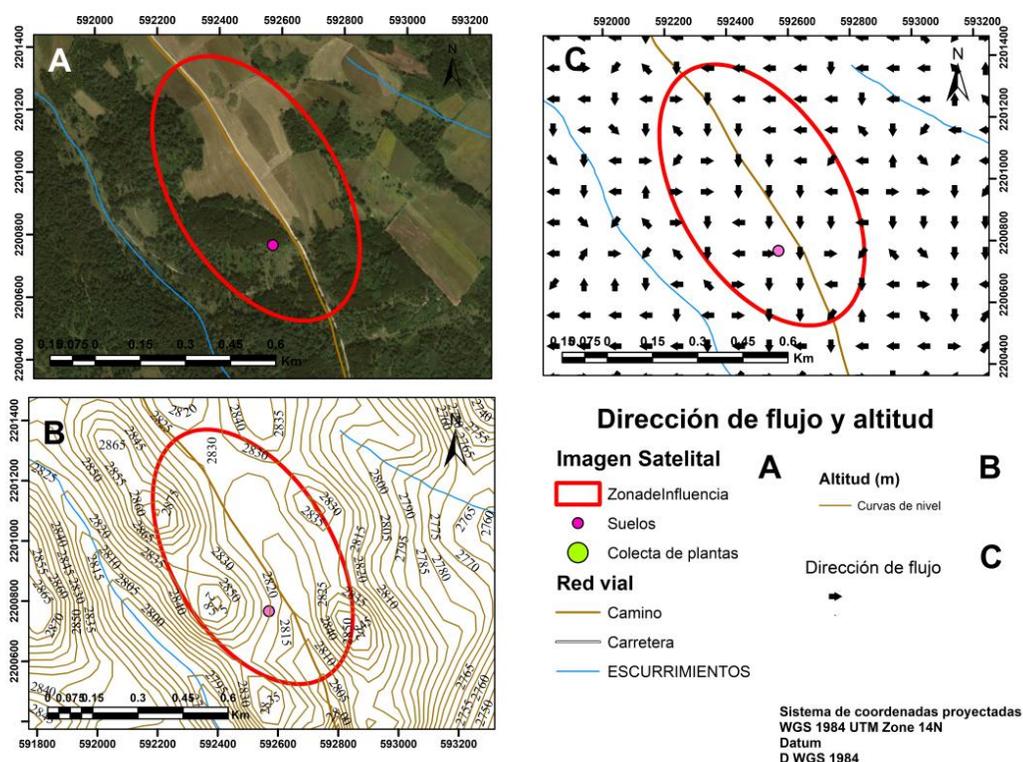
**Figura 35.**-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de µg/kg, en la muestra B19AC14-02, especie *Pinus patula* en el sitio AC2.

### 5.2.3 Sitio AC3 La Gloria

En este sitio se muestreó un perfil de suelo (B19AC19) que fue procesado por extracción secuencial.

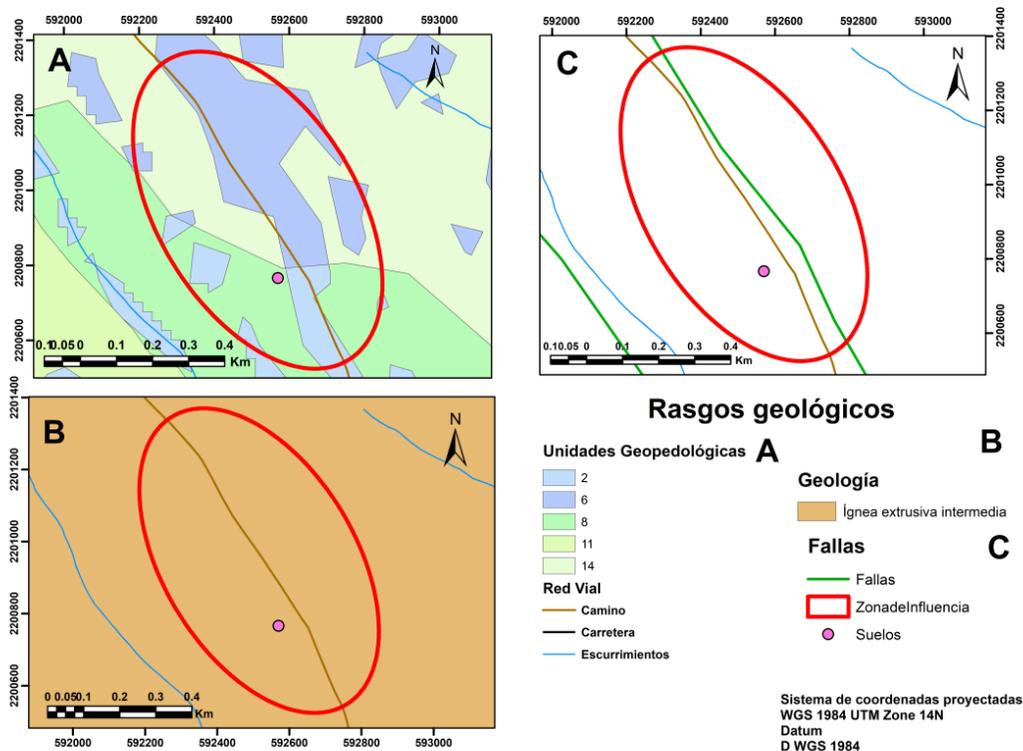
En la figura 36, la sección A muestra la imagen satelital donde se localiza el perfil B19AC19, la cubierta vegetal es poco densa en comparación con la parte suroeste de este mapa que contiene vegetación secundaria y una serie de cultivos dentro de la zona de influencia. La sección B muestra el perfil a 2820

msnm y la sección C muestra la dirección de flujo hacia el sureste. La zona de influencia tiene una longitud de 930 m y un ancho de 530 m.



**Figura 36.-** Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC3.

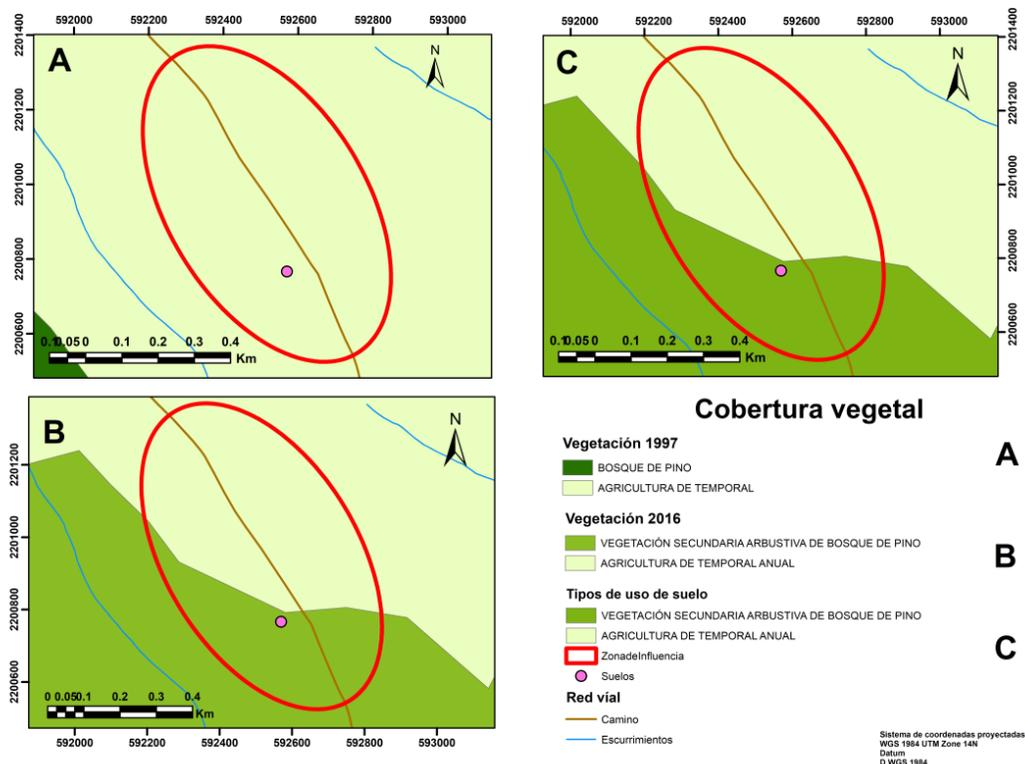
Para el caso de la figura 37 se observa que la sección A muestra que el perfil está en la unidad geopedológica número ocho caracterizada por roca de tipo ígnea extrusiva intermedia, vegetación secundaria arbustiva y bosque de pino-encino y una pendiente entre 10 y 15 grados. Para la sección B se puede ver que la geología es una roca de tipo ígnea extrusiva intermedia y la sección C indica que el perfil está a 118 m de una falla lateral derecha del conjunto de fallas llamada Pedernales.



**Figura 37.-**Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC3.

En la figura 38 se observa que el tipo de vegetación para el año 1997 era agricultura de temporal. La cubierta vegetal para el año 2016 y el tipo de uso de suelo para el año 2018 ganó terreno al suroeste la vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino (sección B y C).

Se presentan en las siguientes tablas las variables relacionadas con la estructura del suelo (*Ver Tabla 16*), las variables fisicoquímicas (*Ver Tabla 17*) y la textura y porcentaje de arcilla, limo y arena (*Ver Tabla 18*) del perfil B19AC19.



**Figura 38.-**Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC3.

**Tabla 16.-** Variables que conforman de la estructura del suelo en el sitio AC3

Perfil	Horizonte	% Rocas	Estabilidad de agregados	Raíces	Densidad aparente	Tasa de infiltración
					mg/m <sup>3</sup>	cm/ha
B19AC19	A1	43	muy alta	muchas	0.63	182.9

**Tabla 17.-** Variables fisicoquímicas en el sitio AC3

Perfil	Horizonte	T	Humedad in situ	Humedad	Carbono orgánico	pH	CE
		°C	%		μS/cm		
B19AC19	A1	13.7	19.8	34.41	8	5.9	70

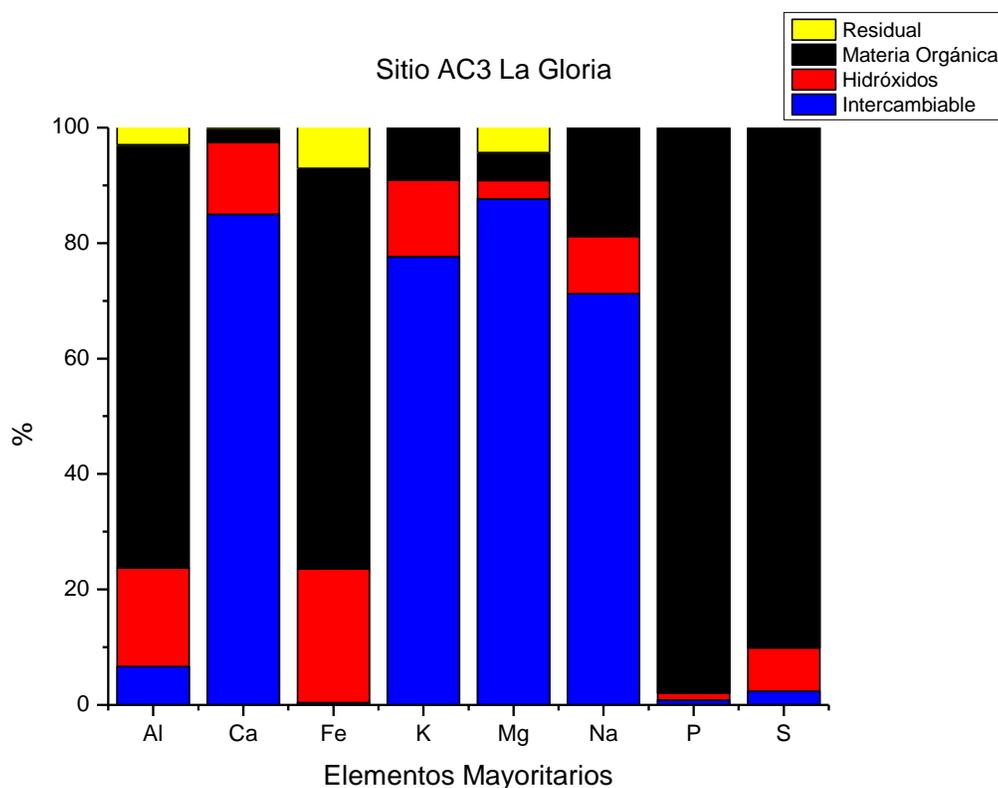
**Tabla 18.-** Textura del suelo en el sitio AC3

Perfil	Horizonte	Textura	Porcentaje (%)		
			Arcilla	Limo	Arena
B19AC19	A1	franca	11.35	40	48.65

Este perfil tiene una conductividad eléctrica menor y una tasa de infiltración más grande que los anteriores, es muy probable que este suelo, drene mucho más rápido debido al porcentaje más bajo de arcilla y la baja densidad aparente del sitio comparado con AC1 y AC2 provocando la pérdida de iones, por lo tanto, la baja conductividad eléctrica (Siebe et al., 1996).

En cuanto a la textura, tiene un porcentaje de arena parecido a los anteriores, AC1 y AC2, pero difiere en la cantidad de limo y arcilla, AC2 tiene un mayor porcentaje que este perfil (*Ver Tablas 9, 12 y 15*). La naturaleza de las arcillas puede hacer que el suelo del perfil AC2 no se drenara tan fácilmente como el AC3 (Domínguez y Schifter, 1992), lo que reduciría la movilidad de los iones y el intercambio de los mismos. Se recomienda hacer un estudio de difracción de rayos x para saber qué tipo de arcillas predominan en el perfil para descartar o aceptar esta posibilidad.

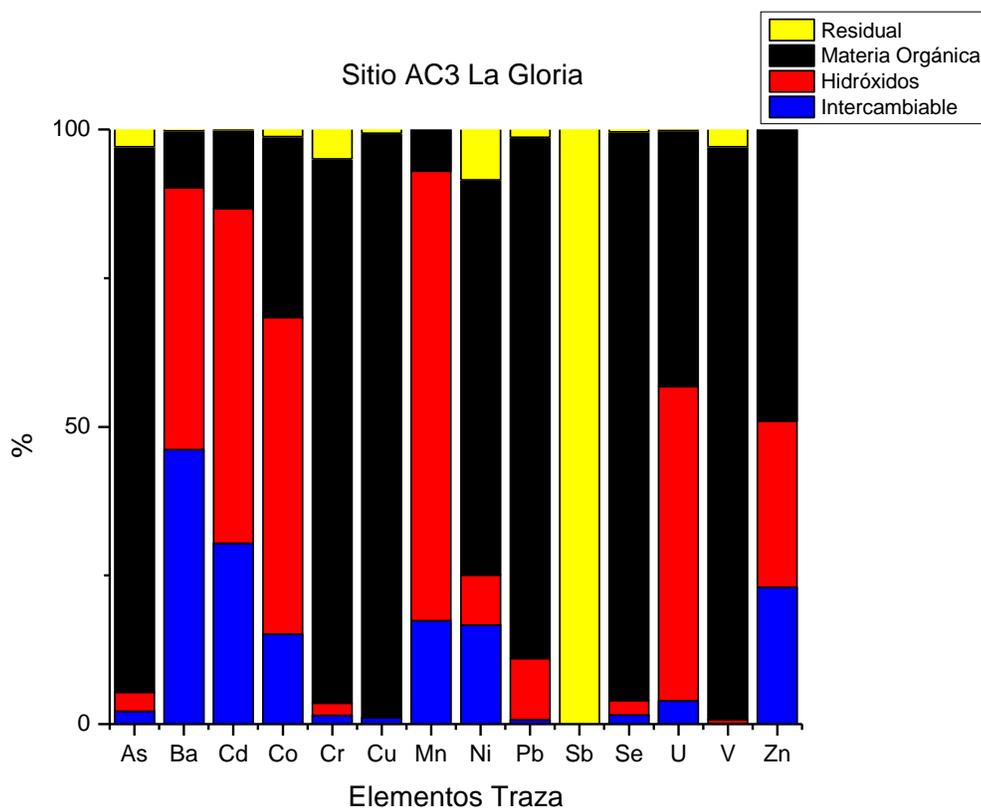
La figura 39 muestra el diagrama de extracción secuencial donde se ven elementos como el Ca, K, Mg y Na en la fracción intercambiable.



**Figura 39.-** Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC3, muestra B19AC19.

En la figura 40 se aprecian elementos como el Ba y Cd en la fase intercambiable. Dentro de la fase de hidróxidos se encuentran los elementos Ba, Cd, Co, Mn y U; en la fase de materia orgánica se encuentra el As, Cr, Cu Ni, Pb Se y Zn y para la fase residual se observan elementos como Se y un pequeño porcentaje de Cr y Ni.

Los elementos traza (*Ver Figura 40*), principalmente Ba, Cd, Co, Mn, U y Zn pueden ser elementos que estén contenidos dentro de las arcillas como iones (Reyes-Cortes et al., 2008; Reyes, 2010). A través de la erosión de las rocas, la formación del suelo y factores ambientales, estos iones pueden pasar a la fracciones intercambiables e hidróxidos, formando otros minerales y de esta manera ser transportados a otros sitios. Según Sosa-Ceballos et al., 2018, las rocas del área contienen alrededor de 300 ppm de Ba y también se encuentran otros elementos como el Cd, Mn, U y Zn.

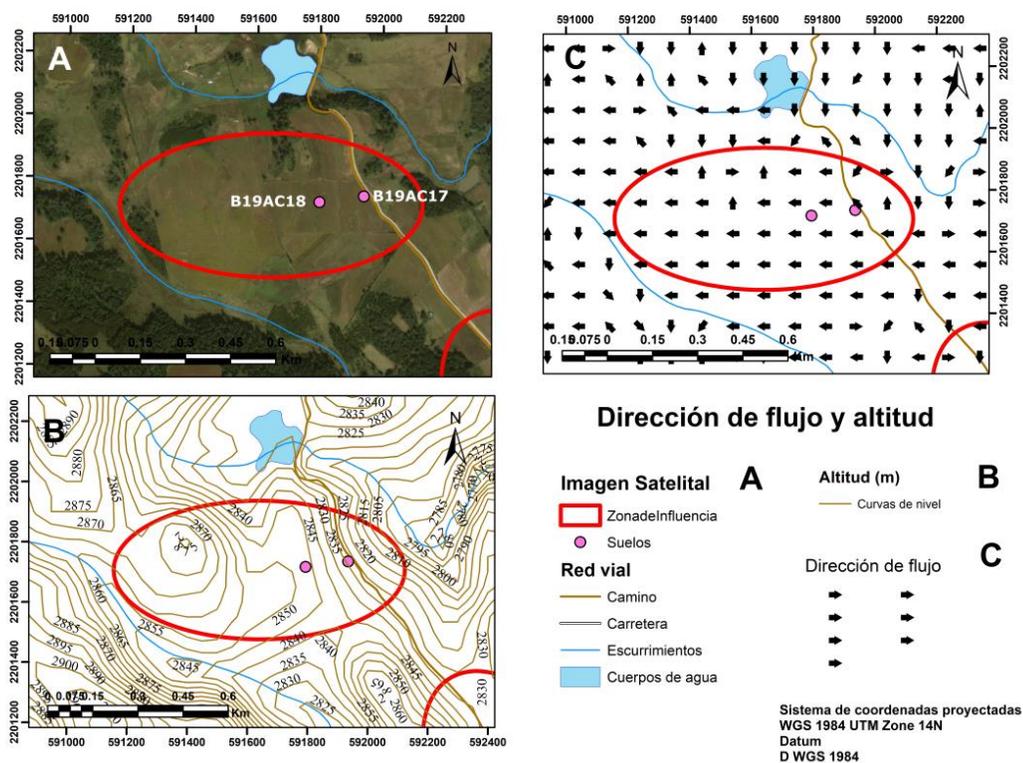


**Figura 40.**-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC3, muestra B19AC19.

#### 5.2.4 Sitio AC4 Cruz Colorada

En este sitio se tienen dos perfiles de suelo B19AC17 y B19AC18, procesados por extracción secuencial.

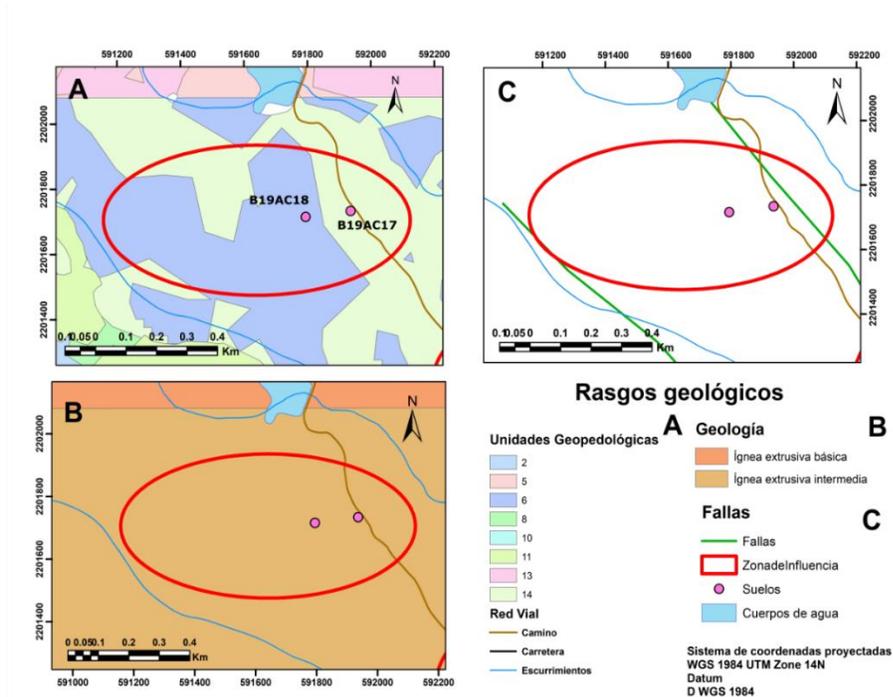
En la sección A de la figura 41 se aprecian que los perfiles B19AC17 y B19AC18 se encuentran sobre una zona de cultivo, en la sección B se ve que el perfil B19AC17 se encuentra entre 2830 msnm, y el perfil B19AC18 se encuentra entre los 1845 y 1850 msnm. En la sección C de la figura se aprecia que la dirección de flujo se marca hacia el oeste. La zona de influencia tiene una longitud de 960 m y un ancho de 460 m, dibujando así una elipse.



**Figura 41.**—Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC4.

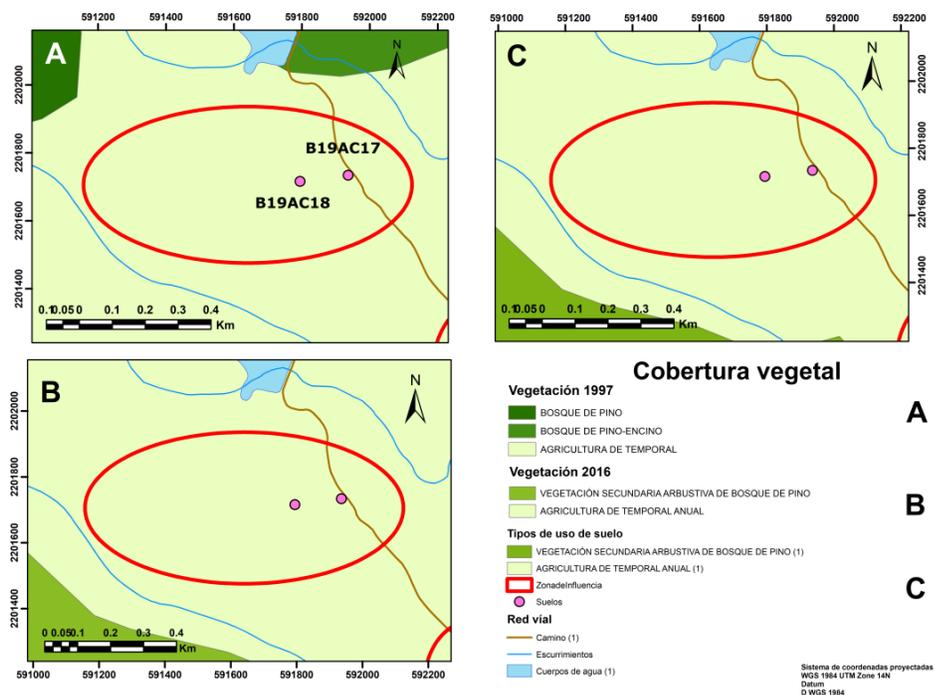
La figura 42 muestra en la sección A las unidades geopedológicas, donde el perfil B19AC17 se ubica sobre la unidad número 17 caracterizada por el tipo de roca ígnea extrusiva intermedia, el tipo de uso de suelo es agricultura de temporal, anual y permanente y una pendiente entre 10 y 15 grados. El perfil B19AC18 se ubica en la unidad número 6 caracterizada por el tipo de roca ígnea extrusiva intermedia, agricultura de temporal, anual y permanente y una pendiente menor a 10 grados.

La geología presente en el lugar es roca ígnea extrusiva intermedia y la falla ubicada al este del perfil B19AC17, dentro de la zona de influencia, es de tipo lateral derecha perteneciente al conjunto de fallas denominada Pedernales. La falla que se encuentra al oeste de la zona de influencia es una falla de tipo lateral derecha perteneciente al conjunto de fallas Cuatelolulco.



**Figura 42.**-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC4.

El mapa de la figura 43, muestra los dos perfiles de suelo, las tres secciones del mapa (A, B y C), se presentan dentro de una zona de cobertura vegetal de tipo agricultura de temporal, sin cambios en los años analizados.



**Figura 43.**-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC4.

En las siguientes tablas se presentan las variables relacionadas con la estructura del suelo (*Ver Tabla 19*), las variables fisicoquímicas (*Ver Tabla 20*), la textura del suelo y porcentaje de arcillas, limo y arena (*Ver Tabla 21*) de los dos perfiles de suelo.

**Tabla 19.-** Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC4

Perfil	Horizonte	% Rocas	Estabilidad de agregados	Raíces	Densidad aparente	Tasa de infiltración
					mg/m <sup>3</sup>	cm/ha
<b>B19AC17</b>	Ap	48	alta	pocas	0.92	4.1
<b>B19AC18</b>	Ap	15	moderada	pocas	0.85	15.9

**Tabla 20.-** Variables fisicoquímicas en el sitio AC4

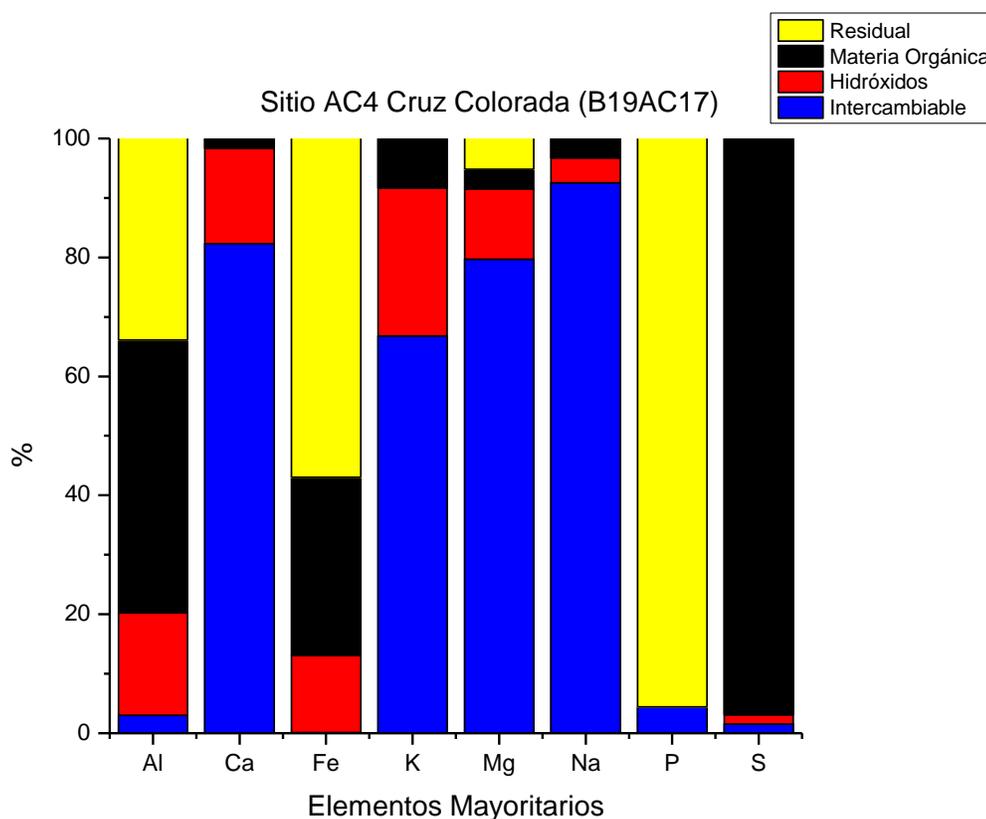
Perfil	Horizonte	T	Humedad in situ	Humedad	Carbono orgánico	pH	CE
		°C	%		μS/cm		
<b>B19AC17</b>	Ap	16.4	33.9	28.7	0.8	5.8	150
<b>B19AC18</b>	Ap	15.5	17	28.81	3.8	6.4	480

**Tabla 21.-** Textura del suelo en el sitio AC4

Perfil	Horizonte	Textura	Porcentaje (%)		
			Arcilla	Limo	Arena
<b>B19AC17</b>	Ap	arcillosa	54.95	20	25.05
<b>B19AC18</b>	Ap	franco arcilloso	38.85	27.5	33.65

En el sitio Cruz Colorada, para la fracción intercambiable del suelo B19AC17 los elementos mayoritarios en mayor concentración encontrados son los elementos Ca, K, Mg y Na. La fase de hidróxidos está representada por un pequeño porcentaje de Ca, Fe, K y Mg. Por otro lado, la materia orgánica contiene elementos como Fe, K, S y la parte residual está compuesta por elementos como el Fe, P y un pequeño porcentaje de Mg (*Ver Figura 31*).

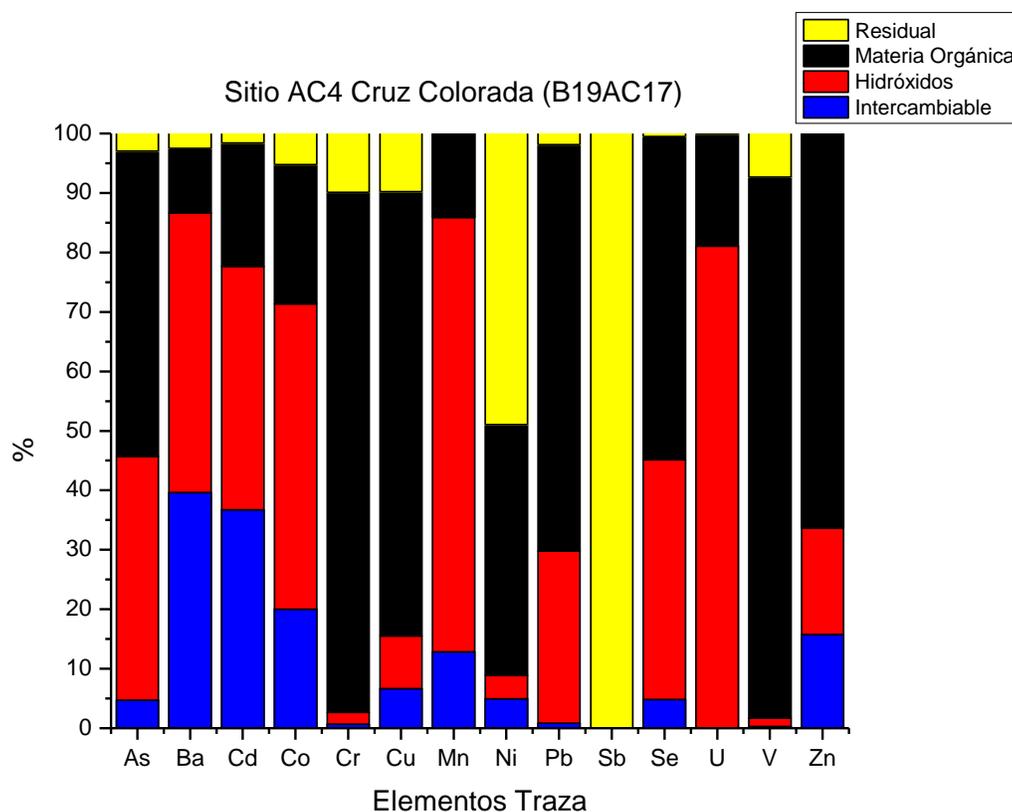
Para este sitio (*Ver Figura 44*) se observa que elementos como Al y Fe se encuentran en la fase residual, estos son elementos que se encuentran dentro de las rocas (Tarbuck y Lutgens, 2005), por lo tanto son elementos que no están disponibles en tiempos relativamente cortos para las plantas o el transporte en iones (Tessier et al., 1979a). A diferencia de los puntos anteriores en este sitio Al y Fe se encuentran mpas en esta fase residual, así como el P.



**Figura 44.**-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC4, muestra B19AC17.

Dentro de la fracción de elementos traza identificados en el sitio AC4 los elementos contenidos en la fracción intercambiable con el mayor porcentaje son Ba, Cd, Co y Zn. La fracción conformada por los hidróxidos tiene elementos como el As, Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Pb, Se, U y Zn, la materia orgánica está conformada por elementos como As, Cr, Cu, Pb, Se, V y Zn y finalmente los elementos como el Ni y Sb conforman la parte residual (Ver Figura 45).

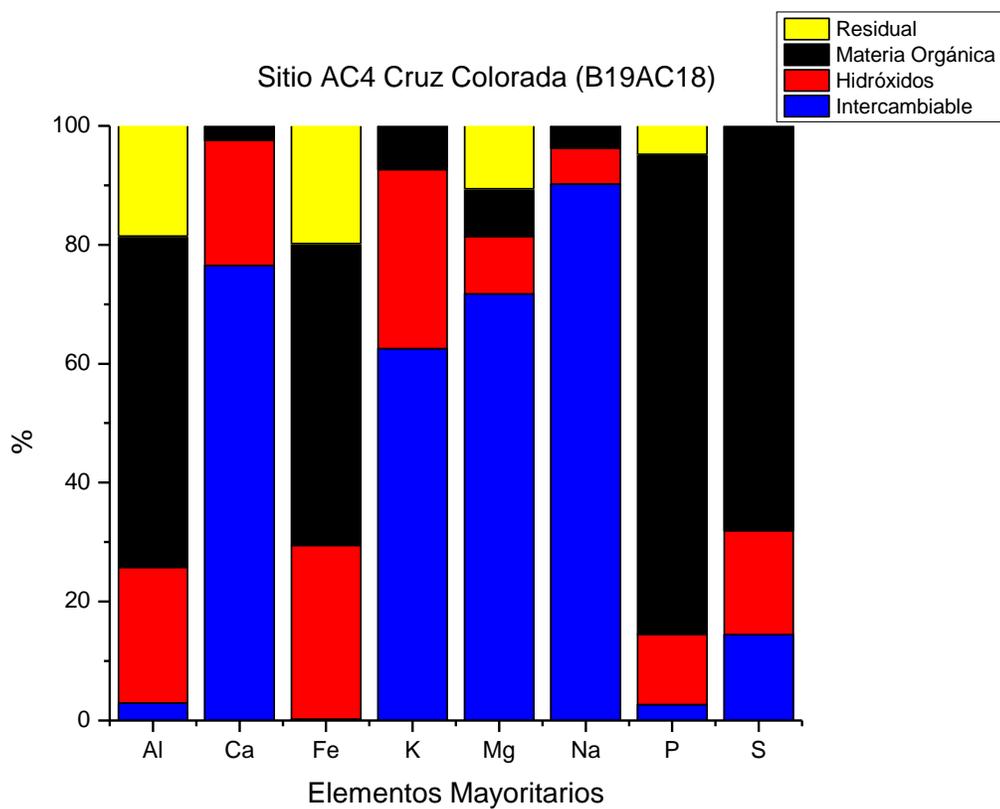
Al igual que en los perfiles AC3 y para los puntos B19AC17 y 18 (Ver Figuras 45 y 46). Los elementos traza Ba, Cd y Co se encuentran en las fracciones intercambiables e hidróxidos, lo que los hace más susceptibles a la movilización. Al estar en forma de iones en la fracción intercambiable estos pueden ser aprovechados por las plantas y ser bioacumulados (Llatance et al., 2018). Estos dos perfiles se encuentran sobre rocas de tipo ígneas extrusiva intermedias (Ver Figuras 38 y 42) por tanto la composición del suelo y los procesos que están ocurriendo son muy similares.



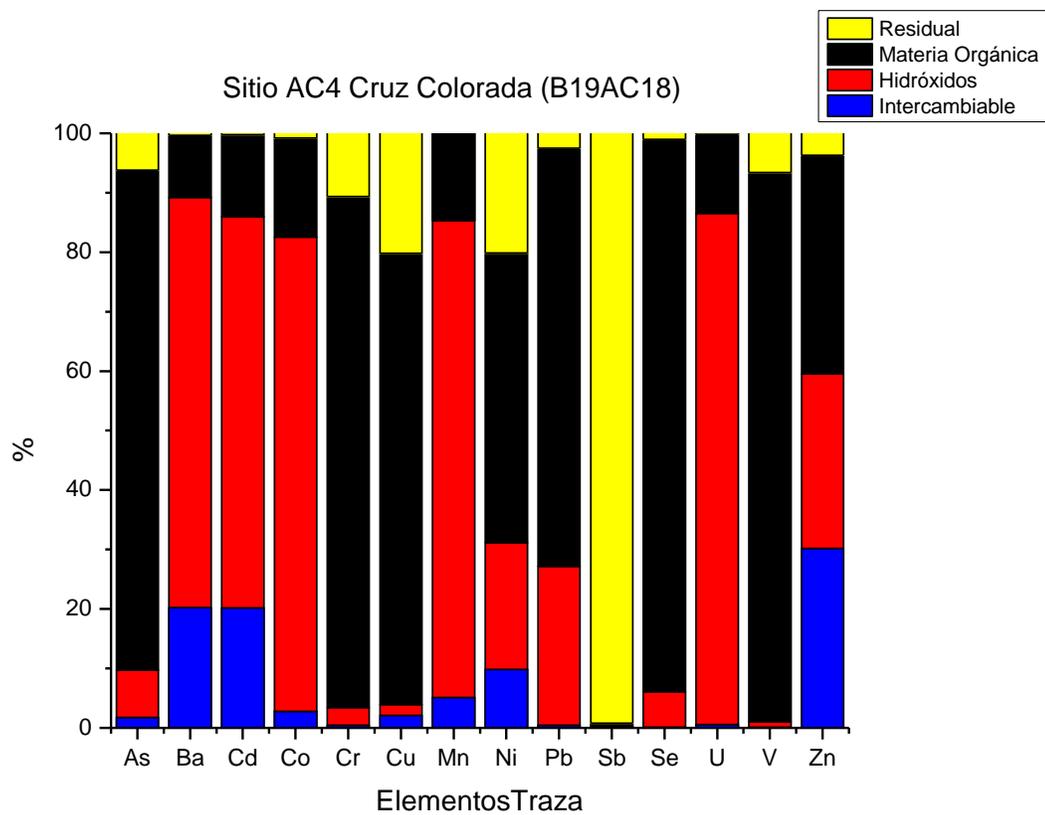
**Figura 45.-** Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC4, muestra B19AC17

En los elementos mayoritarios para la fracción intercambiable del suelo B19AC18 en el sitio Cruz Colorada se encuentran en mayor porcentaje Ca, K, Mg y Na, la fase de hidróxidos está representada por un pequeño porcentaje de Ca, Fe, K, Mg, P y Na, la materia orgánica contiene elementos como Fe, P y la parte residual está compuesta por elementos como el Fe, Mn y P (Ver Figura 46).

Dentro de la fracción de elementos traza para el suelo B19AC18 del sitio AC4, los elementos contenidos en la fracción intercambiable con el mayor porcentaje son Ba, Cd y Zn, la fracción conformada por los hidróxidos tiene elementos como Ba, Cd, Co, Mn, Ni, Pb, U y Zn, la materia orgánica está conformada por elementos como As, Cr, Cu, Ni, Pb, Se, V y Zn, finalmente, los elementos como el As, Cr, Cu, Ni, Sb, son elementos que conforman la parte residual (Ver Figura 47).



**Figura 46.**-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC4, muestra B19AC18.

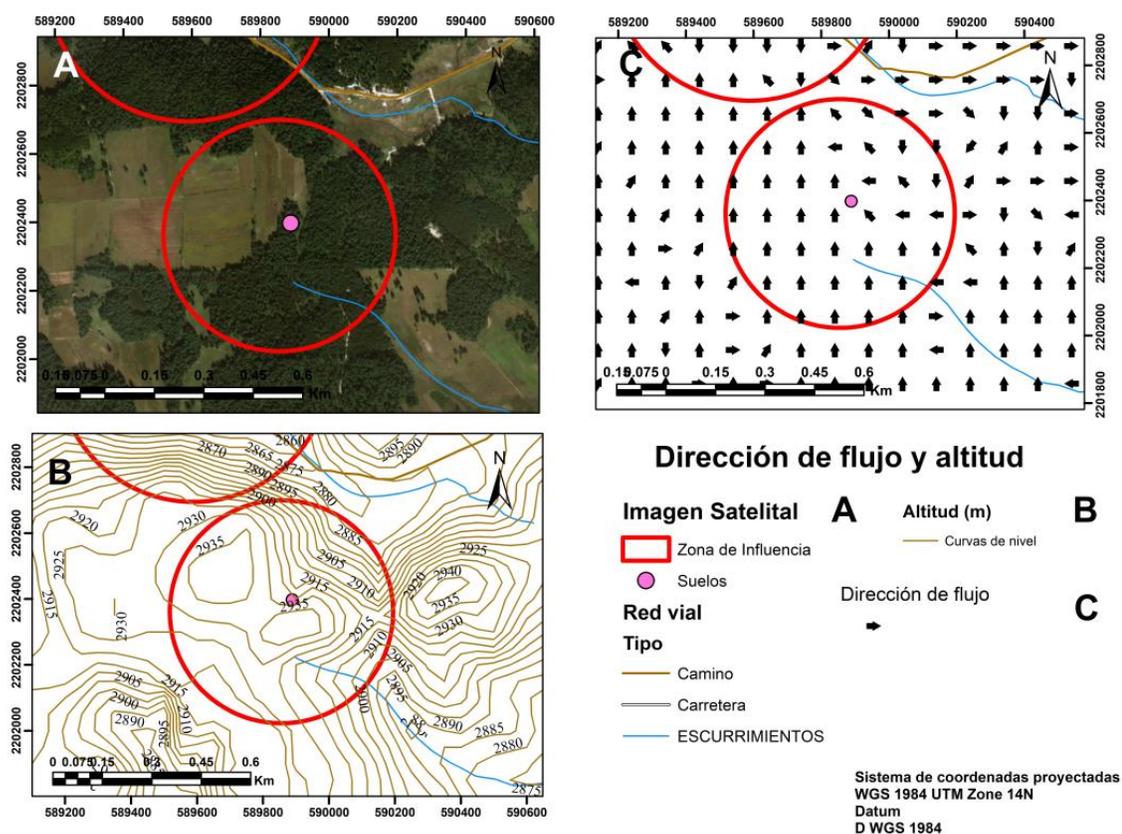


**Figura 47.**-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC4, muestra B19AC18

## 5.2.5 Sitio AC5 Terrerillos

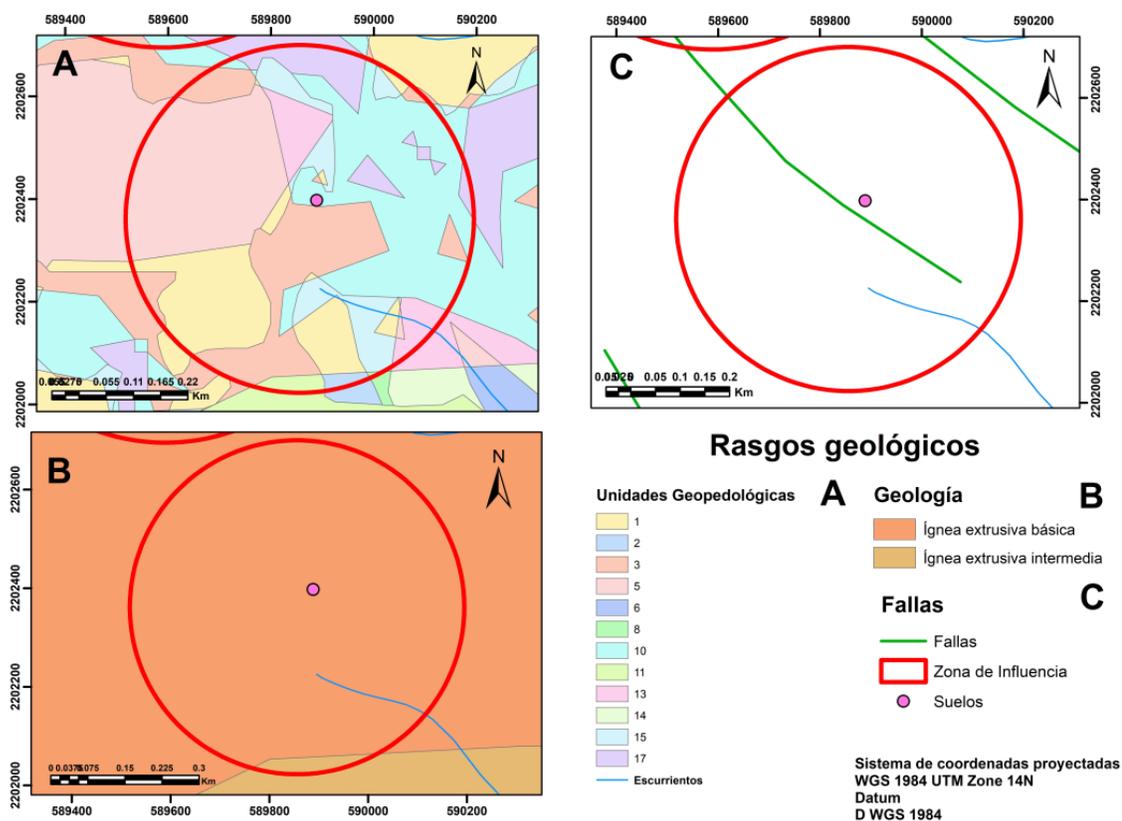
En este sitio se muestreó un perfil de suelo B19AC20, procesado por extracción secuencial.

En la sección A de la figura 48 se encuentra el perfil de suelo B19AC20, ubicado en una zona de bosque y dentro de la zona de influencia también se encuentra una zona de agricultura. La sección B del perfil indica qué se encuentra a una altura de 2935 msnm y la sección C, indica una dirección de flujo hacia el norte. La zona de influencia tiene un diámetro de 670 m.



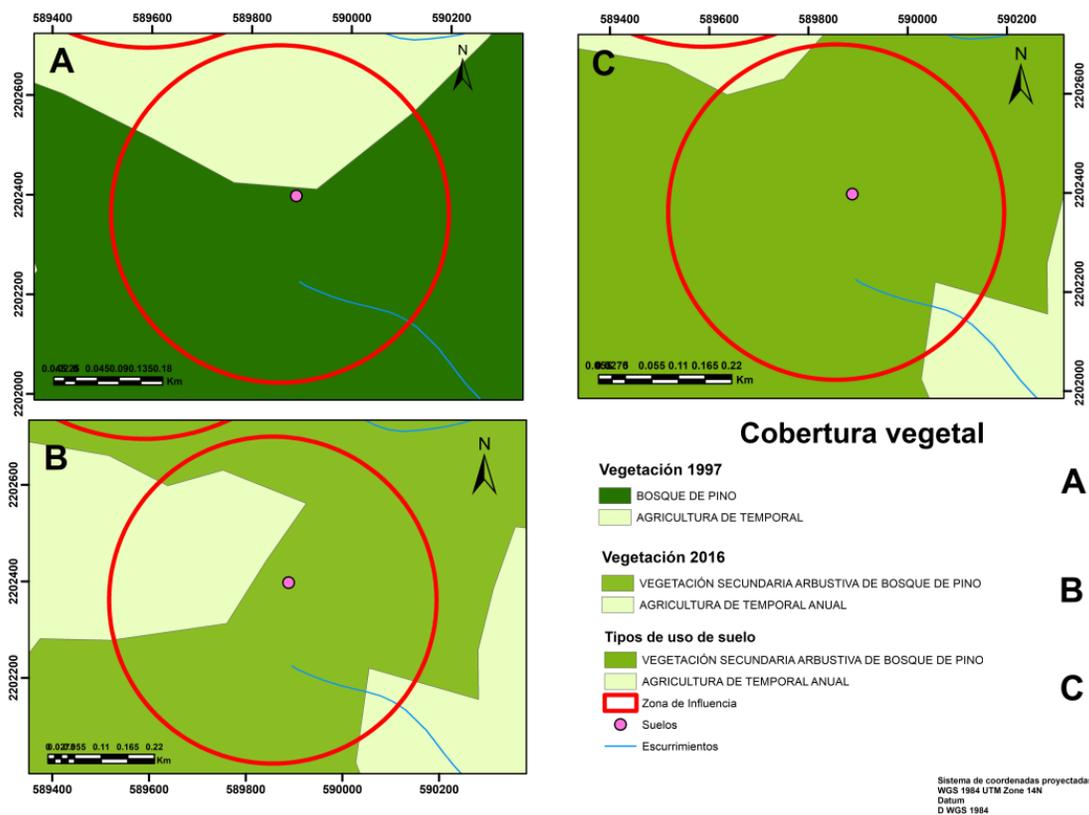
**Figura 48.**-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC5.

La figura 49 muestra el perfil sobre la unidad geopedológica número 10 caracterizada por roca ígnea extrusiva básica, la vegetación de pino y la pendiente entre 10 y 15 grados. Dentro de la zona de influencia existe una falla lateral derecha perteneciente al conjunto de fallas llamadas Pedernales.



**Figura 49.-**Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC5.

En la figura 50 se observa la vegetación para el año 1997 de tipo bosque de pino y para el año 2016 cambió a vegetación secundaria de bosque de pino, al igual que para el año 2018, como ya se comentó anteriormente estos cambios de uso de suelo se deben a las actividades realizadas por los habitantes tanto de agricultura o de ganadería y algunos de estos terrenos se rotan o se dejan descansar por temporadas para que el suelo siga produciendo.



**Figura 50.-** Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC5.

En las siguientes tablas se muestran las variables relacionadas con la estructura del suelo (Ver Tabla 22), las variables fisicoquímicas (Ver Tabla 23) y la textura (Ver Tabla 24) del perfil B19AC20.

**Tabla 22.-** Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC5

Perfil	Horizonte	% Rocas	Estabilidad de agregados	Raíces	Densidad aparente	Tasa de infiltración
					mg/m <sup>3</sup>	cm/ha
B19AC20	Ah	51	muy alta	muchas	0.57	87.6

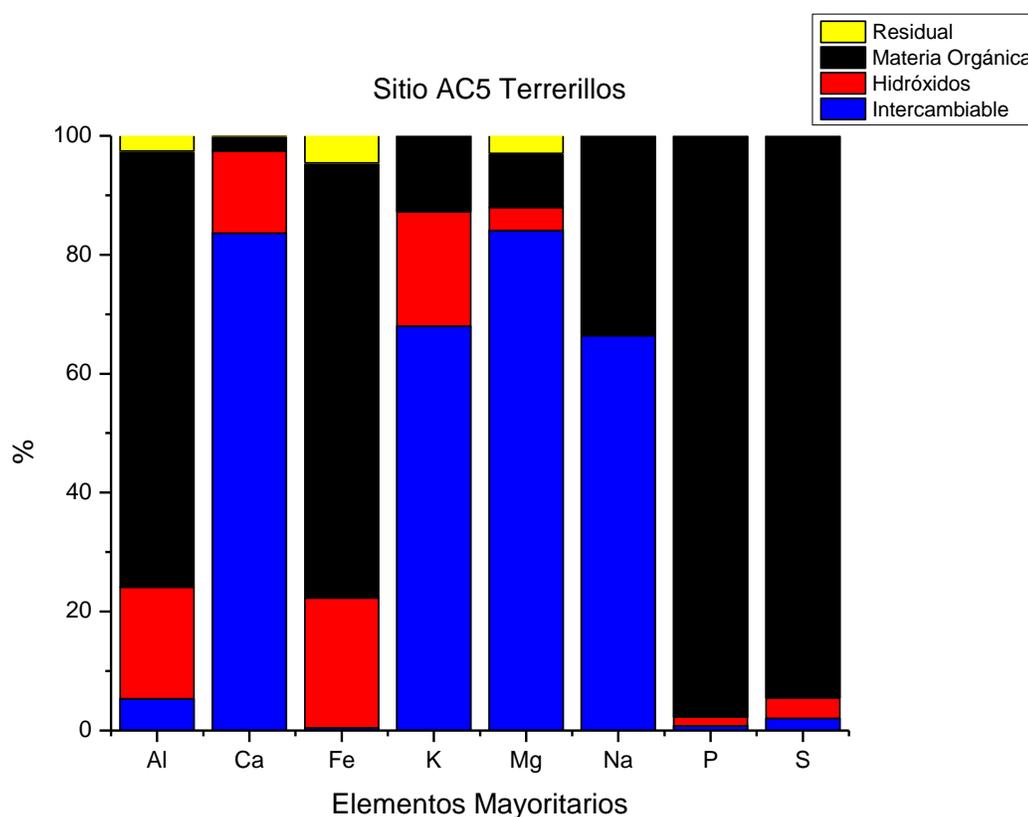
**Tabla 23.-** Variables fisicoquímicas en el sitio AC5

Perfil	Horizonte	T	Humedad in situ	Humedad	Carbono orgánico	pH	CE
		°C	%				μS/cm
B19AC20	Ah	11.3	14.7	40.91	9.3	6.4	100

**Tabla 24.-** Textura del suelo en el sitio AC5

Perfil	Horizonte	Textura	Porcentaje (%)		
			Arcilla	Limo	Arena
<b>B19AC20</b>	Ah	franco limosa	11.35	60	28.65

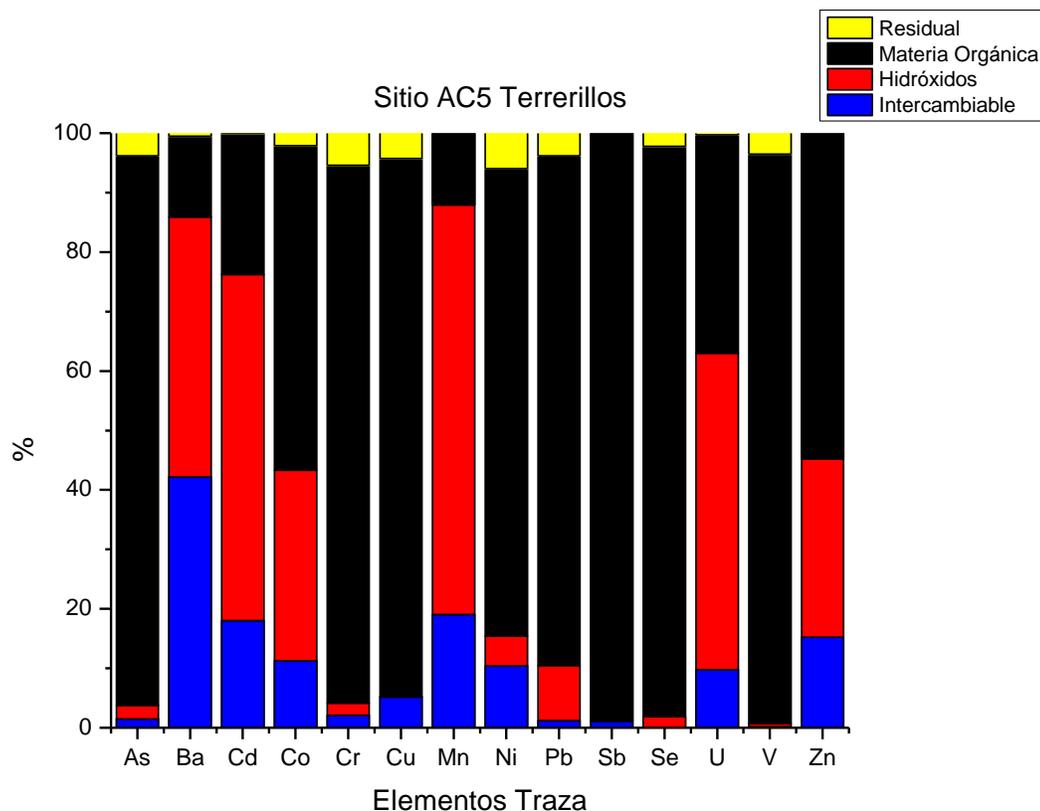
La figura 51 muestra que los elementos con mayor porcentaje de la fracción intercambiable son Ca, K, Mg y Na; la fracción de hidróxidos está representada por una pequeña fracción de los elementos Ca, Fe y K; la materia orgánica está conformada principalmente por el Fe, Na, P y S y la fracción residual contienen elementos como Fe y Mn.



**Figura 51.-**Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC5, muestra B19AC20.

Este perfil de suelo, es muy similar a los anteriores en cuanto a los resultados de extracción secuencial, tanto para los elementos traza como para los elementos mayoritarios. Por tanto, es muy probable que estén sucediendo mecanismos de transporte para elementos, similares al sitio AC4. La diferencia radica en que este perfil es que está sobre rocas ígneas extrusiva básicas, siendo estas rocas ricas en calcio (Tarbuck y Lutgens, 2005) (Ver Figura 45).

La figura 52 muestra que la fase intercambiable está representada por un bajo porcentaje de los elementos Ba, Cd, Co, Mn, U y Zn, la fase de hidróxidos contienen un porcentaje considerable de elementos como Ba, Cd, Co, Mn, U y Zn; la materia orgánica es la que más prevalece en este perfil con elementos como As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Se U, V y Zn y la fase residual se encuentra poco representada en este perfil por elementos como As, Cr y Ni.



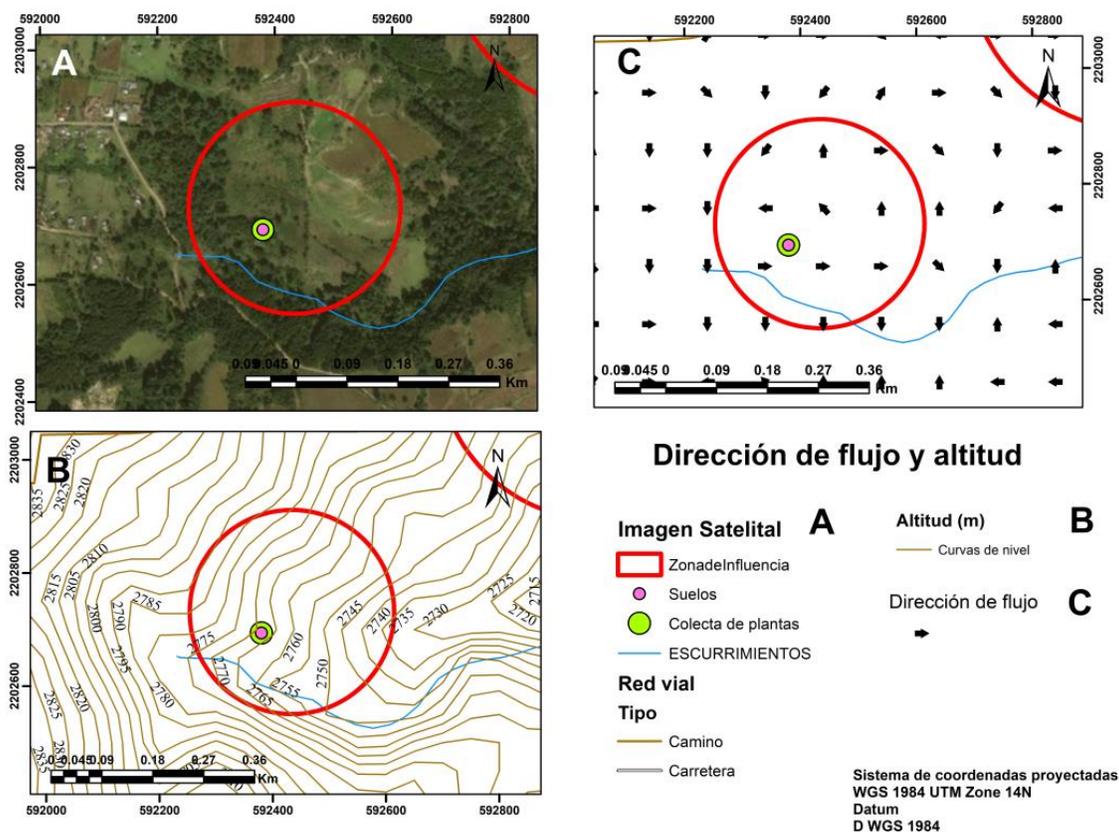
**Figura 52.-** Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC5, muestra B19AC20.

### 5.2.6 Sitio AC6 La Cañada

En este sitio se tienen la muestra de suelo, B19AC15 procesada por extracción secuencial y tres muestras de vegetación, B19AC15-01 (*Baccharis conferta*), B19AC15-02 (*Pinus patula*) y B19AC15-03 (*Muhlenbergia macroura*), procesadas por digestión ácida.

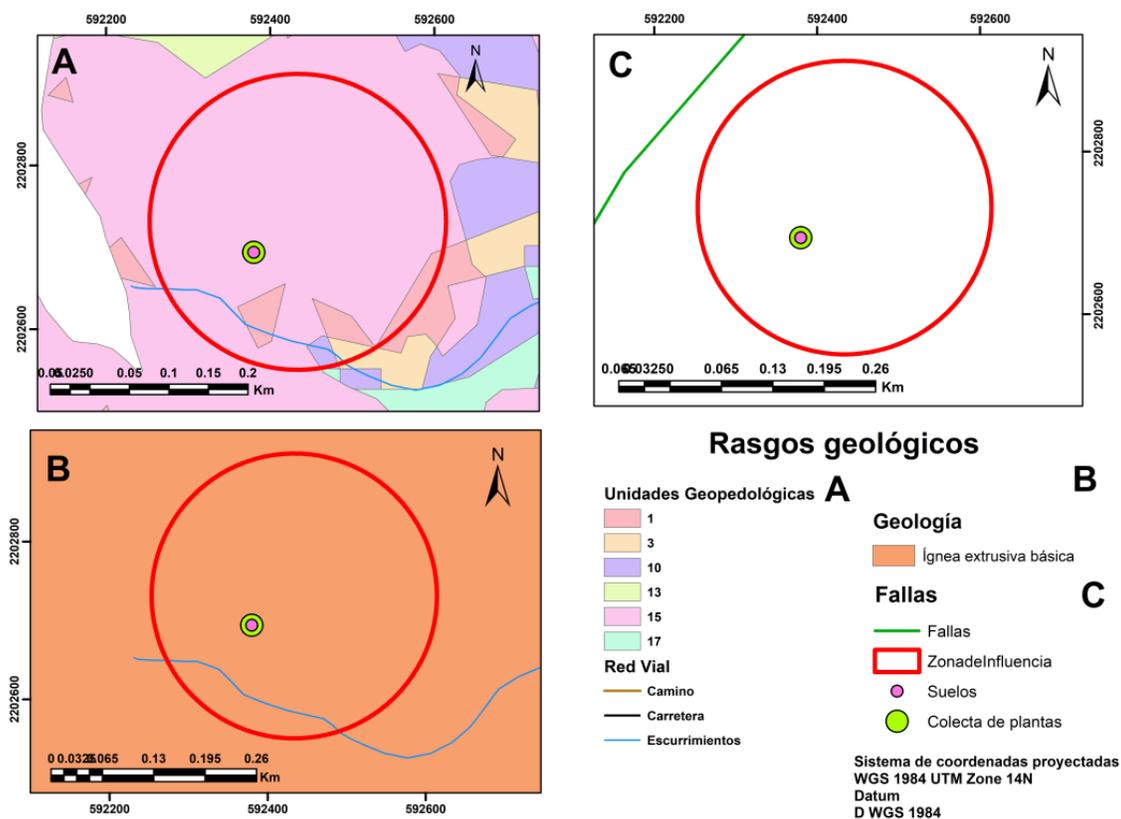
De acuerdo con figura 53, la sección A muestra el perfil de suelo ubicado cerca de una zona de escurrimiento de agua superficial, una pequeña zona urbana y algunos campos de cultivo intercalados con manchones de vegetación, la sección B del mapa muestra que el sitio se encuentra entre 2765 y 2770

msnm y en la sección C se puede apreciar que la dirección de flujo es un poco errática. La zona de influencia tiene un diámetro de 360 m.



**Figura 53.-**Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC6.

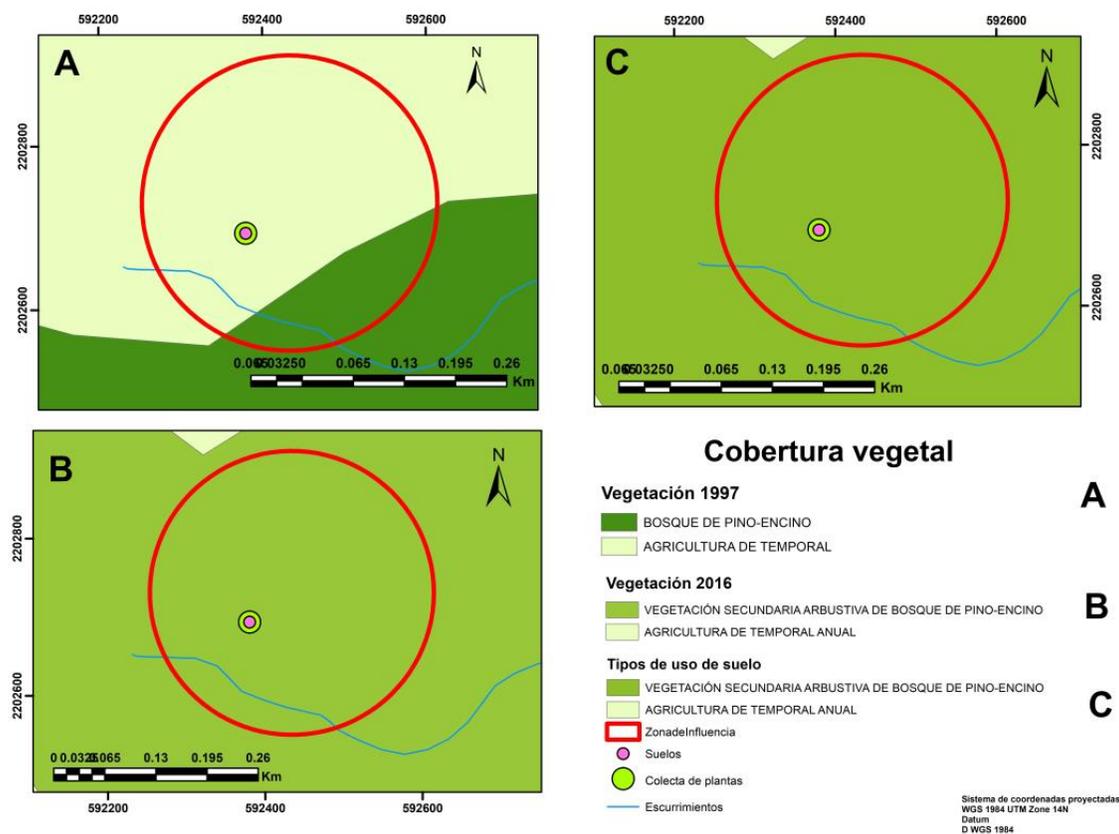
El mapa en la sección A de la figura 54 muestra el perfil situado sobre la unidad geopedológica quince, caracterizada por estar sobre roca ígnea extrusiva básica, vegetación secundaria arbustiva y una pendiente mayor a 15 grados. La sección B muestra la geología de tipo ígnea extrusiva básica y en la sección C, muestra la falla más cercana, la cual es de tipo normal perteneciente al conjunto de fallas llamada Los Azufres, localizada fuera de la zona de influencia a 220 m de distancia del perfil de suelo.



**Figura 54.-** Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC6.

En la sección A de la figura 55 se presenta la cubierta vegetal para el año 1997 siendo una zona de agricultura de temporada. Para los años 2016 y 2018 (secciones B y C) la cubierta vegetal era de tipo vegetación secundaria arbustiva de pino-encino.

Se presentan a continuación tres tablas que representan las variables medidas con relación a la estructura del suelo (*Ver Tabla 25*) propiedades fisicoquímicas (*Ver Tabla 26*) y la textura (*Ver Tabla 27*) del perfil de suelo.



**Figura 55.-** Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio ACIII.

**Tabla 25.-** Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC6

Perfil	Horizonte	% Rocas	Estabilidad de agregados	Raíces	Densidad aparente	Tasa de infiltración
					mg/m <sup>3</sup>	cm/ha
B19AC15	A	30	muy alta	abundantes	0.62	344.8

**Tabla 26.-** Variables fisicoquímicas en el sitio AC6

Perfil	Horizonte	T	Humedad in situ	Humeda	Carbono orgánico	pH	CE
		°C	%				μS/cm
B19AC15	A	13.1	13.5	40.59	4.4	5.9	30

Tabla 27.- Textura del suelo en el sitio AC6

Perfil	Horizonte	Textura	Porcentaje (%)		
			Arcilla	Limo	Arena
B19AC15	A	franca	1.35	60	38.65

Para este perfil no fue posible obtener la fase residual debido a complicaciones en el laboratorio. Los resultados de la figura 56, muestran que los elementos con un porcentaje mayor de la fase intercambiable son Ca, K, Mg y Na; para la fracción de hidróxidos los elementos con un mayor porcentaje son Ca, Fe y K, para la materia orgánica el mayor porcentaje de los elementos que la conforman son Fe, P y S.

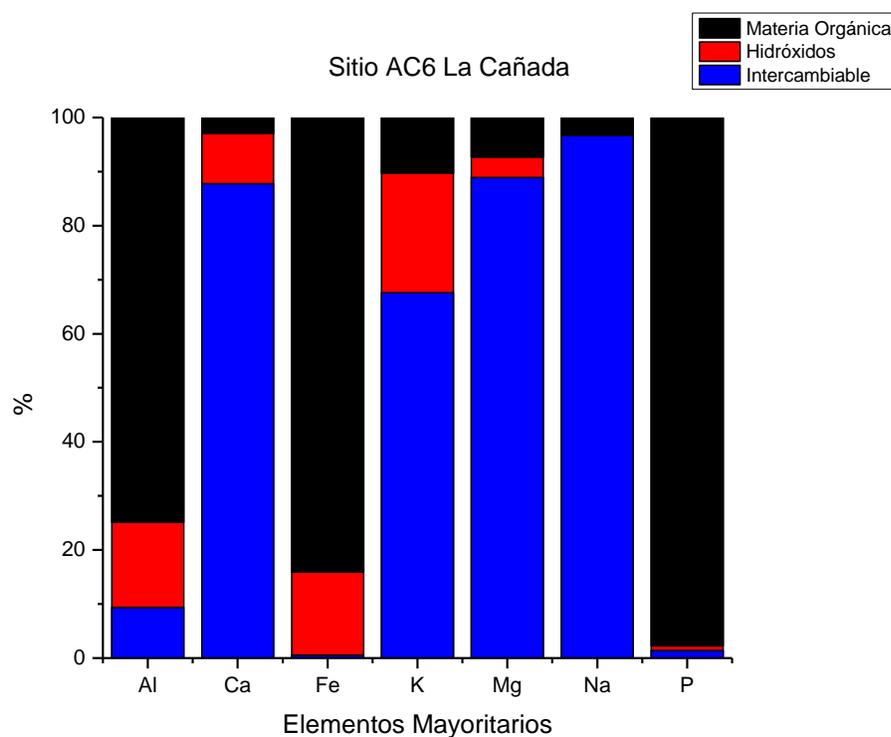
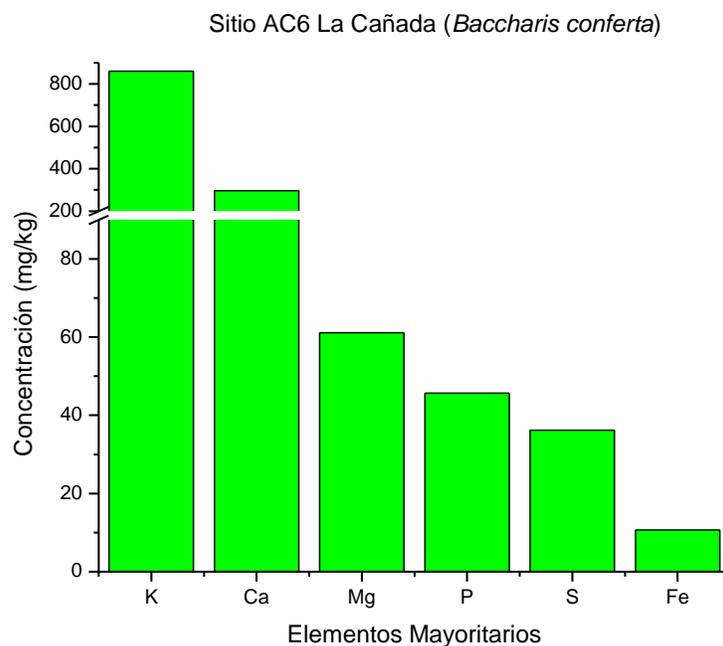
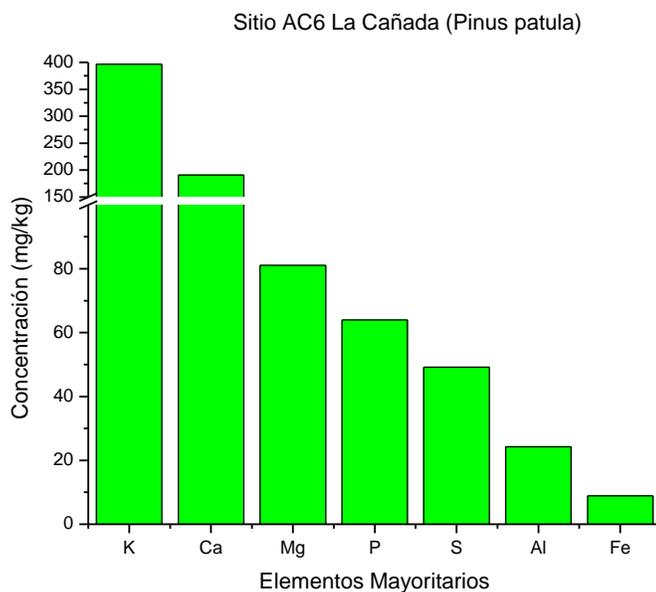


Figura 56.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC6, muestra B19AC15.

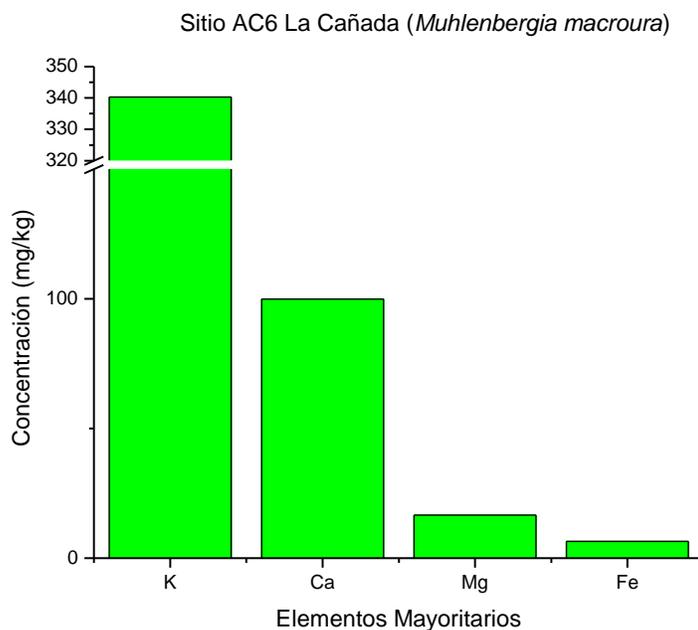
Se puede ver que, para las tres especies de plantas, *Baccharis conferta* ( Ver Figura 57), *Pinus patula* (Ver Figura 58) y *Muhlenbergia macroura* (Ver Figura 59), el elemento mayoritario más abundante es K y el elemento menos abundante es el Fe.



**Figura 57.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC15-01, especie *Baccharis conferta* en el sitio AC6.

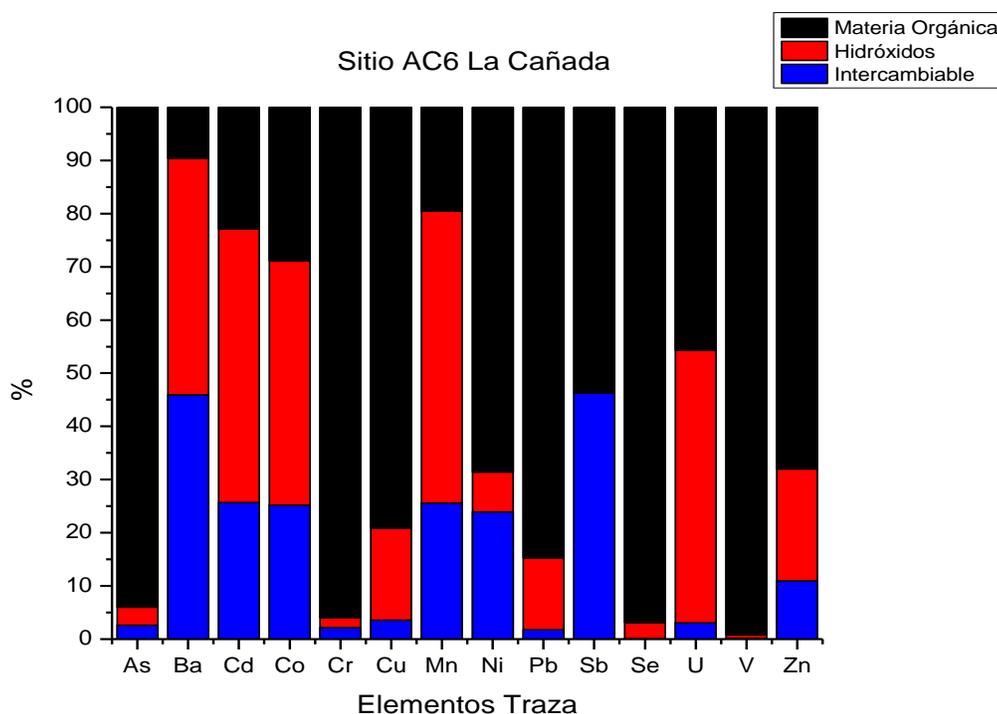


**Figura 58.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC15-02, especie *Pinus Patula* en el sitio AC6.



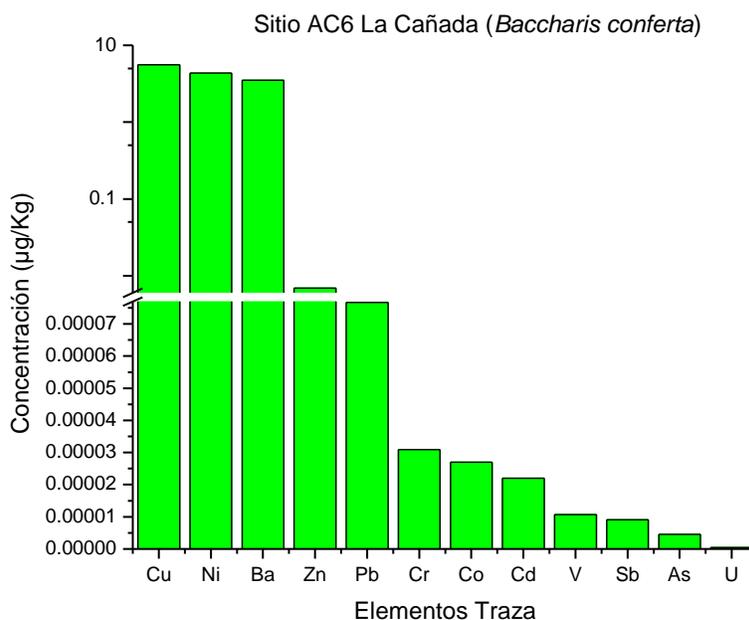
**Figura 59.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC15-03, especie *Muhlenbergia macroura* en el sitio AC6.

La figura 60 muestra que la fase intercambiable está representada por los elementos Ba, Cd, Co, Mn, Ni, Sb y Zn; la fase de hidróxidos contiene un porcentaje considerable de elementos como Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Pb, U y Zn. La materia orgánica es la que más prevalece en este perfil con elementos como As, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Se, U, V y Zn, con un patrón consistente con los anteriores sitios AC3, AC4 y AC5.

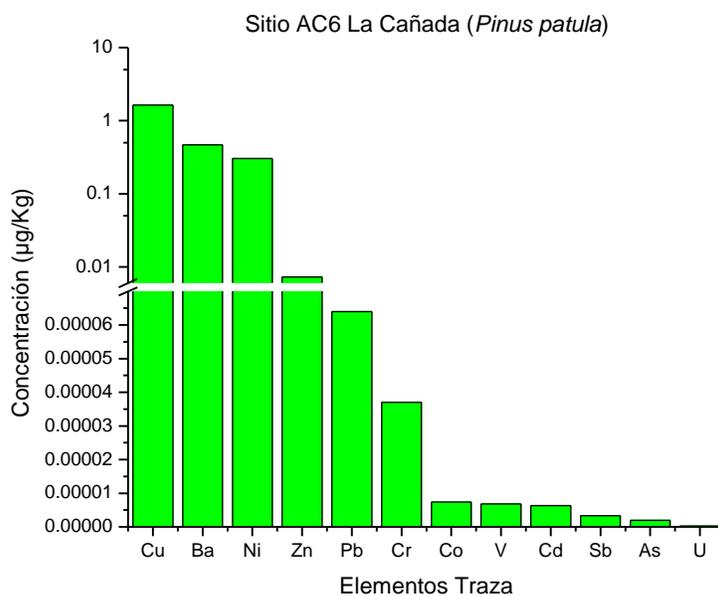


**Figura 60.**-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC6, muestra B19AC15.

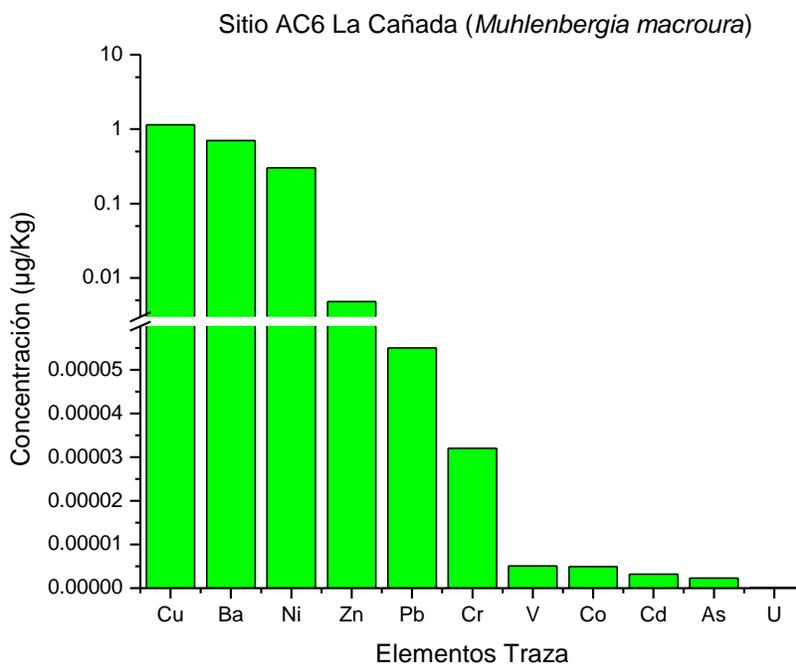
Se observa que, para las tres especies de plantas, *Baccharis conferta* (Ver Figura 61), *Pinus patula* (Ver Figura 62) y *Muhlebergia macroura* (Ver Figura 63), el elemento traza más abundante es el Cu y el menos abundante el U. Es muy probable que los elementos que están tomando las plantas del ambiente estén en formas iónicas (Morales y Sepúlveda-Jiménez, 2012).



**Figura 61.**–Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de µg/kg, en la muestra B19AC15-01, especie *Baccharis conferta* en el sitio AC6.



**Figura 62.**–Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de µg/ kg, en la muestra B19AC15-02, especie *Pinus Patula* en el sitio AC6.

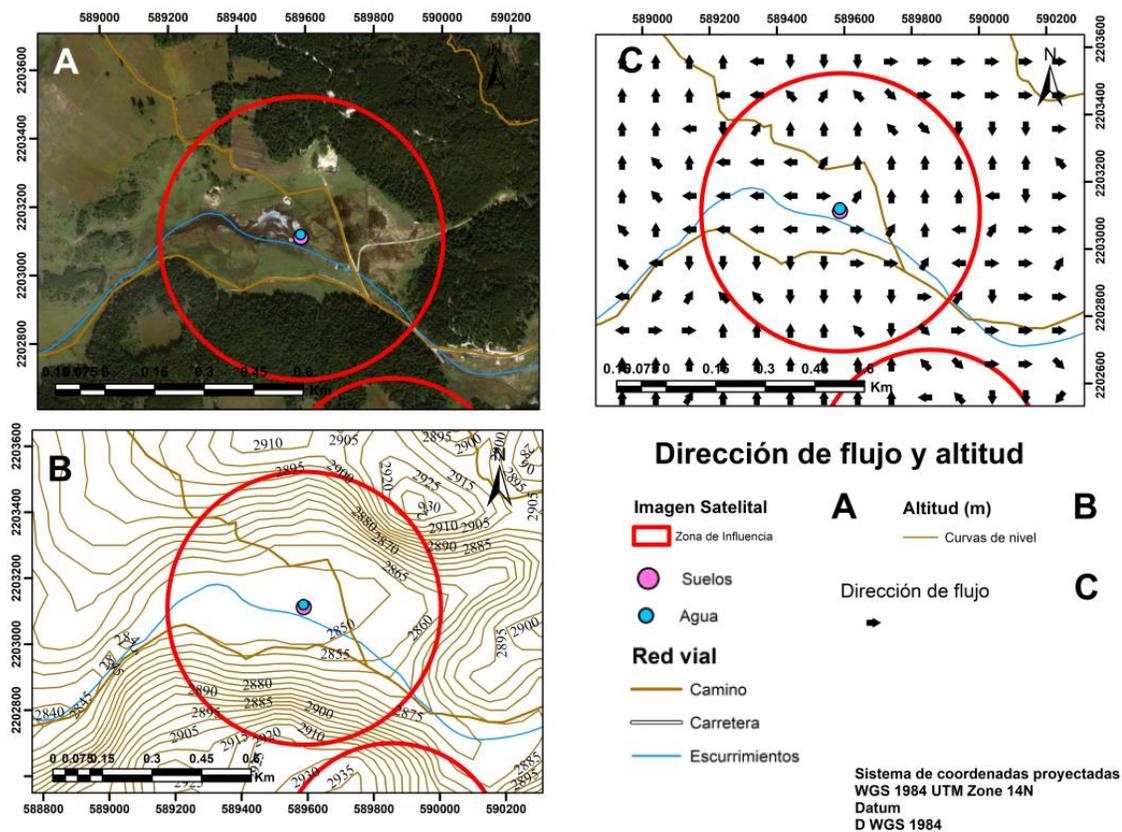


**Figura 63.**—Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de µg/ kg, en la muestra B19AC15-02, especie *Muhlenbergia macroura* en el sitio AC6.

### 5.2.7 Sitio AC7 Los Azufres

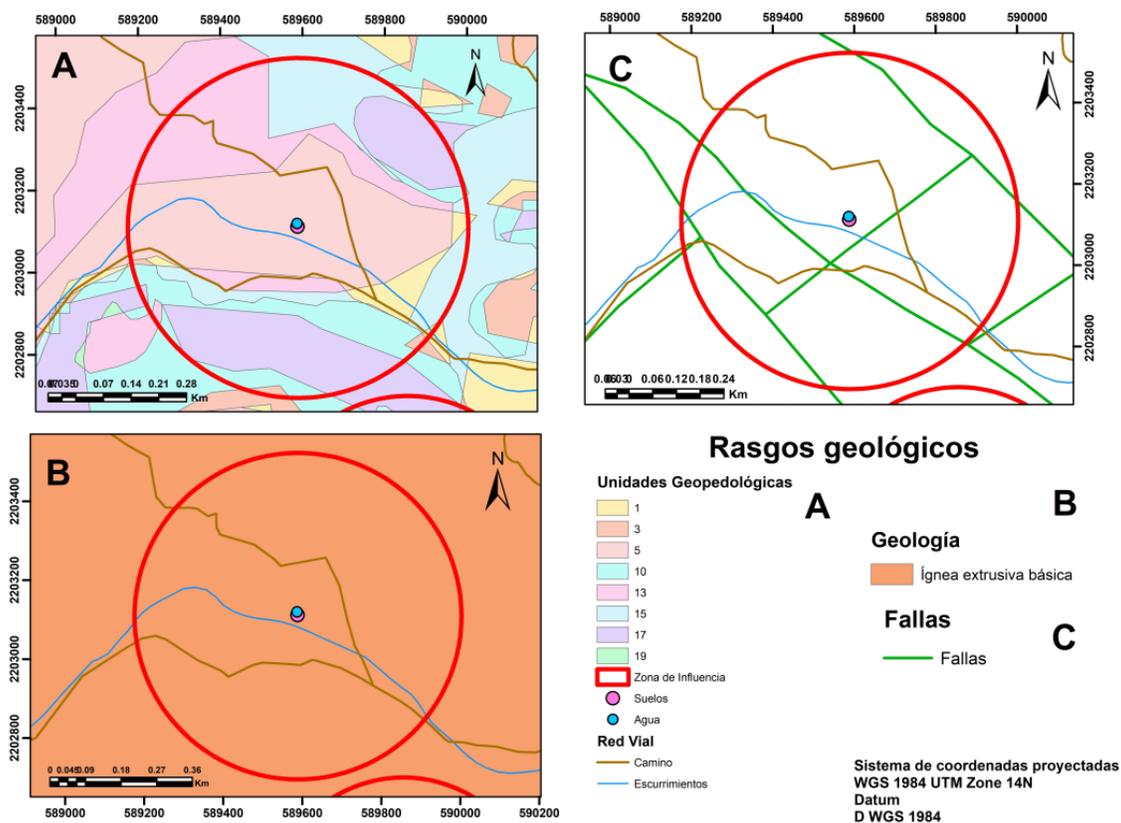
En este sitio se muestreó un perfil de suelo (A15AC1), procesado por extracción secuencial, y una muestra de agua A18AC06 analizada por ICP-MS e ICP-OES.

En la imagen satelital (sección A) figura 64 se observa que el perfil de suelo muestreado y el punto de agua muestreado, están dentro de una zona lagunar rodeada por bosque y por donde pasa un arroyo superficial. En la sección B, la dirección de flujo va hacia ambos lados, en la parte superior va hacia el norte y en la parte inferior va hacia el sur. En la sección C, la altitud del punto se encuentra a 2850 msnm. La zona de influencia cuenta con 830 m de diámetro determinados por la dirección de flujo.



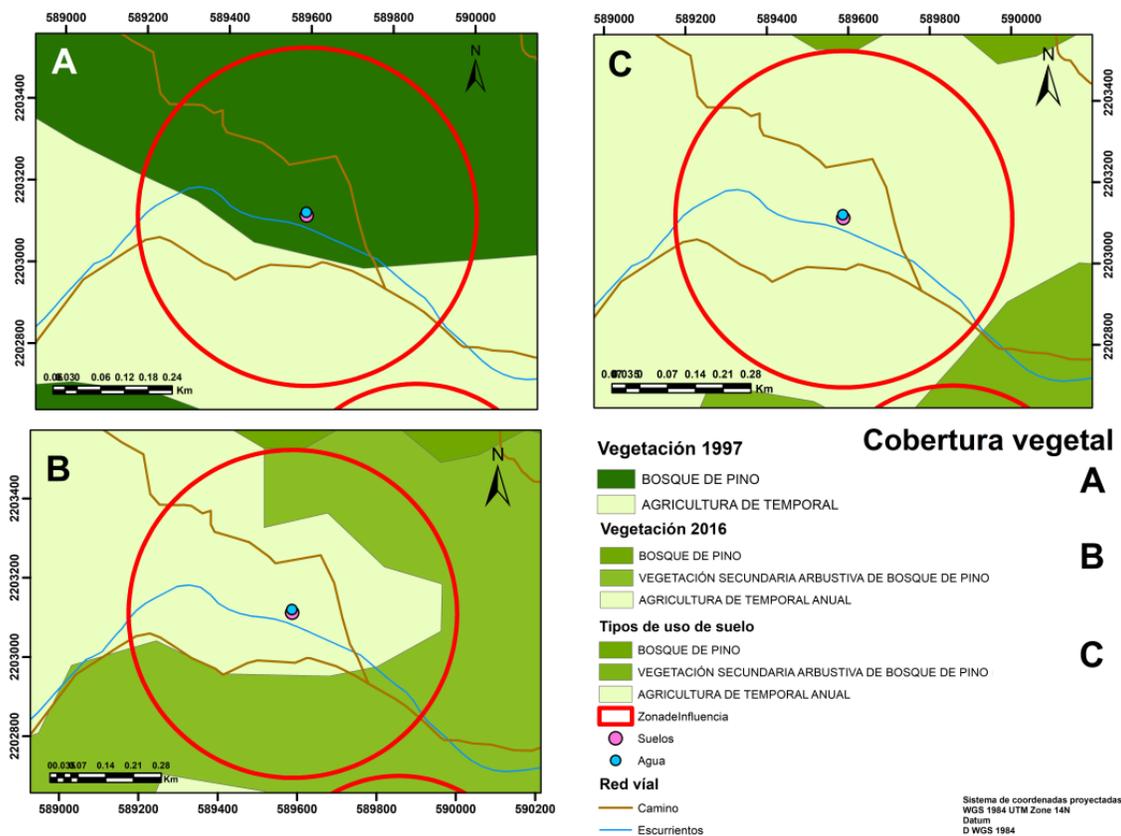
**Figura 64.**-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC7.

La unidad geopedológica para este sitio es la numero cinco (*Ver Figura 65*), caracterizada por roca ígnea extrusiva básica, agricultura de temporal, anual y permanente y una pendiente menor a 10 grados, la geología del lugar corresponde a una roca ígnea extrusiva básica y existen dos conjuntos de fallas en la zona, la de los Azufres y la de Pedernales.



**Figura 65.**-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC7.

En la figura 66 se muestra la cubierta vegetal para el año 1997 conformada principalmente por bosque de pino en la parte norte y en la parte sur por agricultura de temporal. Para el año 2016 la zona de cultivos se expandió llegando a abarcar el sitio, en los alrededores vegetación secundaria arbustiva de pino y al norte bosque de pino. Para el año 2018 la agricultura se expandió dejando dos manchones de bosque al norte y dos manchones de vegetación secundaria al sur.



**Figura 66.**-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC7.

Se presentan a continuación tres tablas que representan las variables medidas con relación a la estructura del suelo (*Ver Tabla 28*), las variables relacionadas a las propiedades fisicoquímicas (*Ver Tabla 29*) y la textura y el porcentaje de arcilla, limo y arena (*Ver Tabla 30*) de los tres horizontes del perfil.

La tasa de infiltración (*Ver Tabla 28*) para este sitio es muy bajo con respecto a los puntos anteriores, pero a diferencia de los otros este suelo tiene un mayor porcentaje de arcilla con respecto a los puntos anteriores, dependiendo del tipo de arcillas pueden afectar la Tasa de infiltración, de manera que a mayor cantidad de arcilla menor es la Tasa de infiltración (Domínguez y Schifter, 1992; Reyes, 2010).

**Tabla 28.-** Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC7

Perfil	Horizonte	% Rocas	Estabilidad de agregados	Raíces	Densidad aparente (mg/m <sup>3</sup> )	Tasa de infiltración (cm/ha)
A15AC1	Ap	<2	moderada	frecuentes	1.18	0.9

**Tabla 29.-** Variables fisicoquímicas el sitio AC7

Perfil	Horizonte	T	Humedad	Carbono orgánico	pH	CE
		°C				μS/cm
A15AC1	Ap	13.1	27.1	2.2	2.7	0.22

**Tabla 30.-** Textura del suelo el sitio AC7

Perfil	Horizonte	Textura	Porcentaje (%)		
			Arcilla	Limo	Arena
A15AC1	Ap	franco arcillosa	27.25	31.6	41.15

A continuación, se presentan una serie de parámetros medidos para la muestra de agua A18AC06 durante el muestreo en campo en la época de secas (*Ver Tabla 31*)

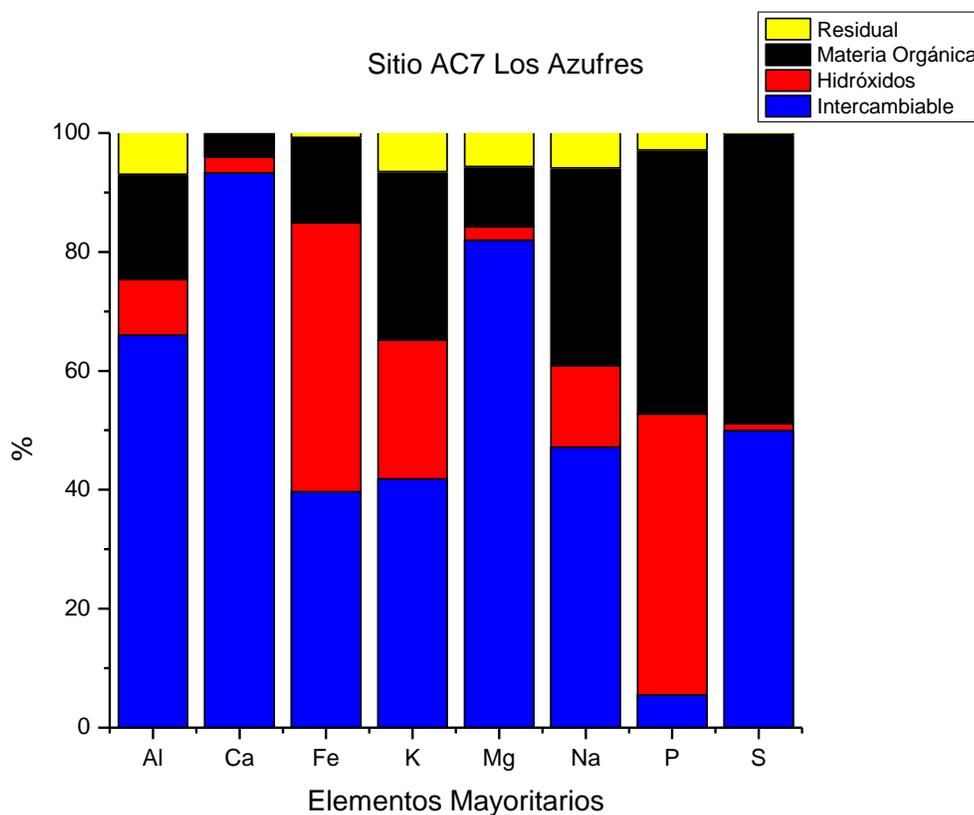
**Tabla 31.-** Parámetros medidos para la muestra A18AC06 durante el muestreo.

pH	T (°C)	Conductividad (μS/cm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)
4.7	21.5	508.1	292.58	7.14

Los Azufres está catalogado como uno de los puntos hidrotermales más importantes del sitio, en él se encuentran una serie de lagunas donde hay degasificación tanto de las lagunas como del suelo con una composición principal de CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S (Peiffer et al., 2014).

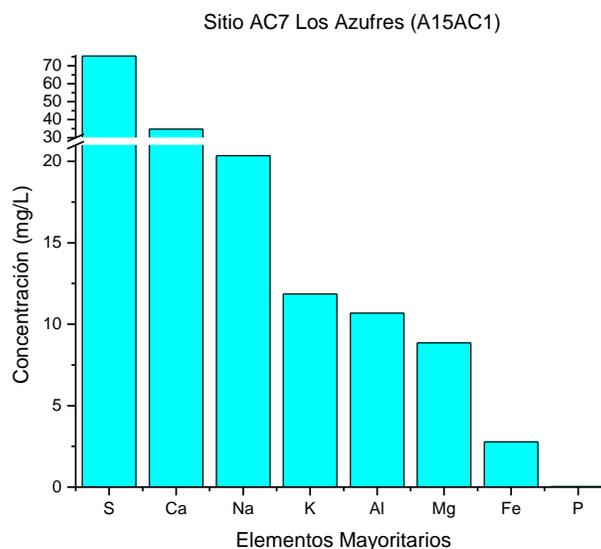
La zona se encuentra dentro de una serie de fallas (*Ver Figura 51*), gracias a estas fallas hay continuo aporte de gases al suelo y al agua. Además de esto, el suelo tiene un pH de 2.7, siendo considerado un sitio muy ácido al igual que el agua con un pH de 4.7.

Los diagramas de extracción secuencial del suelo (*Ver Figuras 67 y 69*) muestran al Al, Fe, As, Cd, Zn, Ba, Cu y Mn en la fracción intercambiable y la fracción de hidróxidos, esto gracias al bajo pH del suelo. A su vez, la oxidación del azufre proveniente de la fuente hidrotermal y la formación de la pirita genera una acidificación de los suelos (Mitchell y Soga, 2005). Así entonces, tomando en cuenta la textura del suelo y las inundaciones estacionales de las lagunas en la zona, es muy probable que estos elementos formen hidróxidos (Ramón et al., 2011).



**Figura 67.**-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC7, muestra A15AC1

Los elementos mayoritarios que se encuentran en el agua de este sitio (*Ver Figura 68*) son principalmente Na (68 mg/L), S (60 mg/L), Ca (43 mg/L), K (30 mg/L), Mg (10 mg/L) y el Fe y P con una concentración menor a 1 mg/L.



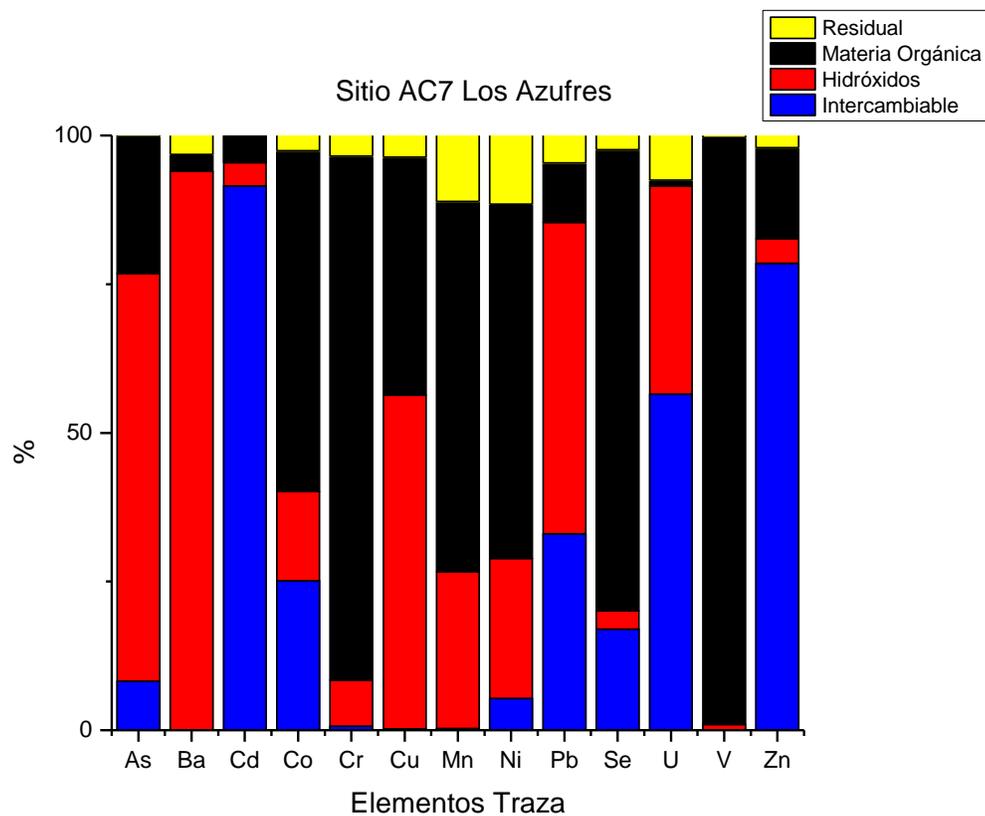
**Figura 68.**-Elementos mayoritarios en el Sitio AC7 Los Azufres, muestra de agua AC15AC1.

La figura 69 muestra los elementos traza con el mayor porcentaje dentro de la fracción intercambiable son Cd, Pb, Se, U y Zn; para la fracción de los hidróxidos son As, Ba, Cu, Pb y U; para la materia orgánica son Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Se y V y para la fracción residual son Mn, Ni y U.

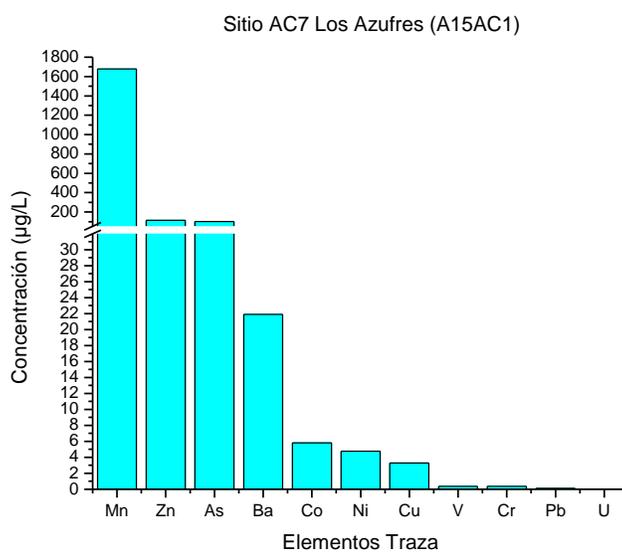
Por otro lado, también se encuentran bastante distribuidos en la fracción de la materia orgánica elementos como P, S, As, Co, Cr, Mn, Ni, en donde al igual que los sitios anteriores, están ocurriendo procesos de mineralización (Julca-Otiniano et al., 2006; Lancho, 1982; Reyes, 2010).

Los elementos traza que se encuentran en el agua de este sitio se puede observar en la figura 70, son principalmente As (999  $\mu\text{g/L}$ ), Cd (4.9  $\mu\text{g/L}$ ), Zn (4.8  $\mu\text{g/L}$ ), y Pb, V, Ni, Co, Cu, Cr, Se, Pb y U con una concentración menor a 1  $\mu\text{g/L}$ .

La composición elemental de la muestra de agua, reveló concentraciones de S disuelto, el cual puede estar presente a valores bajos de pH y por esto, se pueden encontrar en suspensión elementos como el Al, Fe, Mn entre otros (Meyer, 1977).



**Figura 69.**-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC7, muestra A15AC1.

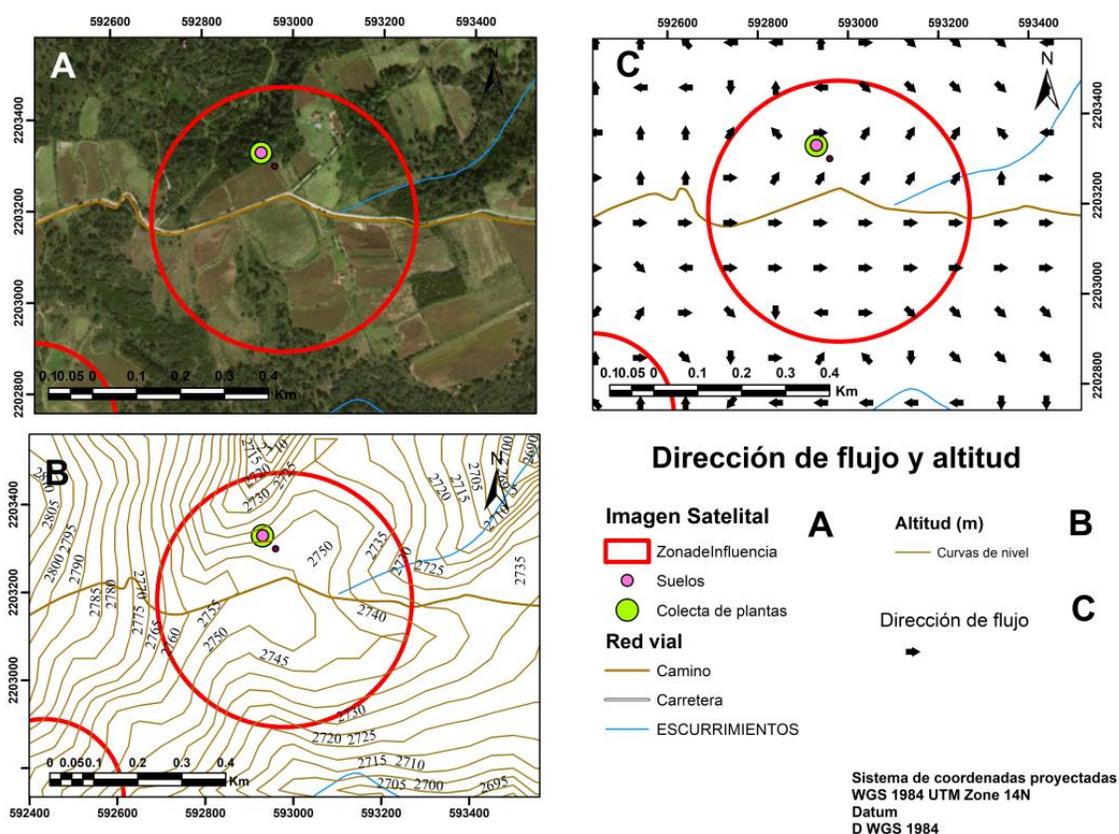


**Figura 70.**-Elementos Traza en el Sitio AC7 Los Azufres, muestra de agua AC15AC1.

### 5.2.8 Sitio AC8 Cañada de Piedras

En este sitio se muestreó el perfil de suelo B19AC16 procesada por extracción secuencial, dos muestras de vegetación, procesadas por digestión acida B19AC16-01 (*Baccharis conferta*) y B19AC16-2 (*Pinus patula*) y dos muestras de hongos, Z2P1 (*Amanita muscaria*) y Z2P2 (*Pleurotus sp*) procesadas por digestión ácida.

La sección A de la figura 71 muestra el perfil de suelos sobre una zona de vegetación y contigua a ésta, una zona de agricultura. El perfil se encuentra entre los 2750 y 2740 msnm como lo muestra la sección B y la dirección de flujo es hacia el este noreste sección (C). La zona de influencia tiene un diámetro de 590 m.



**Figura 71.**-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC8.

La principal unidad geopedológica en la que se encuentra el perfil de suelo es la diez (Ver Figura 72) caracterizada por la presencia de rocas ígnea extrusiva básica, bosque de pino y una pendiente entre 10 y

15 grados. La roca sobre la que se desarrolló el perfil es una roca extrusiva básica y la falla más cercana a la zona de influencia es una falla normal perteneciente al conjunto de fallas denominada Los Azufres.

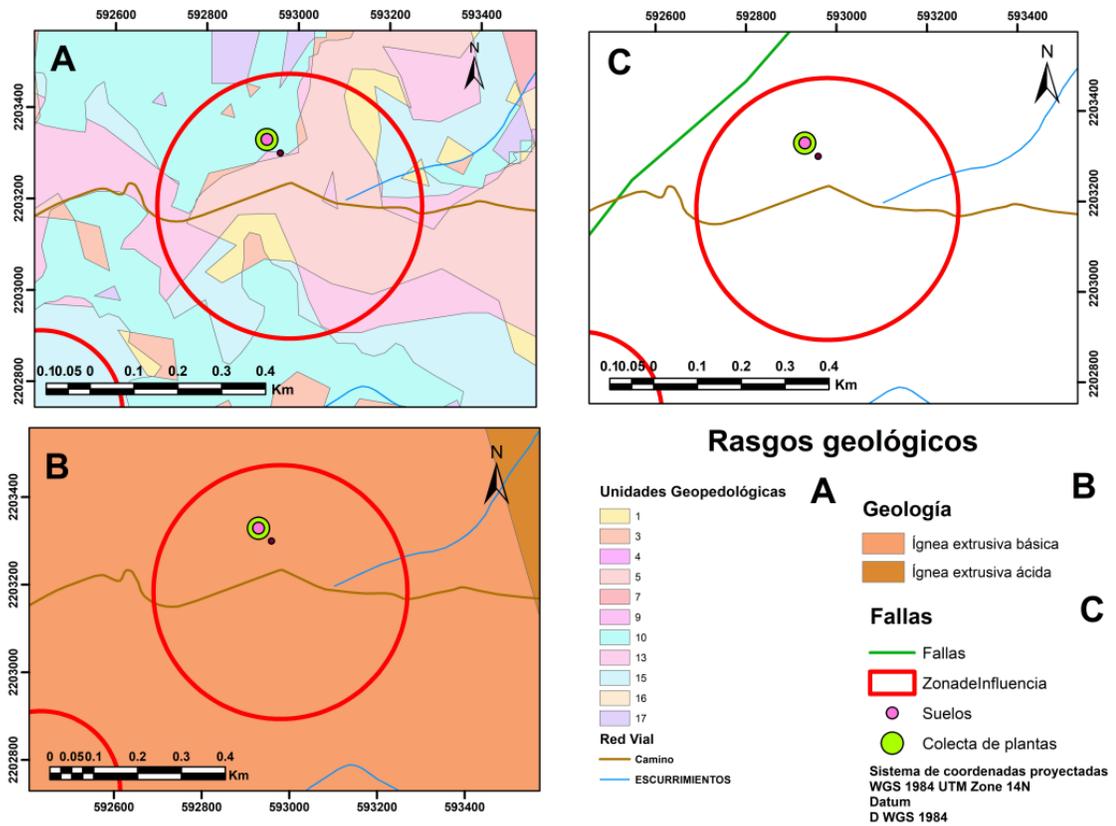
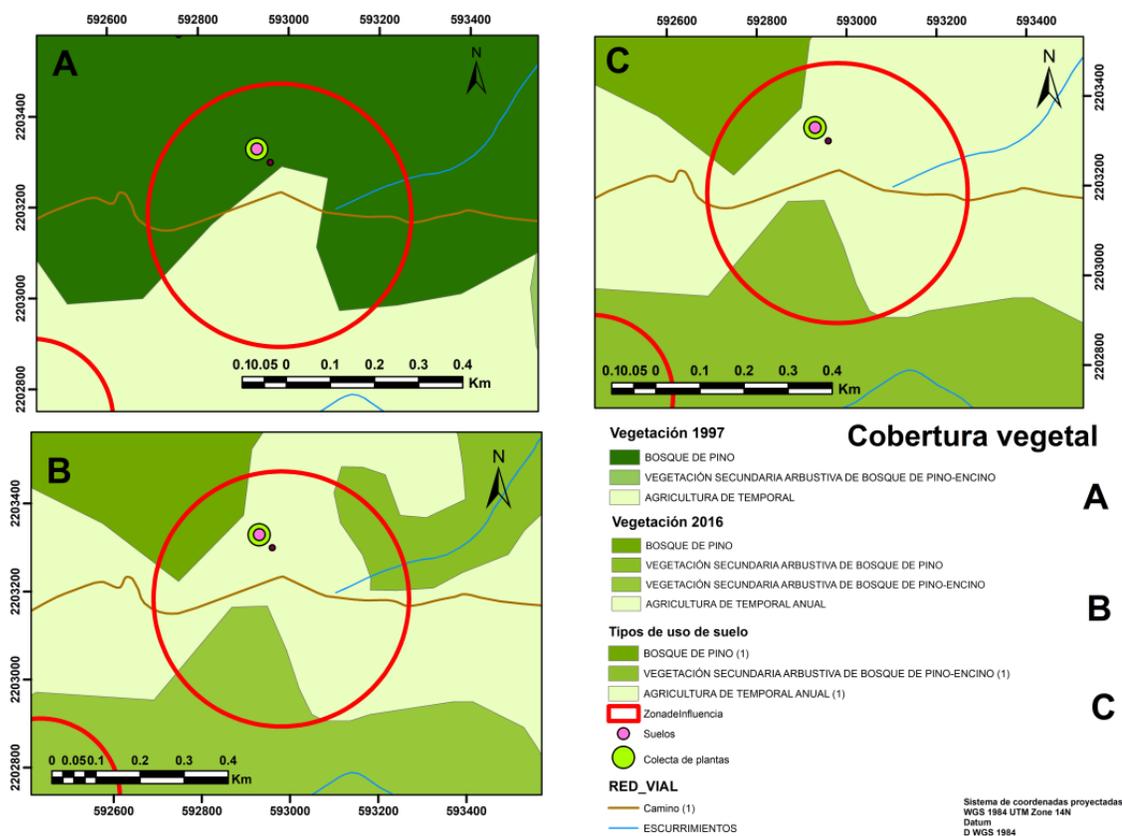


Figura 72.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC8.

En la sección A de la figura 73, se aprecia la cubierta vegetal de tipo bosque de pino y para la sección B y C se tiene que la cubierta vegetal cambió a ser agricultura de temporal.



**Figura 73.**-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC8.

A continuación, se reportan las variables asociadas a la estructura del suelo (Ver Tabla 32), las variables fisicoquímicas (Ver Tabla 33), la textura y porcentaje de arcilla, limo y arena del perfil de suelo (Ver Tabla 34).

**Tabla 32.**- Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC8

Perfil	Horizonte	% Rocas	Estabilidad de agregados	Raíces	Densidad aparente	Tasa de infiltración
					mg/m <sup>3</sup>	cm/ha
B19AC16	A	41	muy alta	abundantes	0.58	121

**Tabla 33.**- Variables fisicoquímicas en el sitio AC8

Perfil	Horizonte	T	Humedad in situ	Humedad	Carbono orgánico	pH	CE
		°C		%			μS/cm
B19AC16	A	13.7	16.6	40.46	2.3	5.4	70

Tabla 34.- Textura del suelo en el sitio AC8

Perfil	Horizonte	Textura	Porcentaje (%)		
			Arcilla	Limo	Arena
B19AC16	A	franco limoso	13.85	62.5	23.65

La figura 74 muestra que los principales elementos que conforman la fracción intercambiable son Ca, K, Mn y Na. En la fracción de los hidróxidos se encuentran elementos como Ca, Fe y K; en la materia orgánica el porcentaje de los elementos que contienen son Fe, Na, Mg, P y S y la fracción residual contienen elementos como Fe y Mg en menor medida que las otras fracciones.

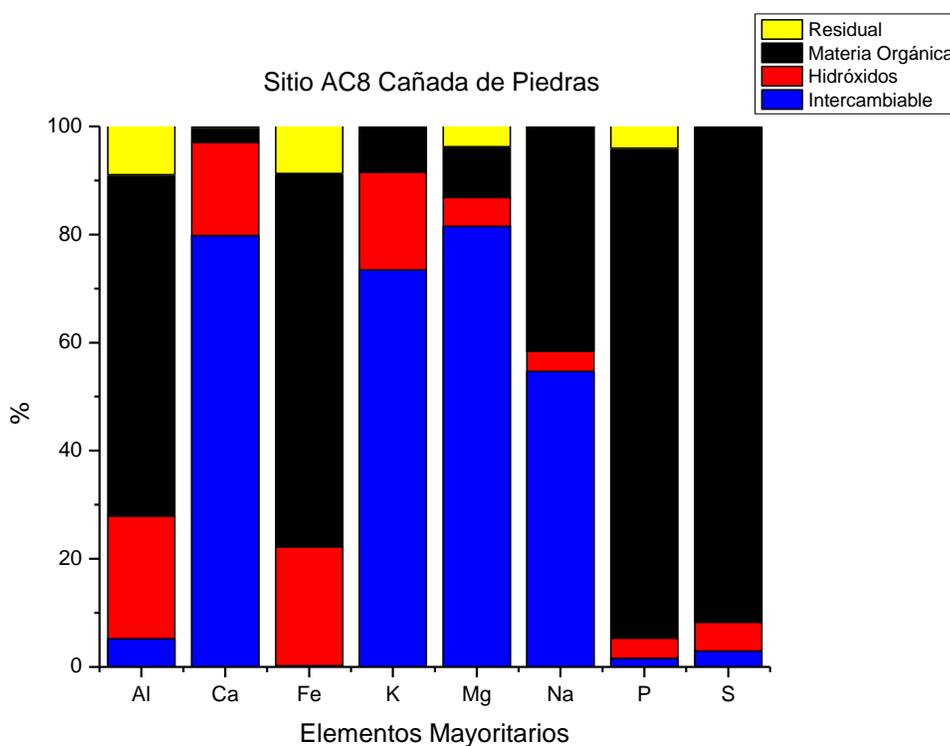
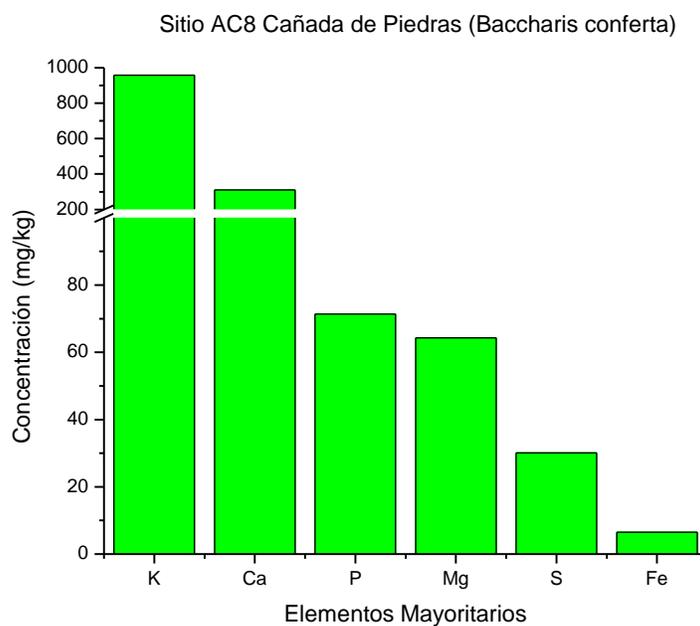
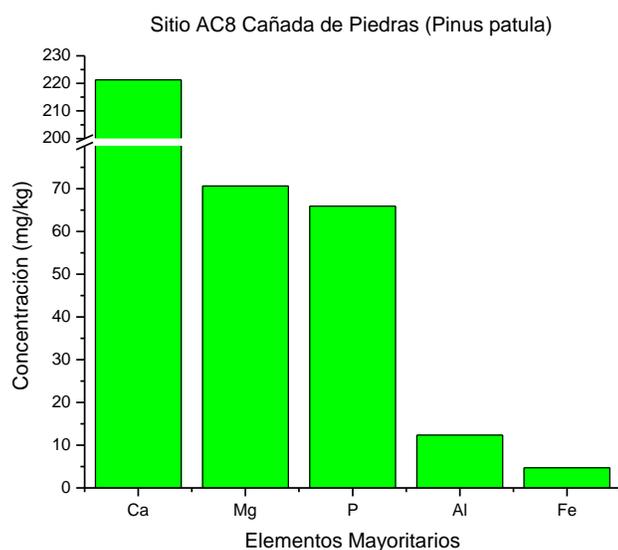


Figura 74.-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC8, muestra B19AC16.

Se puede ver que para la especie *Baccharis conferta*, el elemento mayoritario más abundante es K y el elemento menos abundante es el Fe (Ver Figura 75). Para la especie *Pinus patula*, de igual manera, el elemento más abundante es el K y el menos abundante es el Fe (Ver Figura 76).

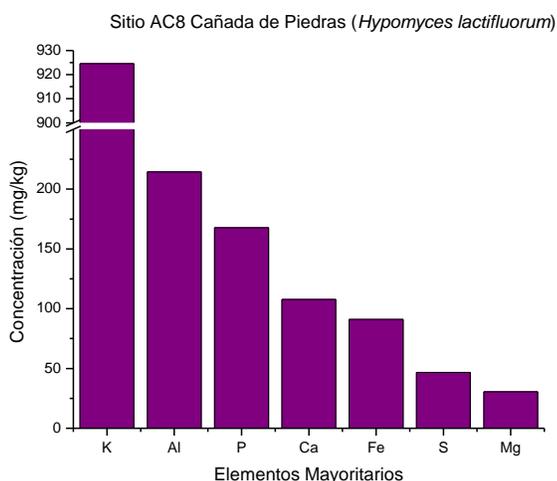


**Figura 75.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC16-01, especie *Baccharis conferta* en el sitio AC6.

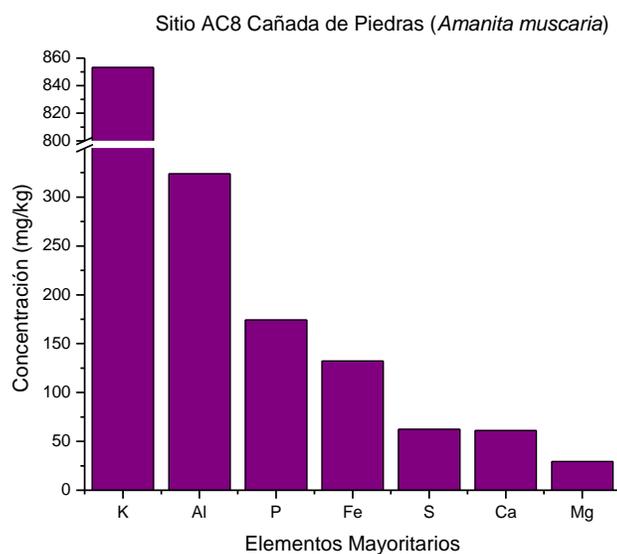


**Figura 76.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios, con una concentración de mg/kg, en la muestra B19AC16-02, especie *Pinus Patula* en el sitio AC6.

Las figuras 77 y 78 muestran los elementos mayoritarios para la muestra de hongos Z2P1 (*Hypomyces lactifluorum*) y Z2P2 (*Amanita muscaria*) donde se encontró K, Al, Cu, Ba, Zn, Ni y V. Dentro de los hongos, encontrados en esta región, el macromiceto *Amanita Muscaria*, es una especie hiperacumuladora de V, pero se sabe poco sobre los mecanismos de transporte y bioacumulación de estos organismos (Díaz, 2006).



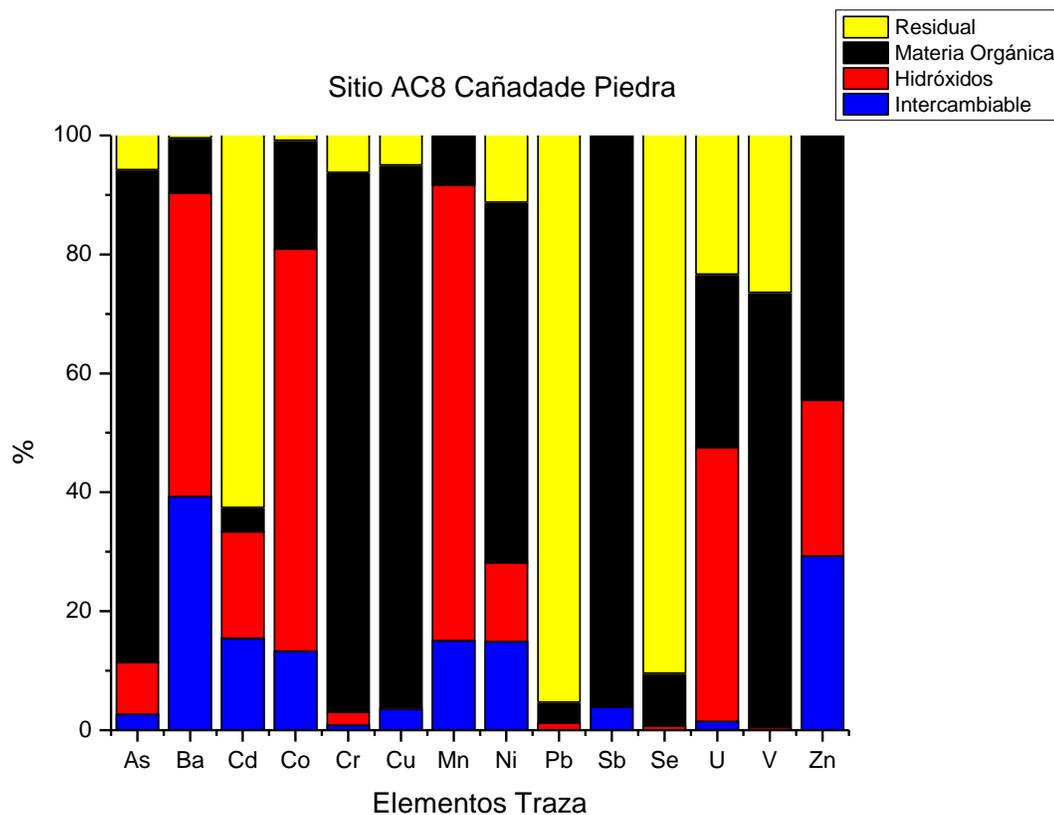
**Figura 77.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios para la muestra Z2P1 de hongos identificado como *Hypomyces lactifluorum*.



**Figura 78.**-Diagrama que representa los elementos mayoritarios para la muestra Z2P2 de hongos identificado como *Amanita muscaria*.

Los elementos traza de este perfil están bastante repartidos en las cuatro fracciones (Ver Figura 79). La presencia de muchos de estos se debe a la roca madre de la cual se desarrolló el suelo (Rucks et al., 2004), otros se deben a los procesos de mineralización de la materia orgánica (Lancho, 1982), o a procesos de

óxido-reducción que se encuentran en el suelo (Ramón et al., 2011) y muchos otros al intemperismo y procesos de transporte que ocurren en el suelo (Ayala M., 2000; Sánchez San Román, 2012).

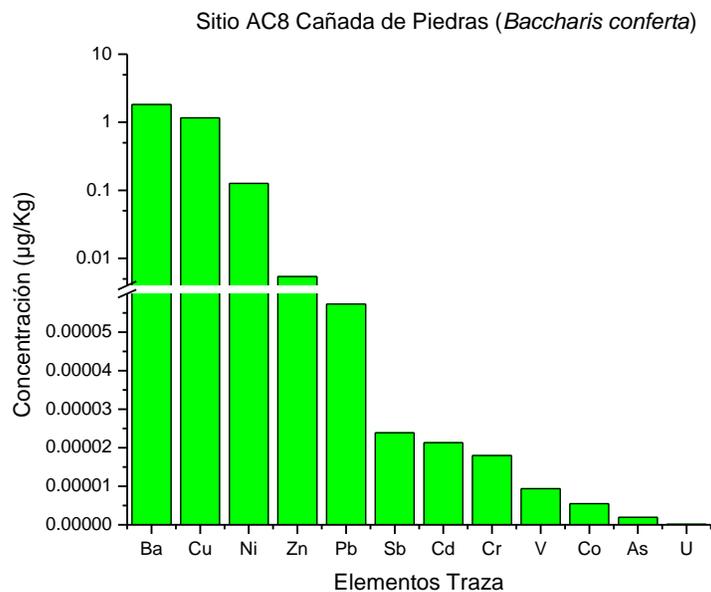


**Figura 79.**-Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC8, muestra B19AC16

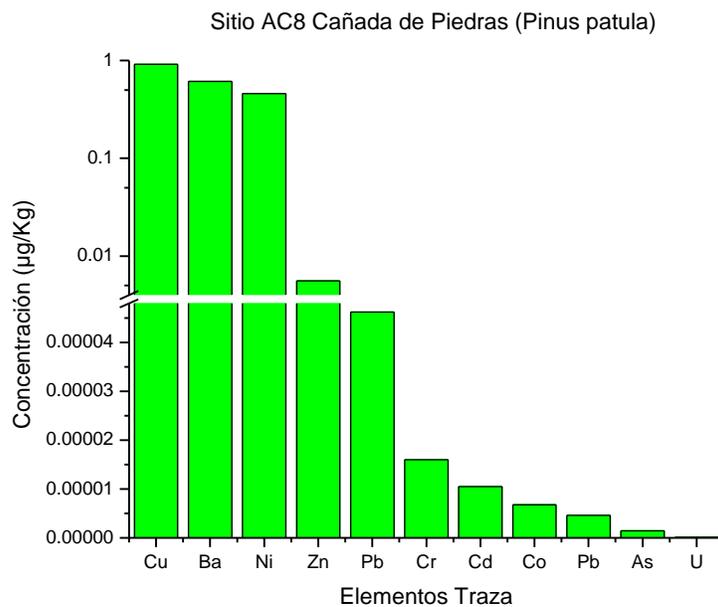
Se puede ver que para la especie *Baccharis conferta*, el elemento traza más abundante es Ba y el elemento menos abundante es el U (Ver Figura 80), y para la especie *Pinus patula* de igual manera el elemento traza más abundante es el Cu y el menos abundante es el U (Ver Figura 81).

El pH de los suelos es ácido de alrededor de 5.4 y 6.4. Actualmente se encuentra en una zona donde se desarrolla agricultura, pero anteriormente en la década de los noventa era parte del bosque de pino encino.

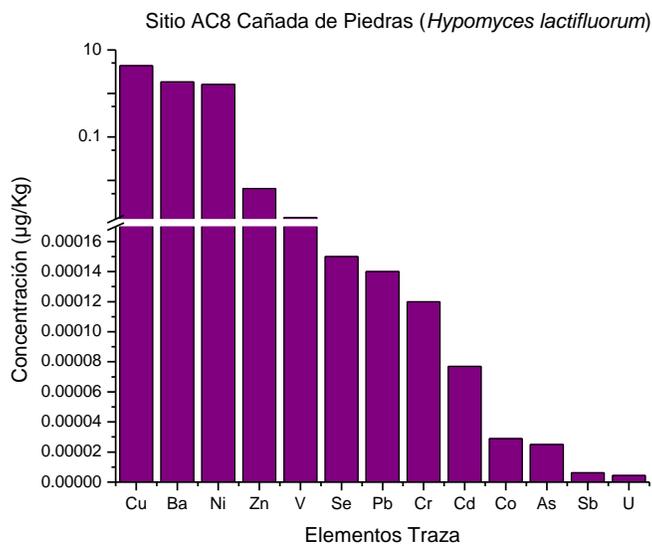
Dentro de esta zona también crecen algunos hongos como es el caso de *Hypomyces lactifluorum* y *Amanita muscaria*, algunos de estos hongos encontrados en la zona son recolectados e ingeridos por los habitantes de la zona, por este medio, pueden llegar elementos que están siendo bioacumulados por estos organismos, a los seres humanos (Ver Figura 82 y 83)



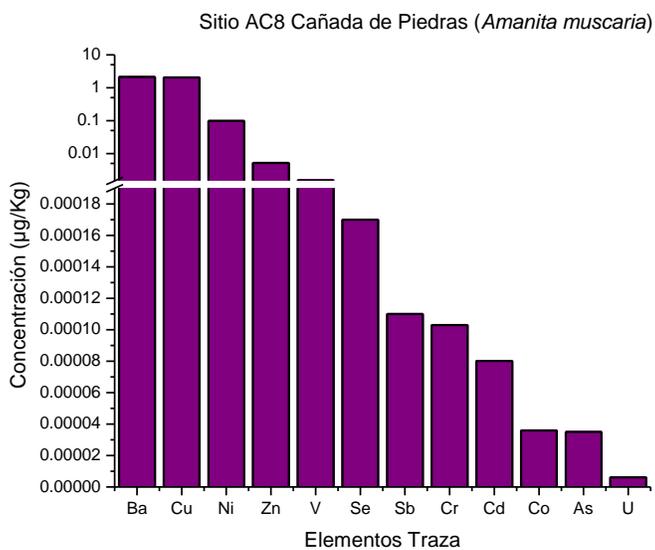
**Figura 80.**-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , en la muestra B19AC16-01, especie *Baccharis conferta* en el sitio AC8.



**Figura 81.**-Diagrama que representa los elementos traza, con una concentración de  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , en la muestra B19AC16-02, especie *Pinus Patula* en el sitio AC8.



**Figura 82.**—Diagrama que representa los elementos traza para la muestra Z2P1 de hongos identificado como *Hypomyces lactifluorum*.

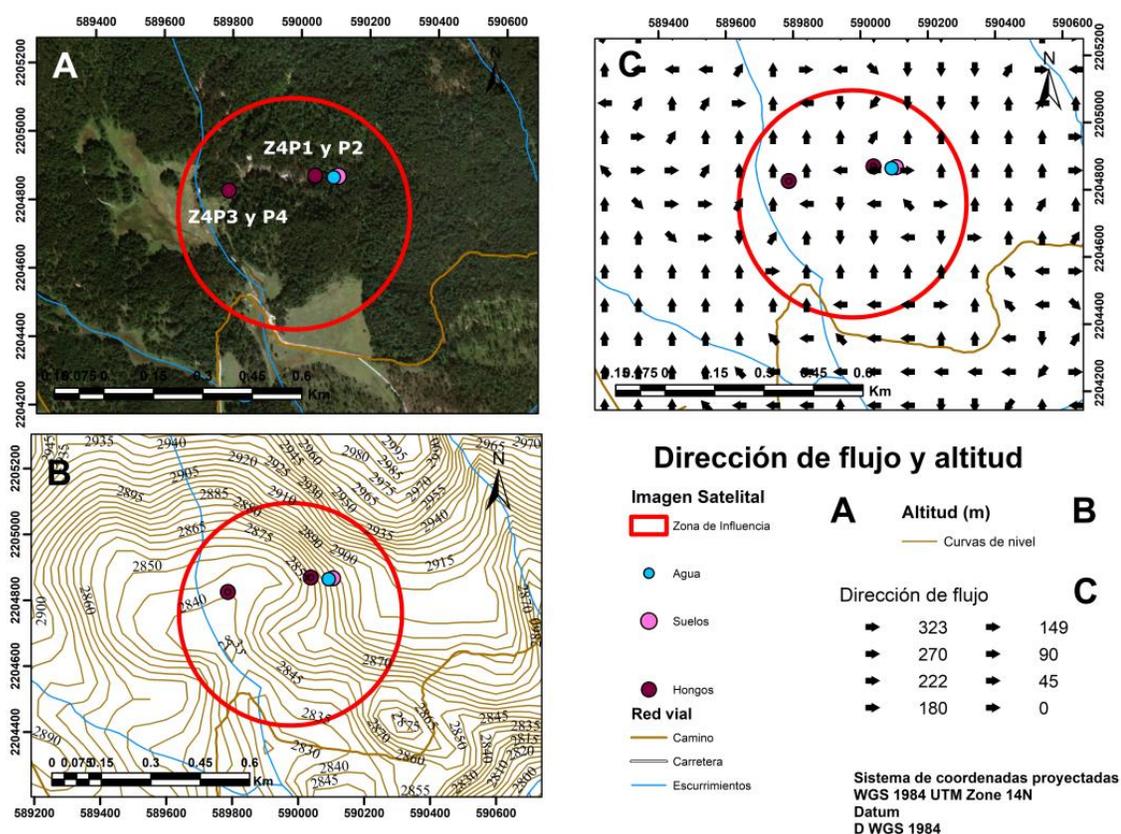


**Figura 83.**—Diagrama que representa los elementos traza para la muestra Z2P2 de hongos identificado como *Amanita muscaria*.

## 5.2.9 Sitio AC9 Alcaparrosa

En este sitio, se muestreó el perfil de suelo A18AC08a, procesado por extracción secuencial, cuatro muestras de hongos procesadas por digestión ácida (Z4P1, Z4P2, Z4P3 y Z4P4) y una muestra de agua analizada con ICP-OES y MS para elementos traza y elementos mayoritarios.

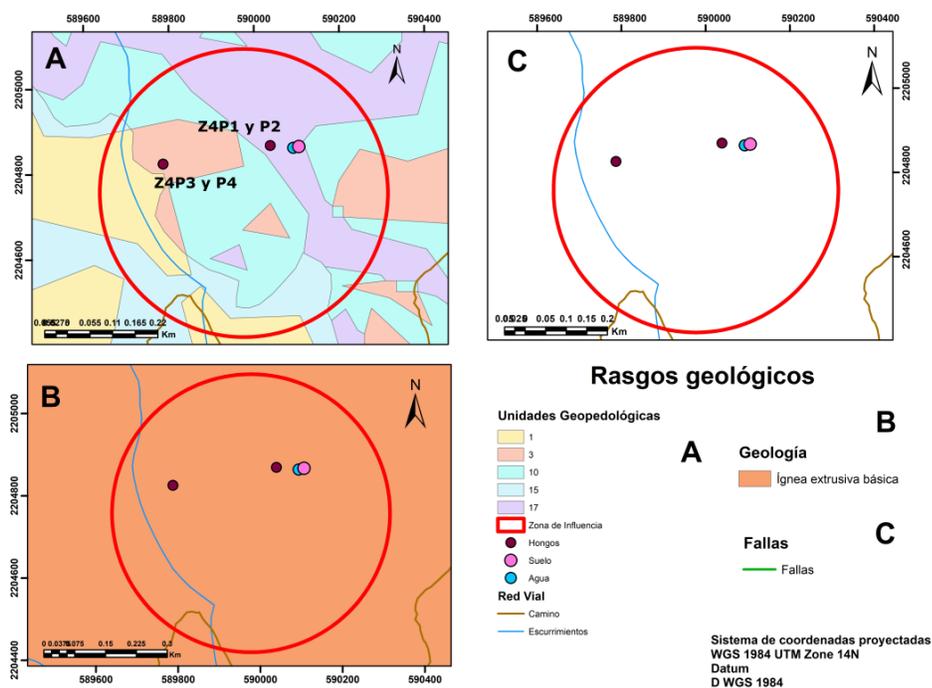
En la imagen satelital de la figura 84, se muestra el perfil de suelo dentro de una zona boscosa. Al oeste del sitio hay un arroyo superficial, las curvas de nivel muestran que el perfil está a 2890 msnm y la colecta de hongos está pendiente abajo a los 2877 y 2849 msnm, la dirección de flujo es un poco caótica al ser una parte alta, el escurrimiento va hacia los cuatro rumbos. La zona de influencia tiene un diámetro de 690 m.



**Figura 84.**-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC9.

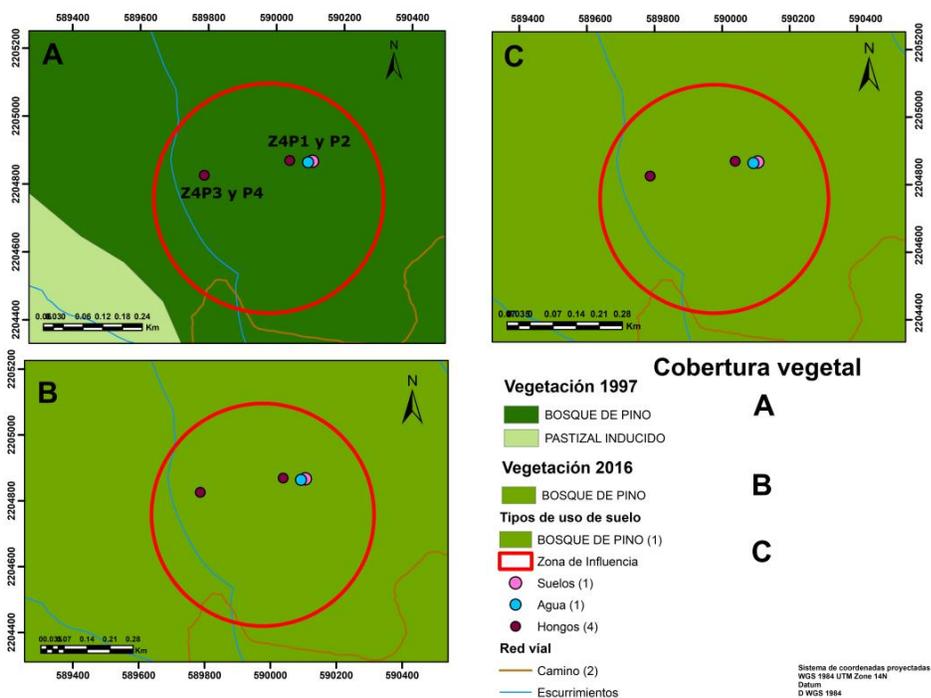
El perfil de suelo se encuentra dentro de la unidad geopedológica diecisiete, caracterizada por roca ígnea extrusiva básica, bosque de pino y una pendiente mayor a 15 grados. Una colecta de hongos está dentro de la misma unidad geopedológica y la otra está dentro de la unidad tres, caracterizada por roca de tipo

ígnea extrusiva básica, bosque de pino y una pendiente menor a 10 grados. La geología es de tipo ígnea extrusiva básica y cercano a la zona de estudio no se encuentra ninguna falla (Ver Figura 85).



**Figura 85.-**Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC9.

La cubierta vegetal para el año 1997 (Ver Figura 86) era de bosque de pino y al suroeste se encontraba una zona de pastizal inducido; la cubierta vegetal en el 2016 ya era completamente de bosque de pino y para el 2018 se mantiene la cubierta vegetal de pino.



**Figura 86.-**Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio ACIX.

Se presentan a continuación tres tablas con las variables medidas con relación a la estructura del suelo (Ver Tabla 35), las propiedades fisicoquímicas (Ver Tabla 36) y la textura y el porcentaje de arcilla, limo y arena (Ver Tabla 37) de los tres horizontes del perfil.

**Tabla 35.-** Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC9

Perfil	Horizonte	% Rocas	Estabilidad de agregados	Raíces	Densidad aparente (mg/m <sup>3</sup> )
A18AC08a	A	2-5	moderada	abundantes	0.66

**Tabla 36.-** Variables fisicoquímicas en el sitio AC9

Perfil	Horizonte	T	Humedad	Carbono orgánico (%)	pH	CE
		°C				μS/cm
A18AC08a	A	14.3	34.2	4	2.2	30

**Tabla 37.-** Textura del suelo en el sitio AC9

Perfil	Horizonte	Textura	Porcentaje (%)		
			Arcilla	Limo	Arena
<b>A18AC08a</b>	A	franco limosa	17.25	34.1	48.65

A continuación, se presentan una serie de parámetros medidos durante el muestreo en campo en la época de secas para la muestra A18AC08 de agua (*Ver Tabla 38*).

**Tabla 38.-** Parámetros medidos para la muestra de agua A18AC08.

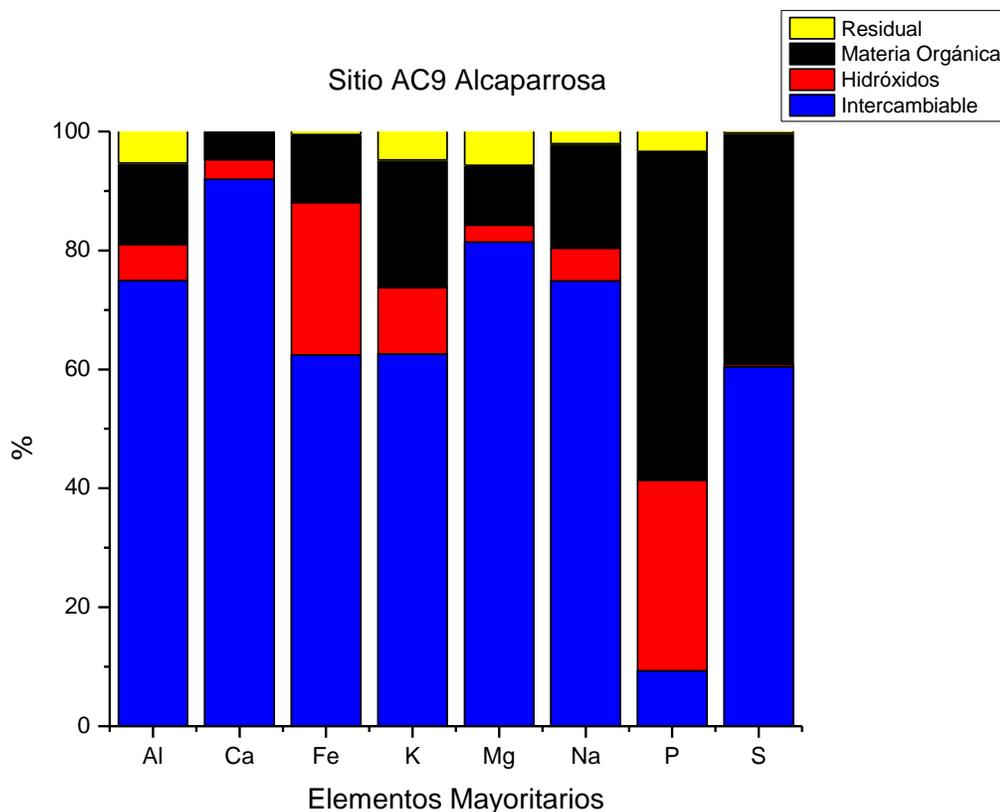
pH	T	Conductividad	SDT	Oxígeno disuelto	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>+3</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
	°C	μS/cm								
2.14	14.1	5276.00	2450.00	7.15	0.01	1.60	20.00	1.44	0.24	216

Al igual que el sitio AC7, Alcaparrosa es otro sitio hidrotermal de importancia en la zona de estudio. Es un sitio con un pH del suelo de 2.2, propiedad que mantiene a los en estado iónico (Mitchell y Soga, 2005) (*Ver Figura 73*) y de esta forma favorecer el transporte de éstos a través de suelo.

La figura 87 muestra el contenido de la fracción intercambiable, donde los principales elementos que la conforman son Al, Ca, Fe, K, Mn, Na y S, por otro lado en la fracción de los hidróxidos se encontraron principalmente el Fe y P. En la materia orgánica, los elementos contenidos son Fe, P y S y en la fracción residual contienen elementos como K y Mn en menor medida que las otras fracciones.

Si se pone atención en los valores de conductividad eléctrica del suelo y del agua (*Ver Tablas 33 y 35*) estas son completamente diferentes, es mayor en el agua que en el suelo ya que el pH es muy bajo y permite que los elementos estén en forma iónica permaneciendo en el agua y no en el suelo (Bosch Mayol et al., 2012).

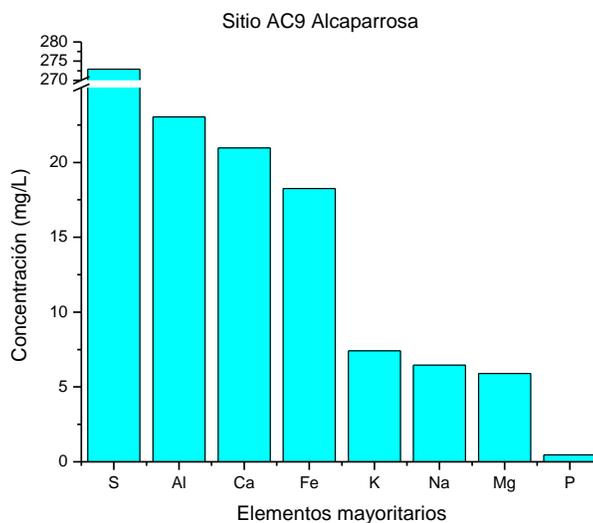
A pesar de tener un valor de pH en el suelo 2.2 la conductiva la conductividad eléctrica sea de las más bajas encontradas con 30 μS/cm. En el resto de las muestras, valores de pH menor presentan los valores más altos de CE. Una hipótesis generada es que este suelo se encuentra dentro de la laguna y ha estado más tiempo en contacto con el agua que el resto de los sitios lo que provoca una conductividad muy alta en el agua y una conductividad muy baja en el suelo.



**Figura 87.**-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC9, muestra A18AC08a.

En la figura 88, los elementos mayoritarios que se encuentran en el agua de este sitio son principalmente S (80 mg/L), Na (9 mg/L), Ca (8 mg/L), K (6 mg/L), Fe (3 mg/L) y Mn y P menor a 2 mg/L. El azufre es el elemento más concentrado en el agua muestreada, se sabe que este elemento en forma gaseosa como sulfuro de hidrogeno ( $2H_2S$ ) al entrar en contacto con el agua forma ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) lo que le confiere un pH ácido o híper ácido al medio acuoso (Meyer, 1977).

Los elementos mencionados anteriormente también están presentes en la fracción intercambiable dado las condiciones ácidas, tanto del agua (2.14) como del suelo (2.2), esto permite que predomine la forma iónica de algunos de estos elementos y su movilización a través del suelo de manera más sencilla (Meyer, 1977).

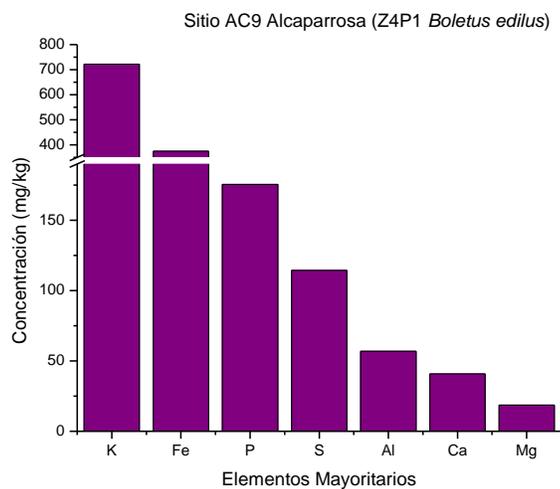


**Figura 88.**-Elementos mayoritarios en el Sitio AC9 Alcaparrosa

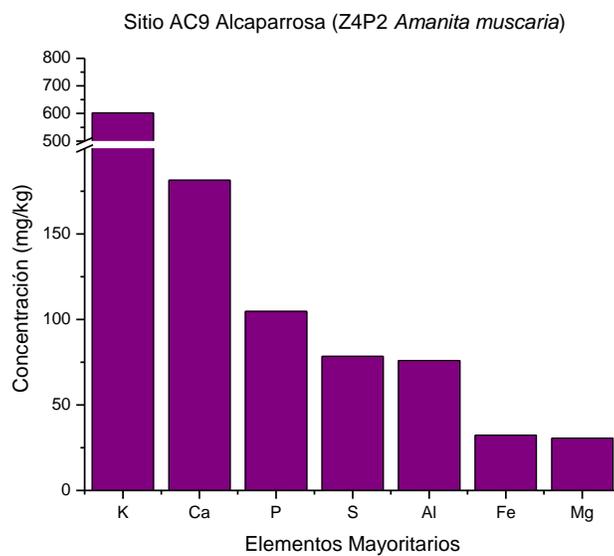
Las Figuras 89 a 92 y 95 a 98 muestran las concentraciones de elementos mayoritarios y traza en las muestras de hongos. Donde se detectaron a mayor concentración el K, Fe, P y S, que son elementos que los hongos usan para sus funciones primarias o básicas. También hay otros elementos como Cu, Ba, Ni, P, Cd, Cr o Zn que están también en el suelo y que éstos los toman para generación de toxinas u otros mecanismos de defensa o la bioacumulación en estructuras como el micelio o carpóforo (Díaz, 2006).

En general, los hongos son buenos bioacumuladores de diversos metales pesados (Díaz, 2006). Se ha encontrado que algunos como *Boletus edulis* son capaces de bioacumular elementos como el Cu, Zi, Ba, Ni, P, As, Cd, Cr entre otros. La *Amanita muscaria* es capaz de bioacumular elementos como el V, P, As.

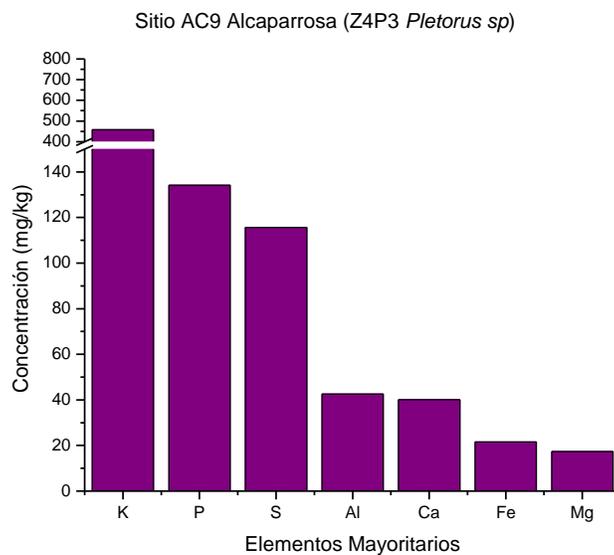
Los hongos utilizan enzimas degradativas para la descomposición de ligninas, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, entre otros presentes en la materia orgánica que le sirve de alimento a través de las hifas que pueden penetrar hasta en microporos de 1 a 2 mm. Las enzimas tienen una gran capacidad de fijación de metales pesados por quelación o intercambio catiónico, por lo tanto la actividad de estas sustancias favorece la liberación de metales pesados que se encuentran de forma poco disponible (Díaz, 2006).



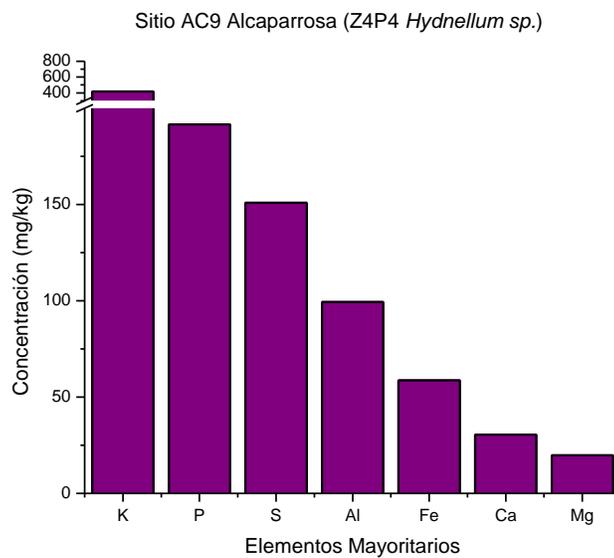
**Figura 89.**-Elementos mayoritarios encontrados en la muestra Z4P1 *Boletus edilus*.



**Figura 90.**-Elementos mayoritarios encontrados en la muestra Z4P2 *Amanita muscaria*.



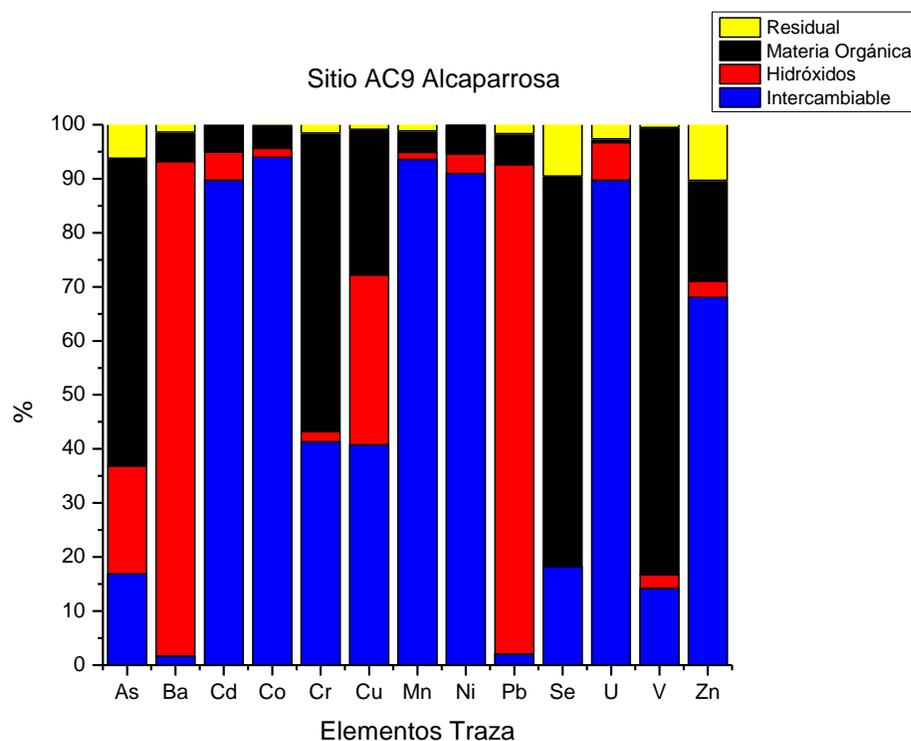
**Figura 91.**-Elementos mayoritarios encontrados en la muestra Z4P3 *Pleorus sp.*



**Figura 92.**- Elementos mayoritarios encontrados en la muestra Z4P4 *Hydnellum sp.*

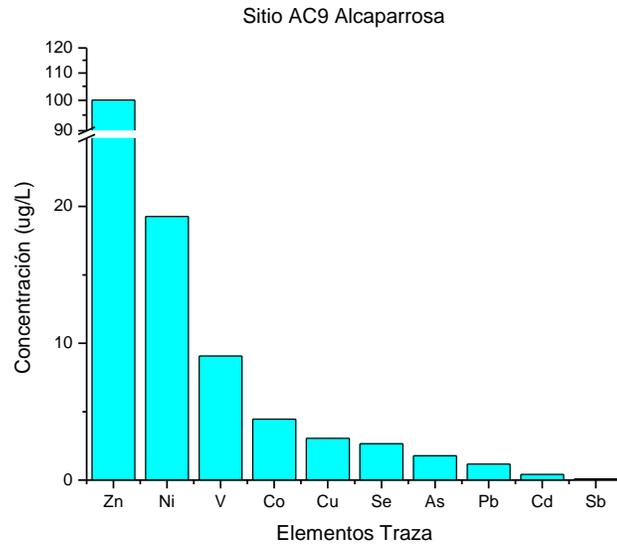
Los elementos traza con el mayor porcentaje dentro de la fracción intercambiable son Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, U y Zn, (Ver Figura 93) para la fracción de los hidróxidos son Ba y Pb, para la materia orgánica son As, Cr, Cu, Se, V y Zn y para la fracción residual son As, Se y Zn.

Las aguas híper ácidas con pH cercanos a 2 tienen alto contenido de iones y una alta conductividad eléctrica, como es el caso de esta muestra de agua. El contenido de iones metálicos en concentraciones traza y el S elementos mayoritarios (Ver Figuras 87 y 94) al estar en suspensión estos iones pueden ser fácilmente transportados y precipitar en lugares donde las condiciones de pH y oxígeno son diferentes contribuyendo a la fracción de hidróxidos, o gracias a la acción de microorganismos integrarse a la materia orgánica (Meyer, 1977) (Ver Figuras 95 a 98).

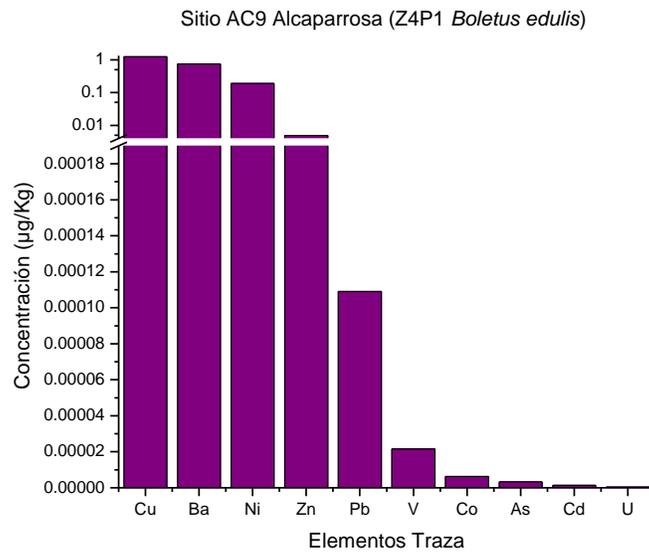


**Figura 93.-** Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC9, muestra A18AC08a.

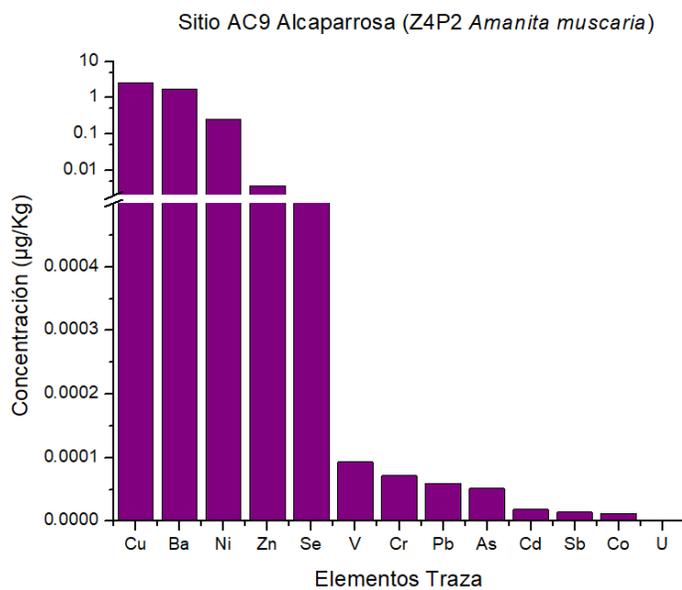
Se observa en la figura 94 los elementos traza que se encuentran en el agua de este sitio, son principalmente Fe (2800  $\mu\text{g/L}$ ), Zn (40  $\mu\text{g/L}$ ), Se (1.8  $\mu\text{g/L}$ ), Ni (1.5  $\mu\text{g/L}$ ) y Pb, V, As, Cu, Cr, Cd, Sb, Se con una concentración menor a 1  $\mu\text{g/L}$ .



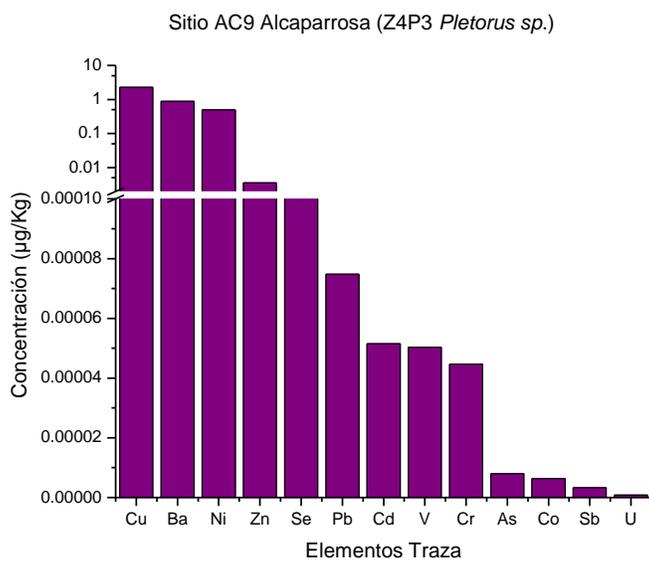
**Figura 94.**-Elementos Traza en el Sitio AC9 Alcaparrosa.



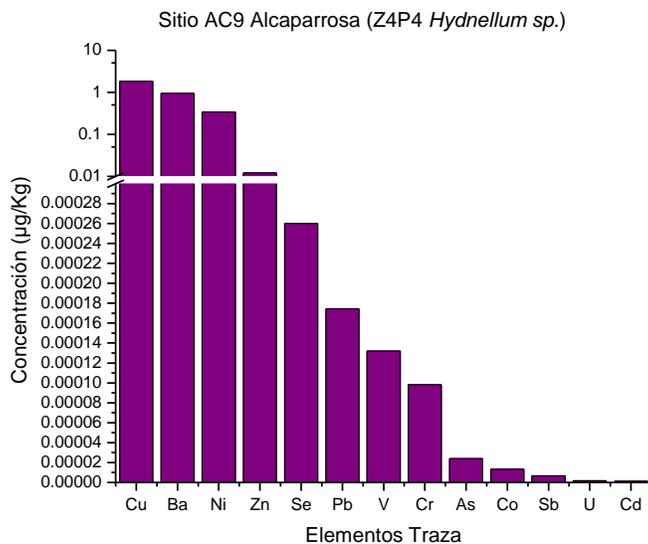
**Figura 95.**-Elementos traza encontrados en la muestra Z2P1 *Boletus edulis*.



**Figura 96.-**Elementos traza encontrados en la muestra Z4P2 *Amanita muscaria*.



**Figura 97.-** Elementos traza encontrados en la muestra Z4P3 *Pleurotus sp.*

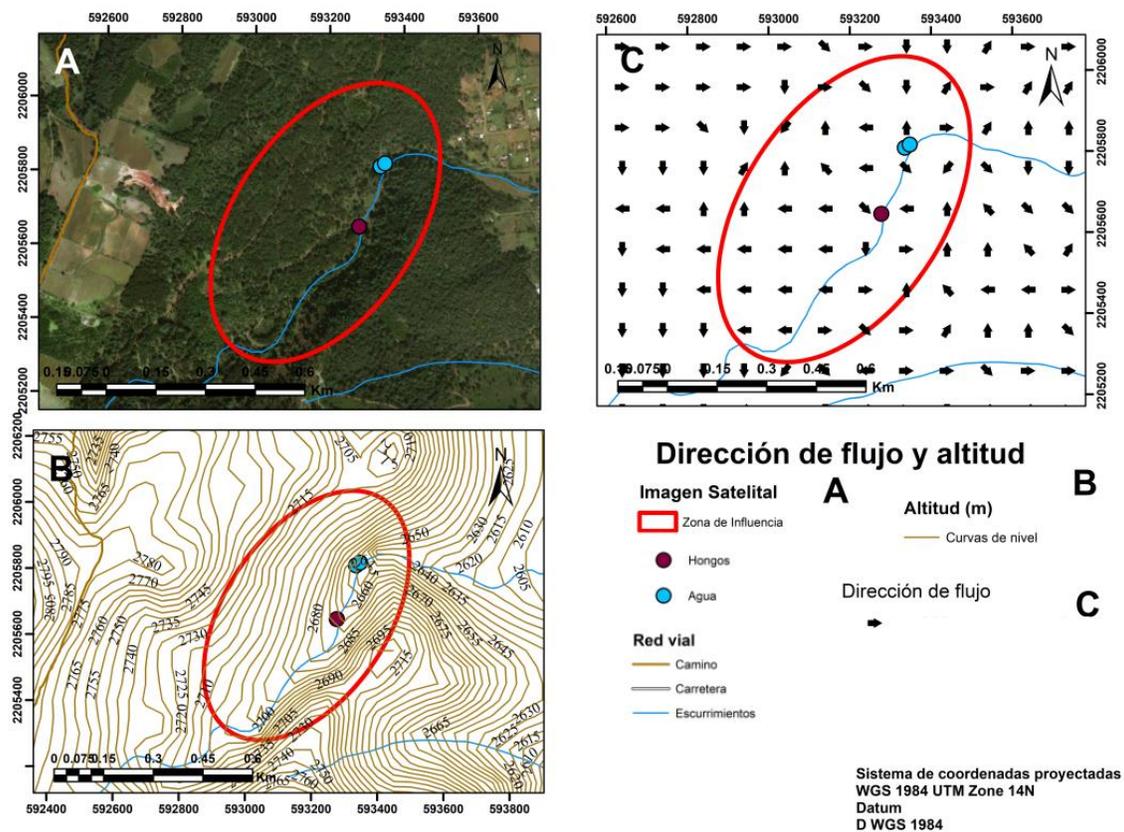


**Figura 98.-** Elementos traza encontrados en la muestra Z4P4 *Hydnellum sp.*

### 5.2.10 Sitio AC10 Ocojala

En este sitio se muestreo un punto de agua, A18AC30, analizada en ICP-MS e ICP-OES y una muestra de hongo Z1P2 (*pleurotus sp*) procesada por digestión ácida. Aquí no hubo muestra de suelo.

La imagen satelital dentro de la figura 99 revela que el muestreo está dentro de una zona boscosa, las muestras se tomaron a 2680 msnm y la dirección de flujo en promedio va hacia el suroeste. La zona de influencia cuenta con 850 metros de largo y 490 metros de ancho.



**Figura 99.**-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC10.

La unidad geopedológica en la que se encuentran las dos muestras, de agua y hongo, es la número siete, se caracteriza por tener una geología de tipo roca ígnea extrusiva ácida, el tipo de uso de suelo es vegetación secundaria arbustiva y bosque de pino-encino con una pendiente de entre 10 y 15 grados; cercano a la zona no existen fallas (Ver Figura 100).

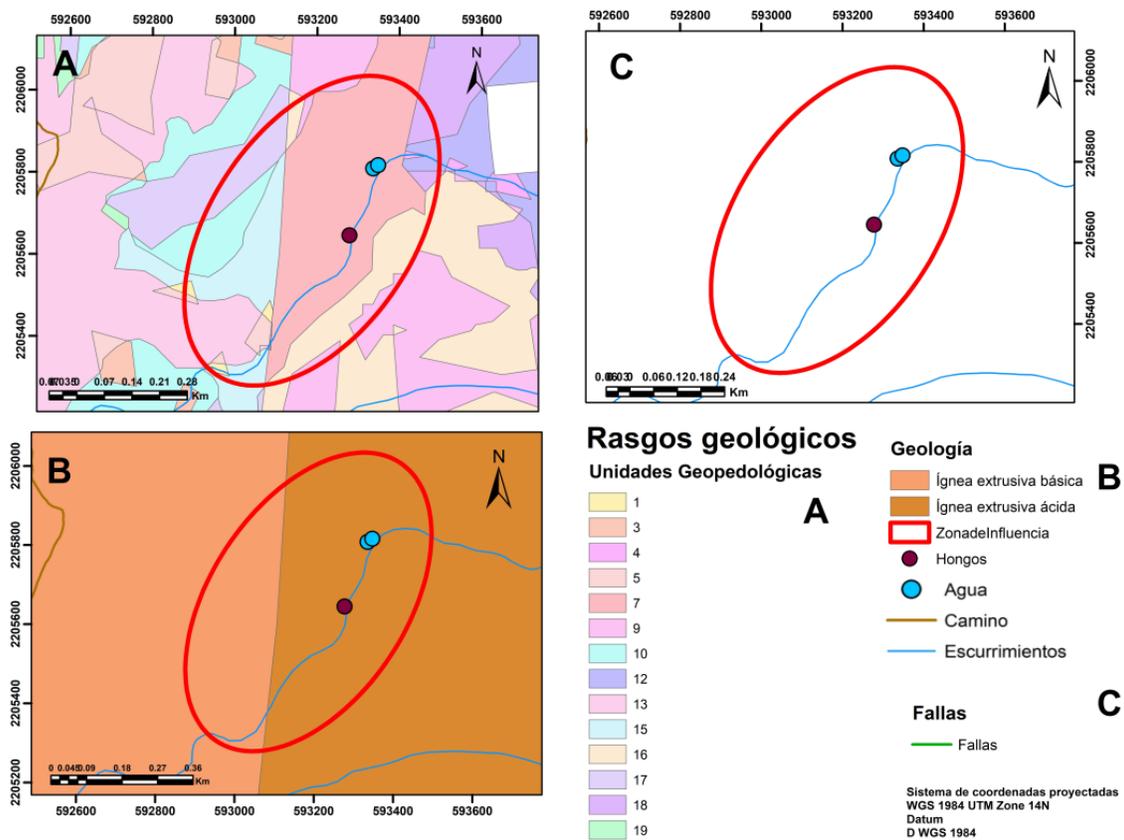
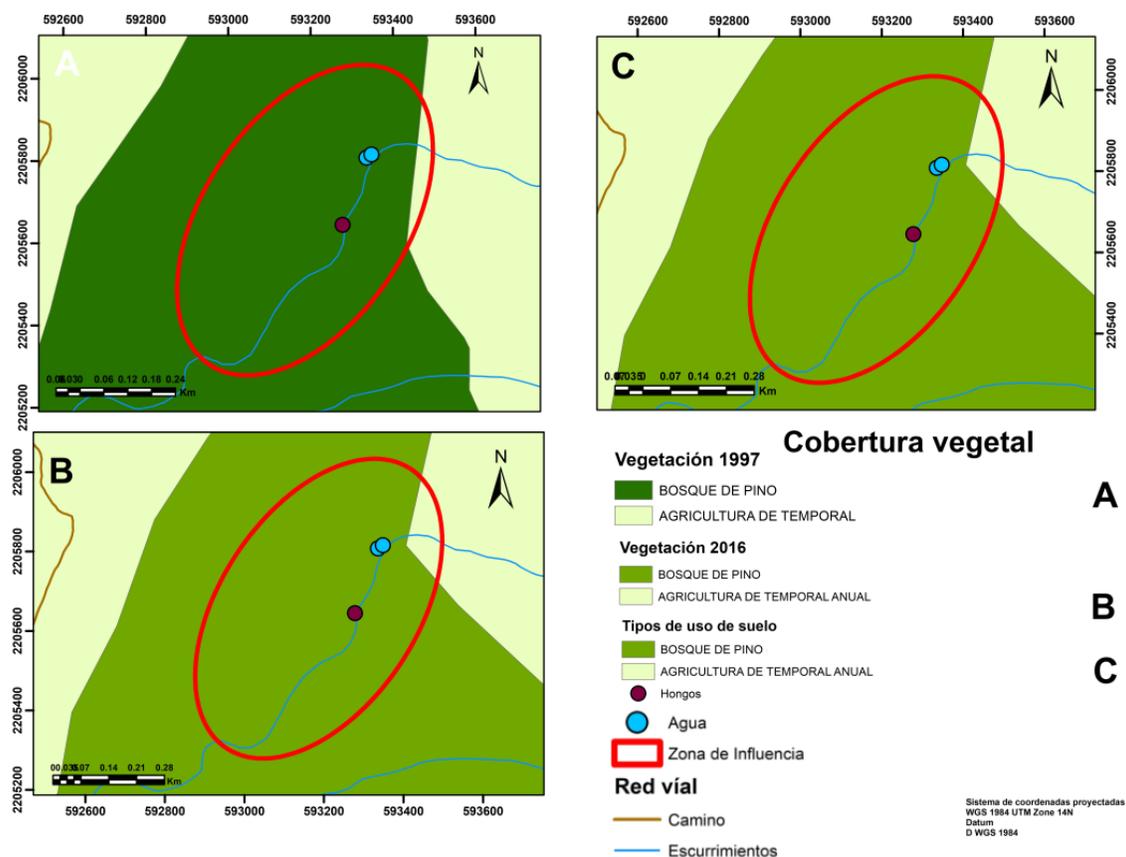


Figura 100.-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC10.

En el caso de la cubierta vegetal desde el año 1997 hasta el 2018 no presenta modificaciones, caracterizado por una cubierta vegetal de tipo bosque de pino en la zona de influencia y los alrededores, aunque en los extremos este y oeste presenta agricultura de temporal y anual (Ver Figura 101).



**Figura 101.**-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC10.

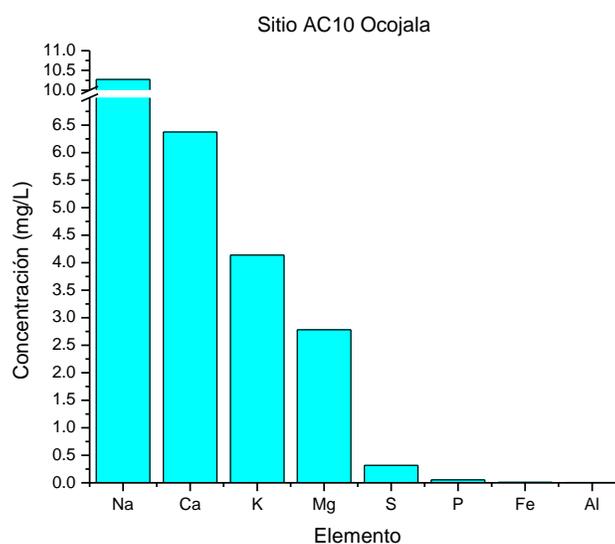
A continuación, se presentan una serie de parámetros medidos durante el muestreo en campo en la época de secas para la muestra A18AC30 (Ver Tabla 39)

**Tabla 39.**- Parámetros medidos para la muestra A18AC30 durante el muestreo.

pH	T(°C)	Conductividad (μS/cm)	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Oxígeno disuelto (mg/L)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (mg/L)
7.44	17.5	702	148	7.5	2	0.2	0	1.6

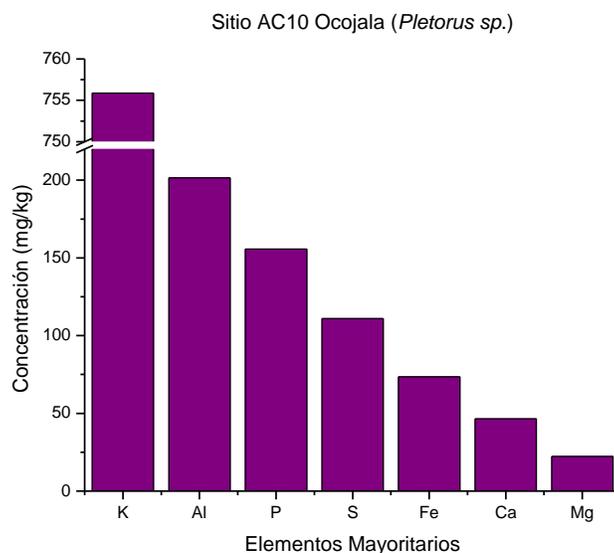
En este sitio la muestra de agua presenta un valor de pH de 7.44. Los elementos mayoritarios que se encuentran en el agua de este sitio son principalmente Na con 10 mg/L, Ca con 6 mg/L, K con 4.5 mg/L, Mn con 2.5 mg/L, S, P y Fe 1mg/L (Ver Figura 102).

Se tiene nula o muy poca presencia de elementos metálicos como el Fe y el Al debido a que las condiciones de pH neutros a básicos no favorecen la presencia de iones como estos en disolución (Chang y Goldsbey, 2013).



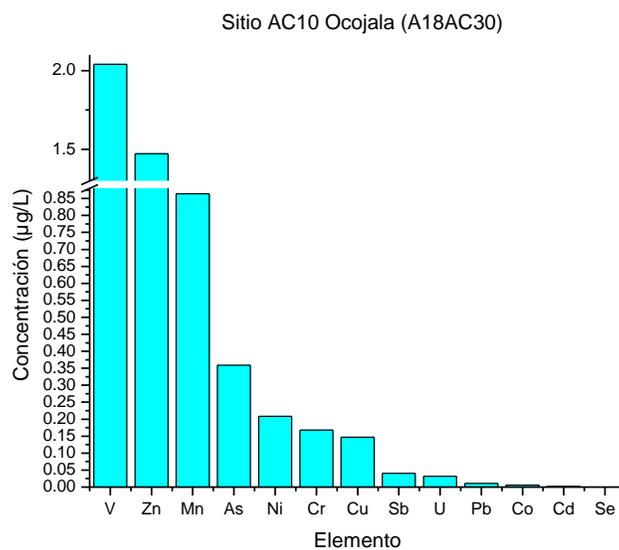
**Figura 102.**-Elementos mayoritarios en el Sitio AC10 Ocojala, muestra A18AC30

La figura 103 muestra los elementos mayoritarios para la muestra de hongos *Pleurotus sp.* donde se observa que el elemento con mayor presencia es el K y el elemento con menor presencia es el Mn.



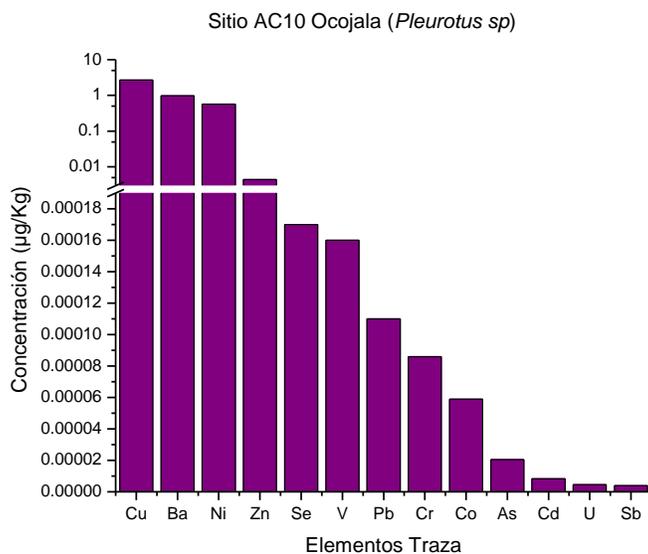
**Figura 103.**-Elementos mayoritarios encontrados en la muestra Z1P2 de hongos perteneciente a la familia *Pleurotus sp.*

Se aprecian en la figura 104, la concentración de los elementos traza que se encuentran en el agua de este sitio, Fe (3.5  $\mu\text{g/L}$ ), V (2  $\mu\text{g/L}$ ), Zn (1.5  $\mu\text{g/L}$ ), Mn (1  $\mu\text{g/L}$ ) y As, Ni, Cr, Cu, Sb, U, Pb, Co, Cd y Se con una concentración menor a 1  $\mu\text{g/L}$ .



**Figura 104.**-Elementos mayoritarios en el Sitio AC10 Ocojala, muestra A18AC30.

La figura 105 muestra los elementos traza para la muestra de hongos *Pleurotus sp.* donde se observa que el elemento con mayor presencia es el Cu y el de menor presencia es el Sb.

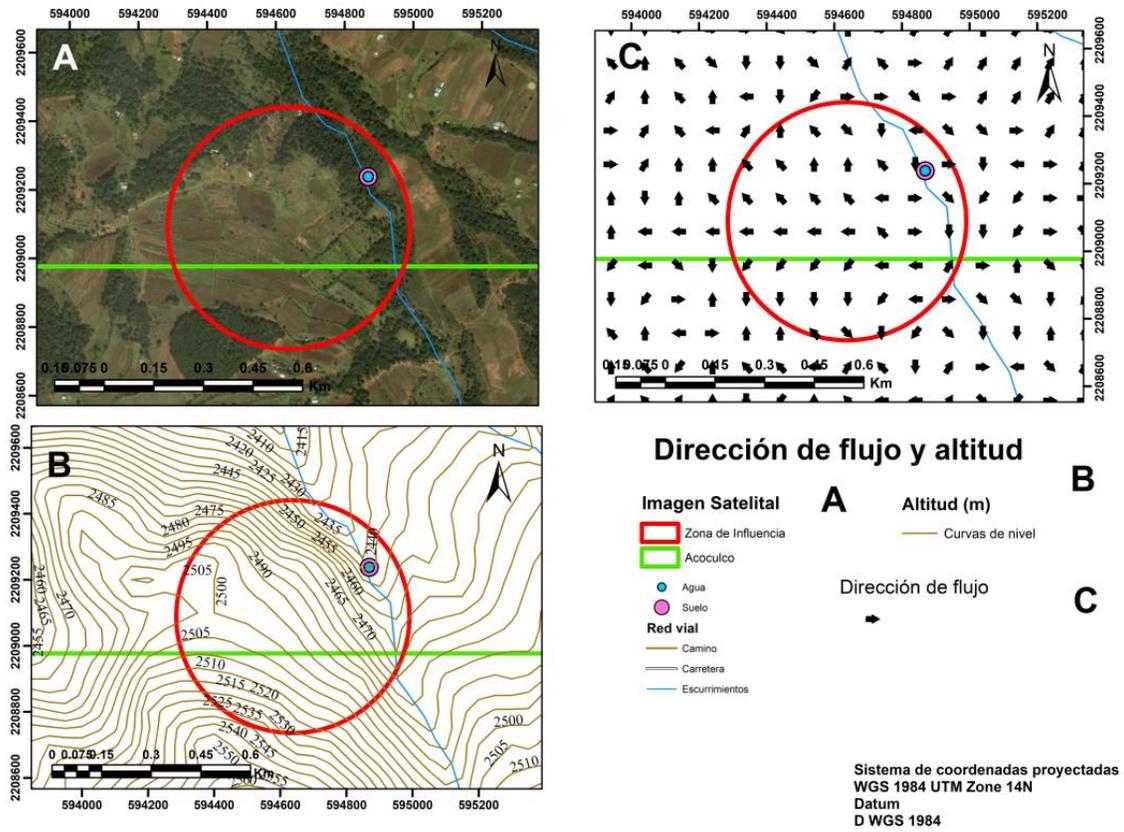


**Figura 105.-** Elementos traza encontrados en la muestra Z1P2 de hongos perteneciente a la familia *Pleurotus sp.*

### 5.2.11 Sitio AC11 El Tehuacán

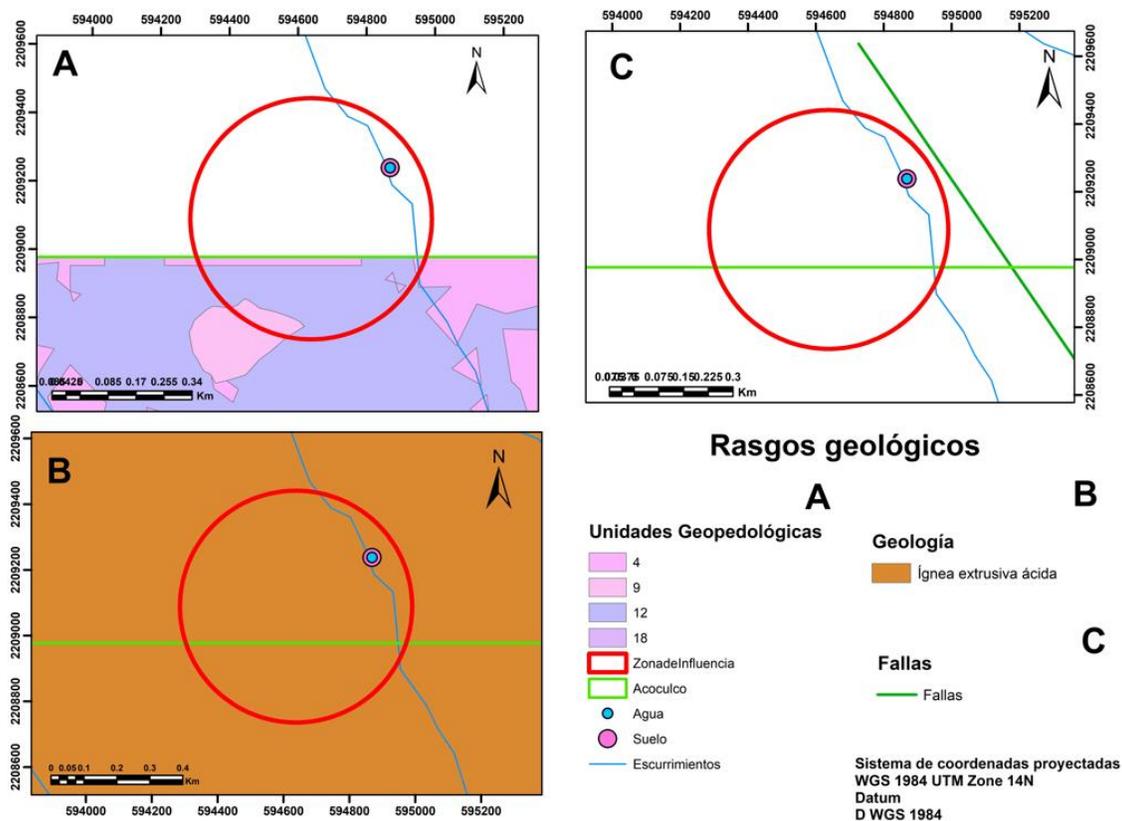
En este sitio se muestreó un perfil de suelo (A18AC31) procesado por extracción secuencial, y una muestra de agua (B18AC12) analizada por ICP-MS e ICP-OES.

En la figura 106, en la sección A, se puede ver que se encuentra dentro de un parche de vegetación rodeado por una zona de agricultura, la altitud del sitio es de 2440 msnm y la dirección de flujo va hacia el oeste.



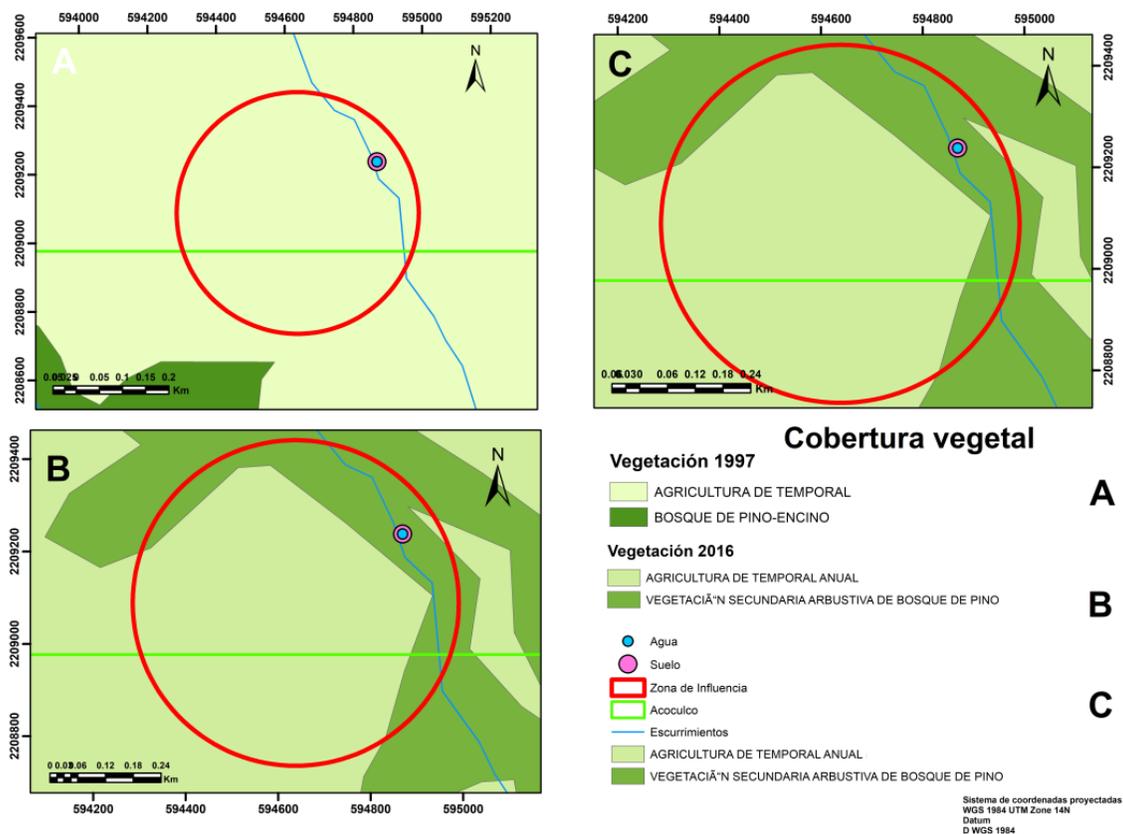
**Figura 106.**-Mapa de la imagen satelital de sitio (A), las curvas de nivel (B) y la dirección del flujo del agua (C) para el sitio AC11.

Para la figura 107 se ve que la geología predominante es de tipo roca ígnea extrusiva ácida y se encuentra una falla cercana a la zona, pero fuera de la zona de influencia.



**Figura 107.**-Mapa de las unidades ambientales (A), la geología local (B) y las fallas locales (C) para el sitio AC11.

En el caso de la cubierta vegetal, desde el año 1997 está conformada principalmente por agricultura de temporal; para el año 2016 la cubierta vegetal cambió a vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino (Ver Figura 108).



**Figura 108.**-Mapa de la vegetación de la zona en el año 1997 (A), vegetación de la zona en el año 2016 (B) y tipo de uso de suelo en el año 2018 (C) para el sitio AC11.

Las tablas 40, 41 y 42 contienen los resultados de las variables que comprenden la estructura del suelo, las variables fisicoquímicas y la textura y porcentaje de arcilla, limo y arena para los dos perfiles de suelo A18AC31 y sus respectivos horizontes.

**Tabla 40.**- Variables que conforman la estructura del suelo en el sitio AC11

Perfil	Horizonte	% Rocas	Estabilidad de agregados	Raíces	Densidad aparente	Tasa de infiltración
					mg/m <sup>3</sup>	cm/ha
A18AC31	A	57	muy alta	abundantes	1.08	674.4

**Tabla 41.**- Variables fisicoquímicas en el sitio AC11

Perfil	Horizonte	T	Humedad in situ	Humedad	Carbono orgánico	pH	CE
		°C					μS/cm
A18AC31	A	12.7	15	21.3	5.4	5.8	80

**Tabla 42.-** Textura del suelo en el sitio AC11

Perfil	Horizonte	Textura	Porcentaje (%)		
			Arcilla	Limo	Arena
A18AC31	A	franco arcillo arenoso	23.85	25	51.15

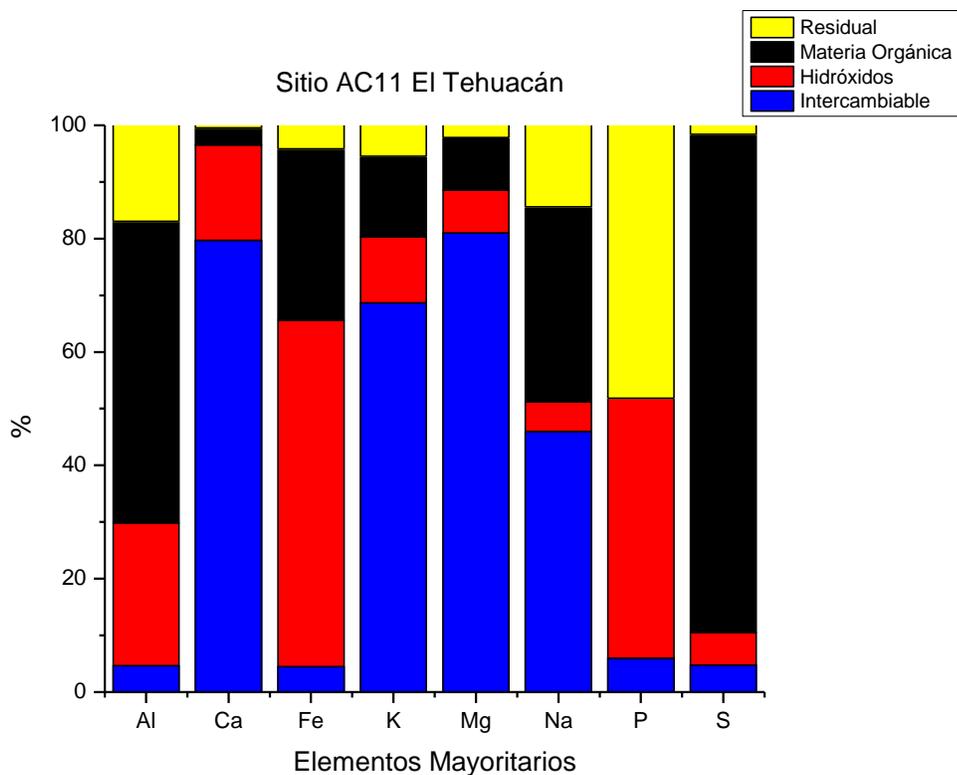
A continuación, se presentan una serie de parámetros medidos durante el muestreo en campo en la época de secas para la muestra A18AC30 (Ver Tabla 43), en este caso se tomaron también los parámetros cloruros y sulfatos.

**Tabla 43.-** Parámetros medidos para la muestra A18AC30 durante el muestreo.

pH	T	Conductividad	STD	Oxígeno disuelto	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	°C	µS/cm			mg/L					
7.9	14	6.26	124	7.38	52	0.2	0	0.01	0.01	0

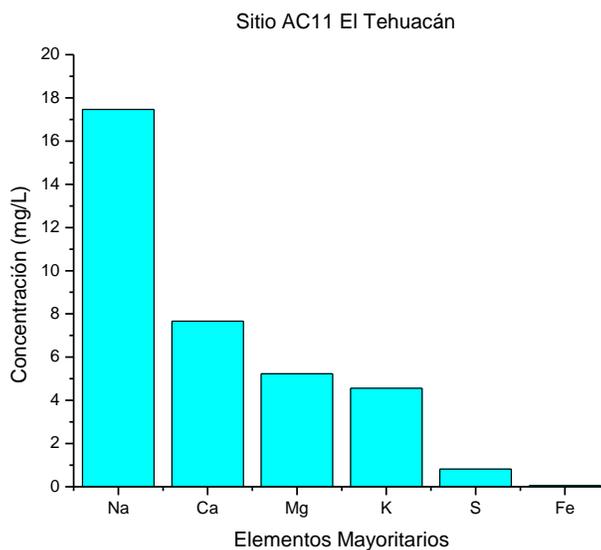
La figura 109 muestra el contenido de la fracción intercambiable los principales elementos que la conforman siendo Ca, K, Mg y Na. En la fracción de los hidróxidos se encontraron elementos como Fe y P. En la materia orgánica el Fe, Na y S y en la fracción residual Na y P en menor medida que las otras fracciones.

Este perfil, al igual que los perfiles AC3 y AC4, muestra la misma composición de las cuatro fracciones a excepción del Fe. Para este caso el hierro se encuentra principalmente en la fracción de hidróxidos de hierro, muy probablemente este sitio está sujeto a inundaciones y por esta razón el Fe se presenta como un hidróxido (Ramón et al., 2011). Se puede notar como en la composición de las aguas (Ver Figura 96) el Fe no está presente, esto porque se ha quedado en los nódulos de hierro del suelo (Roca et al., 2007).



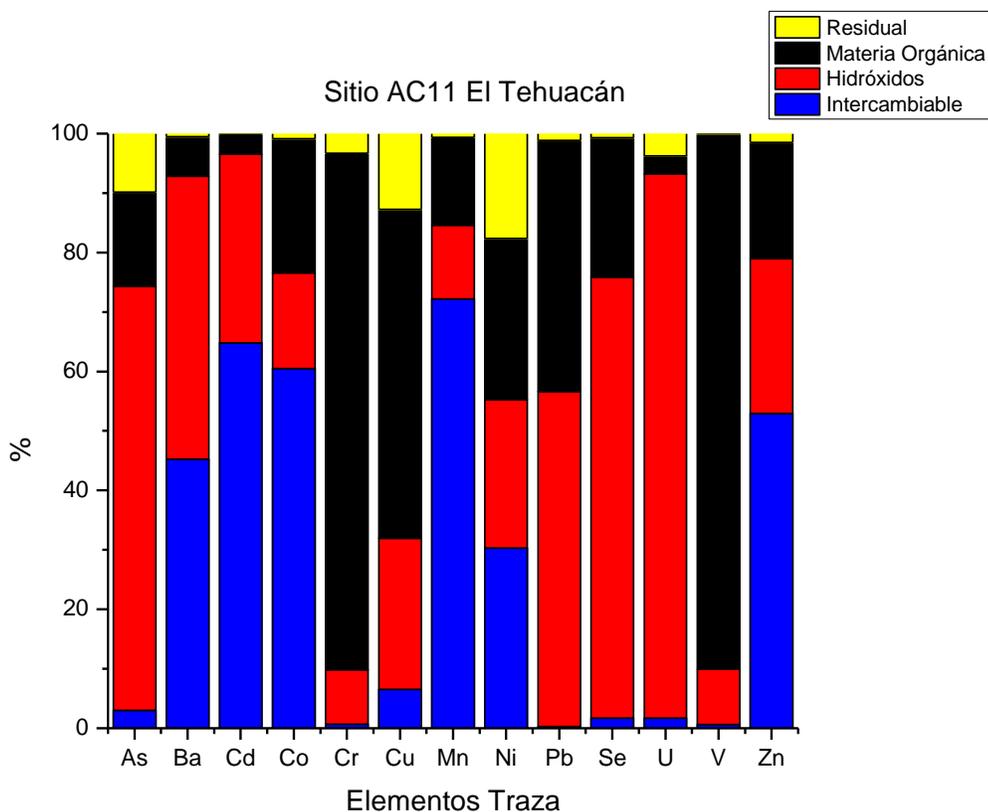
**Figura 109.**-Elementos mayoritarios que conforman el suelo en el sitio AC9, muestra A18AC31.

Se puede observar en la figura 110, que los elementos mayoritarios que se encuentran en el agua de este sitio son principalmente Na (10 mg/L), Ca (6 mg/L), K (4.5 mg/L), Mn (2.5 mg/L), S, P y Fe 1mg/L.



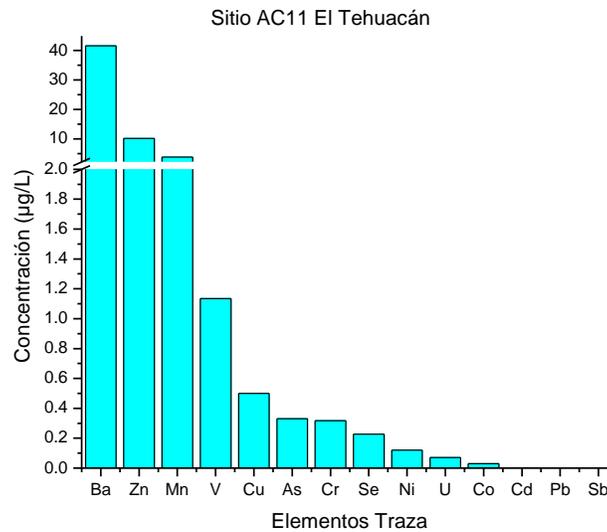
**Figura 110.**-Elementos mayoritarios en el Sitio AC11 El Tehuacán.

La figura 111 muestra los elementos traza con el mayor porcentaje dentro de la fracción intercambiable Ba, Cd Co, Mn, Ni y Zn; para la fracción de los hidróxidos son As, Ba, Cd, Cu, Ni, Pb Se, U y Zn, para la materia orgánica son Co, Cr, Cu, Ni, Pb Se y V y para la fracción residual son As Cu y Ni.



**Figura 111.-** Elementos traza que conforman el suelo en el sitio AC11, muestra A18AC31.

Los elementos traza que se encuentran en el agua de este sitio son principalmente Ba (40 µg/L), Zn (10 µg/L), Mn (4 µg/L), Vario (1.1 µg/L) y Cu, As, Cr, Se, Ni, U, Co, Cd, Pb y Sb con una concentración menor a 1 µg/L (Ver Figura 112).



**Figura 112.**-Elementos traza en el Sitio AC11 El Tehuacán.

### 5.3. Análisis global

En las tablas 44 y 45 se muestra la fracción predominante de los elementos mayoritarios y traza en cada uno de los sitios de suelo muestreados, I= fracción intercambiable y ligada a carbonatos, H= hidróxidos de Fe y óxidos de Mn, MO= Materia orgánica y sulfatos y R= Residual.

Las fracciones indican con qué facilidad se pueden transportar los elementos desde el suelo, hacia otras matrices ambientales (Tessier et al., 1979a). Como ya se había mencionado en capítulos anteriores, por lo tanto, los principales elementos que están siendo transportados son el Ca, K, Mg y Na. Además pueden ser fácilmente asimilados por las plantas al estar disueltos y en forma iónica (Llatance et al., 2018; Morales y Sepúlveda-Jiménez, 2012).

La siguiente fracción, la de hidróxidos, los elementos están fijos en estructuras como los nódulos de Fe y Mn (Tessier et al., 1979b). Pueden ser transportados una vez que se transforman a partir de ligeros cambios en las condiciones del ambiente, en especial de pH o de condiciones de óxido-reducción. Así, estos pueden ser liberados para su transporte o aprovechamiento de las plantas y hongos como nutrientes para sus funciones metabólicas (Díaz, 2006; Morales y Sepúlveda-Jiménez, 2012; Roca et al., 2007).

La fracción de la materia orgánica es un poco más compleja que las dos anteriores y por tanto, un poco más difícil de sustraer los elementos para su transporte y obtención para las plantas (Julca-Otiniano et al., 2006). Aun así, las plantas y hongos tienen técnicas de extracción de estos elementos a través de las raíces en el caso de las plantas o hifas en los hongos, generan enzimas y ácidos orgánicos que producen cambios tanto de pH y en las condiciones redox, liberando los metales y algunos nutrientes (Díaz, 2006; Morales y Sepúlveda-Jiménez, 2012; Tarbuck y Lutgens, 2005). Dichos elementos, pueden ser utilizados para sus funciones metabólicas o ser traslocados a diversas partes de la planta o del hongo en cuestión (Díaz, 2006; Juárez Vázquez et al., 2010).

Por último, la fracción residual, está conformada por el material parental remanente en el suelo que ha sido sujeto a intemperismo pero aún no se ha degradado completamente para integrarse a otras fracciones (Tarbuck y Lutgens, 2005; Tessier et al., 1979b). Por lo tanto, los elementos de esta fracción son difícilmente transportable a otras matrices ambientales a condiciones normales.

Además de todos los procesos que ocurren en el suelo, ya sea por acción de los microorganismos, plantas u hongos que intervienen en todos los procesos de transporte, están los procesos y las condiciones ambientales generadas por el hidrotermalismo de la zona, en este caso los puntos AC7, AC9 y AC11, están considerados como hidrotermales.

En estos sitios las condiciones son diferentes que en las otras zonas y se ve reflejado en el comportamiento de los elementos a través de las diversas fracciones, por ejemplo:

Se observa que en la tabla 41 el Al y el Fe se encuentran en la fracción de hidróxidos, esto es por las condiciones tanto ácidas como de bajos niveles de oxígeno que predominan en el lugar (Roca et al., 2007) En el caso de AC7 al ser parte de una laguna, lo que permite la formación de hidróxidos (Ramón et al., 2011).

**Tabla 44.-** Fracción predominante de cada elemento mayoritario en los 10 sitios de suelo, azul=intercambiable, roja=hidróxidos de Fe y Mn, negro=materia orgánica y amarillo=residual.

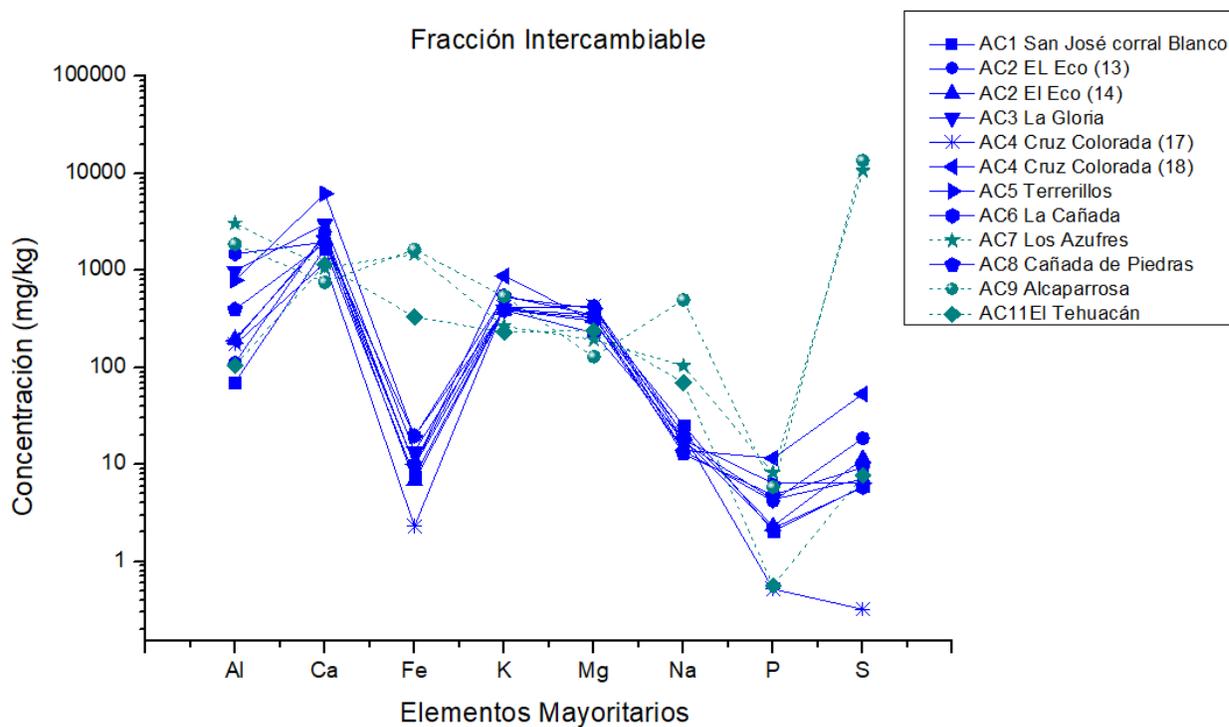
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S
AC1	MO	I	MO	MO	I	I	MO	MO
AC2(13)	MO	I	MO	I	I	I	MO	MO
AC2(14)	MO	I	MO	I	I	I	MO	MO
AC3	MO	I	MO	I	I	I	MO	MO
AC4(17)	MO	I	R	I	I	I	R	MO
AC4(18)	MO	I	MO	I	I	I	MO	MO
AC5	MO	I	MO	I	I	I	MO	MO
AC6	MO	I	MO	I	I	I	MO	MO
AC7	H	I	H	I	I	I	MO	MO
AC8	MO	I	MO	I	I	I	MO	MO
AC9	H	I	H	I	I	I	MO	MO
AC11	MO	I	H	I	I	I	R	MO

**Tabla 45.-** Fracción predominante de cada elemento traza en los 10 sitios de suelo, azul=intercambiable, roja=hidróxidos de Fe y Mn, negro=materia orgánica y amarillo=residual.

	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	Zn
AC1	MO	I	R	MO	MO	MO	MO	MO	R	R	R	R	MO	MO
AC2(13)	R	H	H	H	R	R	H	H	H	MO	MO	H	R	H
AC2(14)	MO	I	H	H	MO	MO	H	R	R	I	R	R	R	MO
AC3	MO	I	H	H	MO	MO	H	MO	MO	R	MO	H	MO	MO
AC4(17)	MO	H	H	H	MO	MO	H	R	MO	R	MO	H	MO	MO
AC4(18)	MO	H	H	H	MO	MO	H	MO	MO	R	MO	H	MO	MO
AC5	MO	H	H	MO	MO	MO	H	MO	MO	MO	MO	H	MO	MO
AC6	MO	H	H	H	MO	MO	H	MO						
AC7	H	H	I	MO	MO	H	MO	MO	H	ND	MO	I	MO	I
AC8	MO	H	R	H	MO	MO	H	MO	R	MO	MO	H	MO	MO
AC9	MO	H	I	I	MO	I	I	I	H	MO	I	I	MO	I
AC11	H	I	I	I	MO	MO	I	I	H	ND	H	H	MO	I

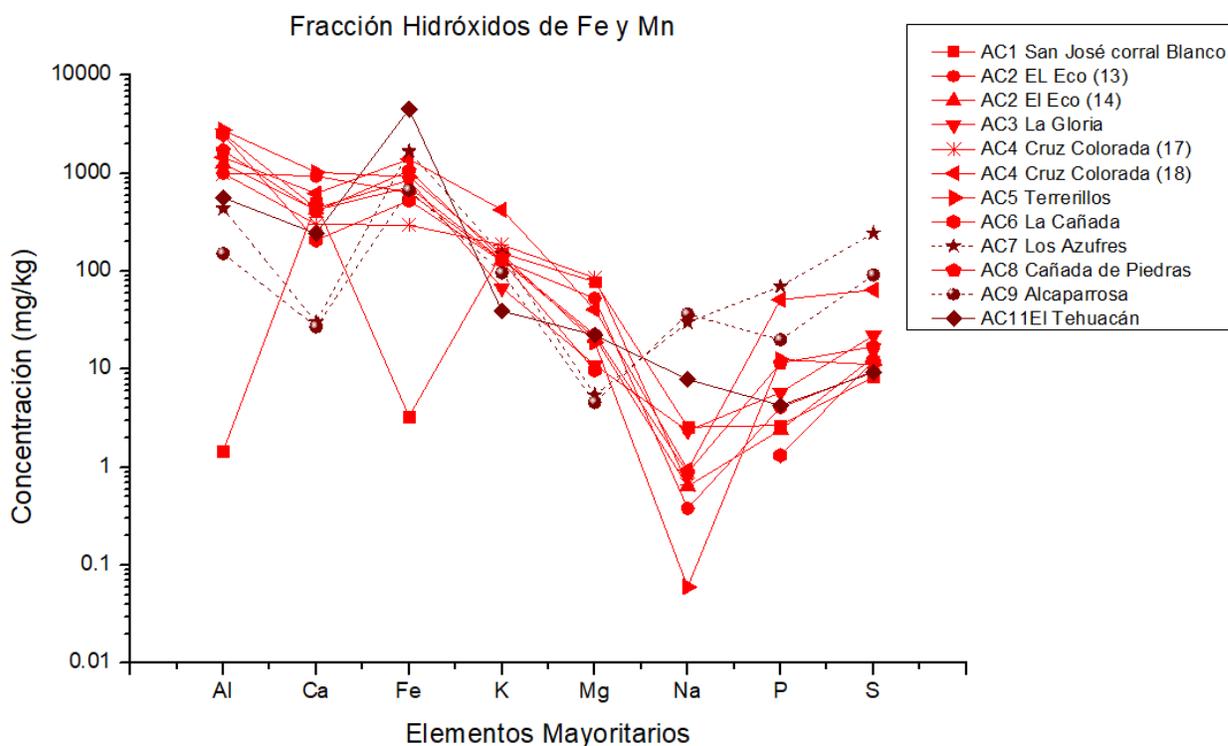
A continuación, se presentan los diagramas de Schoeller modificados que representan la concentración de los elementos mayoritarios y traza en el suelo de las diferentes fracciones, intercambiable, hidróxidos de Fe y Mn, materia orgánica y la residual y posteriormente el del agua, las plantas y los hongos. Los sitios que tienen un cambio de color y línea punteada son los sitios hidrotermales.

El diagrama Schoeller modificado para los sitios muestreados del suelo de la figura 113 muestra que elementos como el Al, Fe, Na y el S se encuentran más concentrados en los sitios hidrotermales. Estos elementos pueden formar minerales como pirita ( $FeS_2$ ) o combinado con algún elemento traza como el As, para formar arsenopirita ( $FeAsS$ ) (Meyer, 1977).



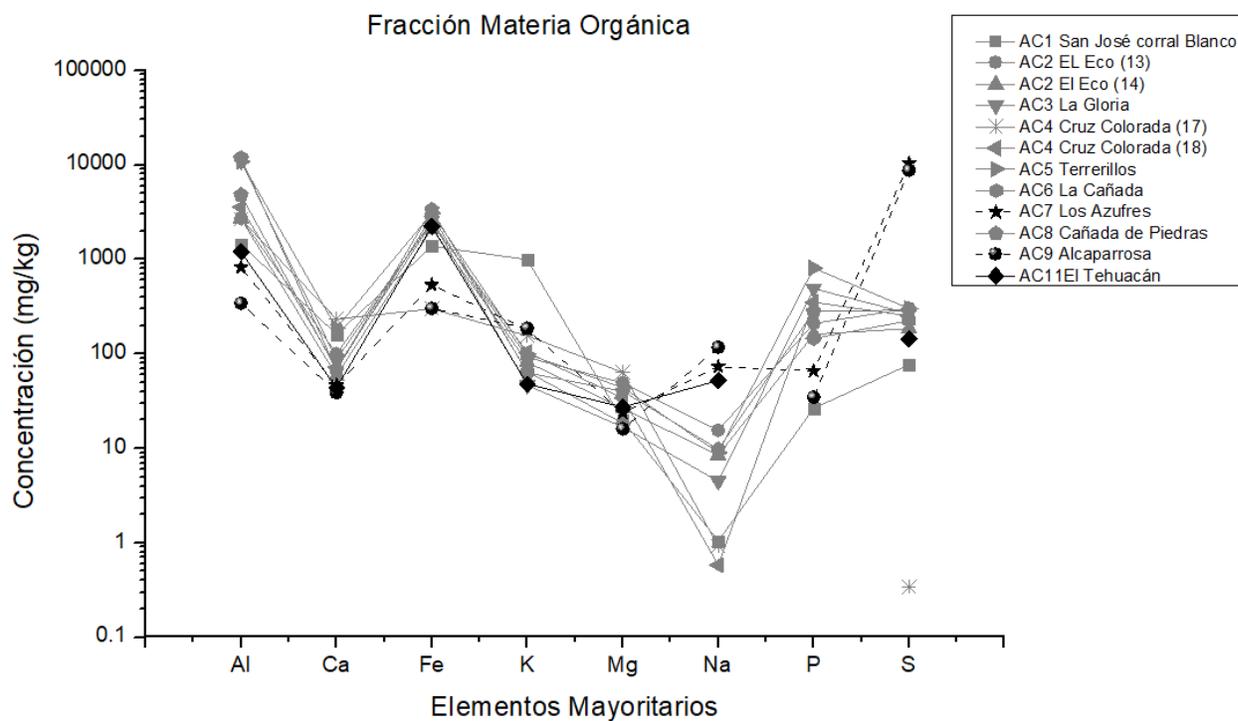
**Figura 113.**-Diagrama Schoeller que representa la concentración en mg/kg de los elementos analizados en la extracción secuencial para la fracción intercambiable. Los puntos en color claro y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales.

La figura 114 muestra los elementos mayoritarios que se encuentran dentro de la fracción de hidróxidos de Fe y Mn. Donde Al y Fe son los que presentan las concentraciones más elevadas y el Na es el elemento menos abundante en esta fracción. Para los puntos hidrotermales los elementos que más abundantes son el Fe para el sitio del Tehuacán y el S para el sitio de los Azufres.



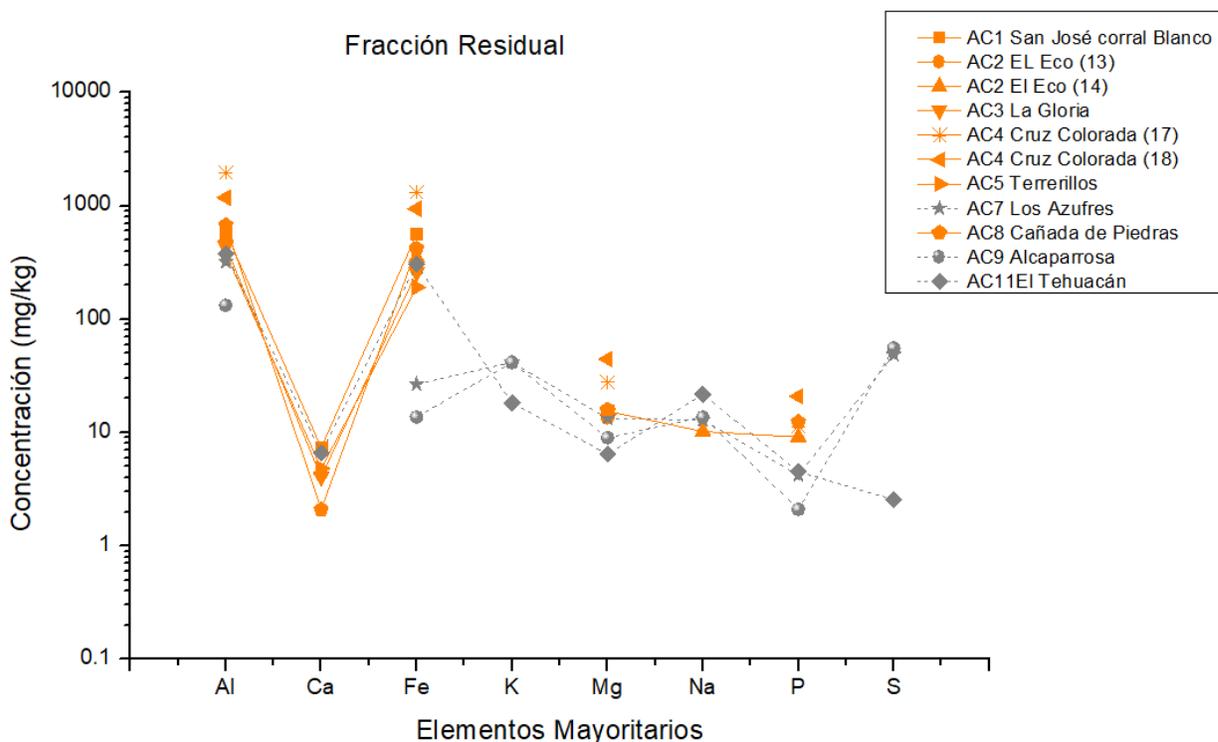
**Figura 114.**-Diagrama Schoeller que representa la concentración en mg/kg de los elementos analizados en la extracción secuencial para la fracción de Hidróxidos de Fe y Mn. El punto en color vino y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales.

La figura 115 muestra los elementos mayoritarios que se encuentran dentro de la fracción de la materia orgánica. Aquí se observa que los elementos Al, Fe y P son los que presentan las concentraciones más elevadas y el Na el elemento menos abundante en esta fracción. Para los sitios hidrotermales se tiene que el Na y el S son los elementos más abundantes, esto es porque existe un aporte de S a través de la desgasificación de suelo (Peiffer et al., 2014), éste interactúa con el suelo acidificando (Meyer, 1977) y promoviendo la disolución del Al y el Fe llevándolos a la fracción intercambiable (Ver Figura 114). Por consiguiente, al estar en la fracción intercambiable las demás fracciones presentan una concentración menor que en los demás sitios (Ver Figuras 115 a 118 para elementos Al y Fe).



**Figura 115.**-Diagrama Schoeller que representa la concentración en mg/kg de los elementos analizados en la extracción secuencial para la fracción de la materia orgánica. Los puntos en color negro y líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales

La figura 116 muestra los elementos mayoritarios que se encuentran dentro de la fracción residual, observamos que los elementos Al, Fe son los que presentan las concentraciones más elevadas y para los sitios hidrotermales el K y S.



**Figura 116.-** Diagrama Schoeller que representa la concentración en mg/kg de los elementos analizados en la extracción secuencial para la fracción residual. Los puntos en color gris y líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales.

El diagrama Schoeller modificados para las muestras de agua, muestra que los elementos mayoritarios presentes en el agua en mayor proporción son Ca y Na para Ocojala y para los puntos hidrotermales es el S (Ver Figura 117 y Tabla 46).

Los puntos que sobrepasan los límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2017 (Secretaría de Salud, 2017) están representados en la siguiente tabla:

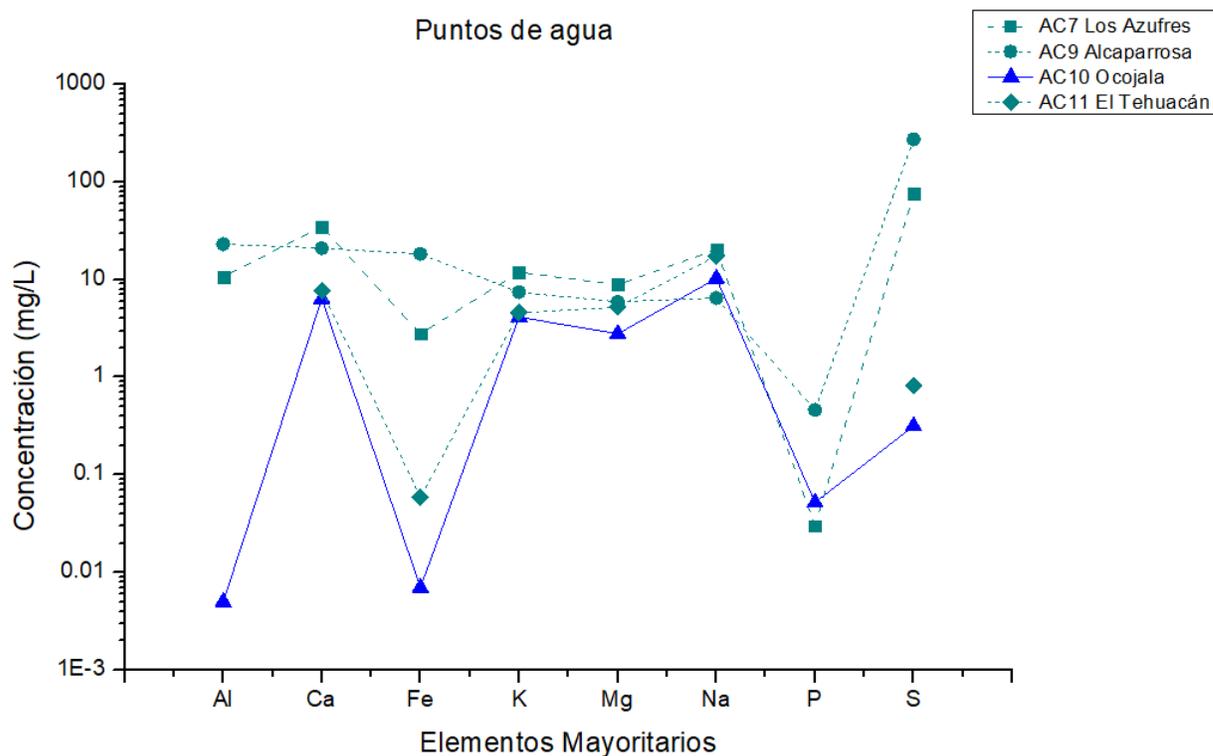
**Tabla 46.-** Límites máximos permisibles para los elementos mayoritarios.

Elemento	Límite en la NOM (mg/L)	Localidad que lo rebasa	Valor encontrado (mg/L)	Veces que lo rebasa
<b>Al</b>	0.2	Los Azufres	10	50
		Alcaparrosa	20	100
<b>Fe</b>	0.3	Los Azufres	3	10
		Alcaparrosa	19.8	66

A continuación (Ver Tabla 47), se presentan las concentraciones de azufre para los puntos hidrotermales:

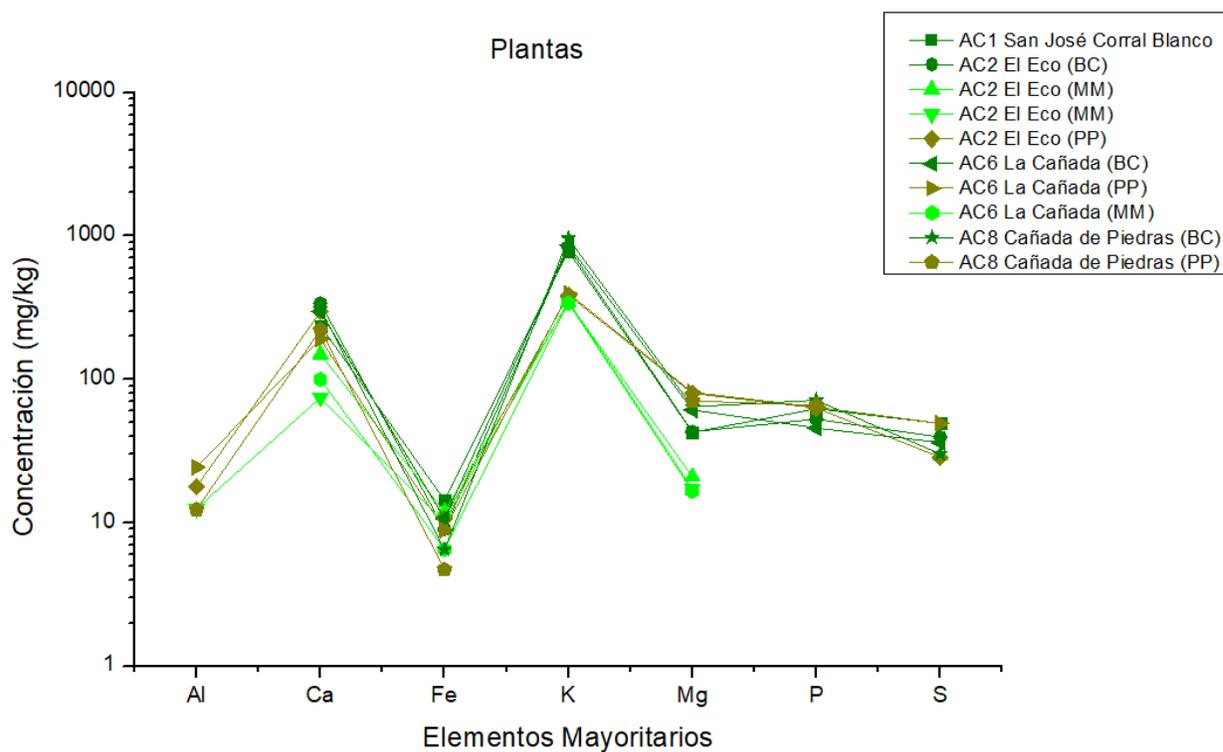
**Tabla 47.-** Contenido de S en los puntos hidrotermales.

Elemento	Localidad que lo rebasa	Valor encontrado (mg/L)
S	AC7 Los Azufres	75.5
	AC9 Alcaparrosa	272.9
	AC 11 El Tehuacán	0.82



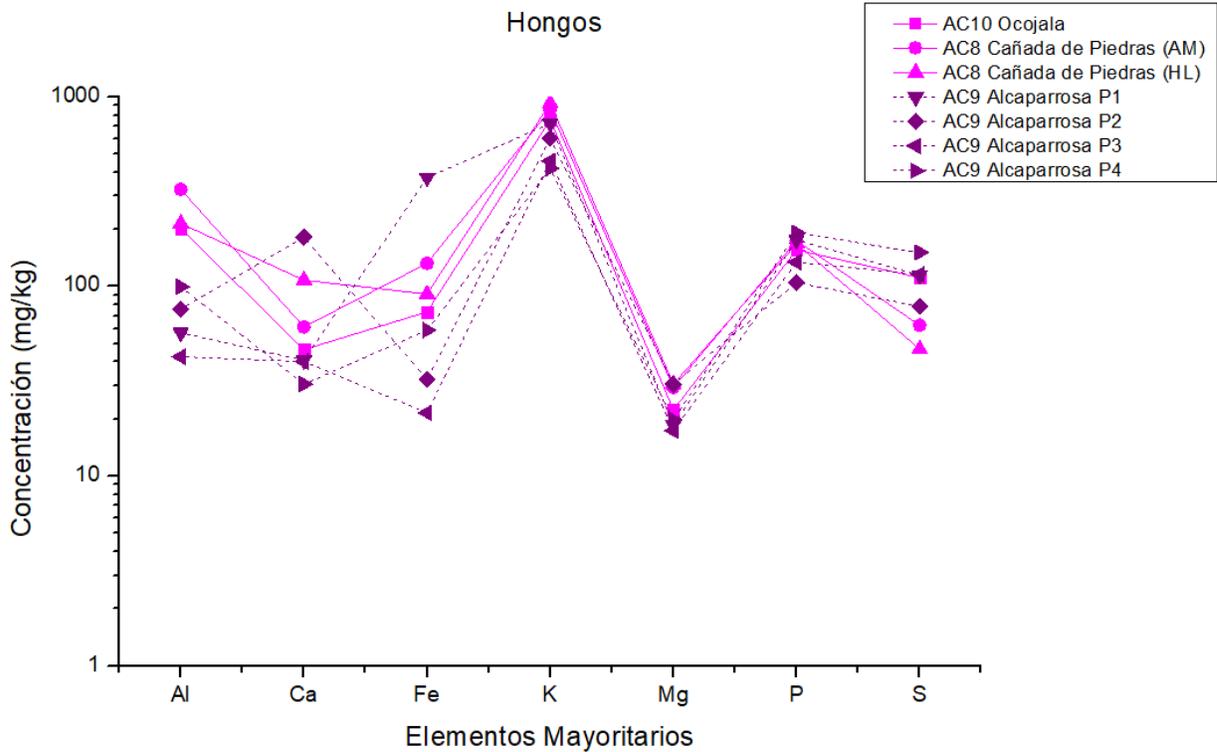
**Figura 117.-**Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos mayoritarios para el agua en una concentración de mg/L. Los sitios que están en color cian y líneas punteadas son considerados hidrotermales.

El diagrama Schoeller modificado para las plantas muestra que los elementos mayoritarios con una mayor concentración son el Ca y K (Ver Figura 118). Todas las muestras presentan el mismo patrón dentro del diagrama de Scholler lo que se interpreta como que todas tienen concentraciones muy parecidas obtenidas en el análisis. Cabe destacar que no se muestrearon plantas en las zonas hidrotermales.



**Figura 118.**-Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos mayoritarios para las plantas en una concentración de mg/kg. BC (*Baccharis conferta*), MM (*Muhlenbergia macroura*) y PP (*Pinus Patula*).

El diagrama Schoeller modificado para los hongos, muestra que el elemento mayoritario con una mayor concentración es el K y para uno de los sitios hidrotermales, representados con una línea punteada morada, es el Fe, Ca y S (Ver Figura 119).



**Figura 119.**-Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos mayoritarios para los hongos en una concentración de mg/kg. Los sitios que están en color morado oscuro y líneas punteadas son considerados hidrotermales. AM (*Amanita muscaria*) y HL (*Hypomyces lactifluorum*).

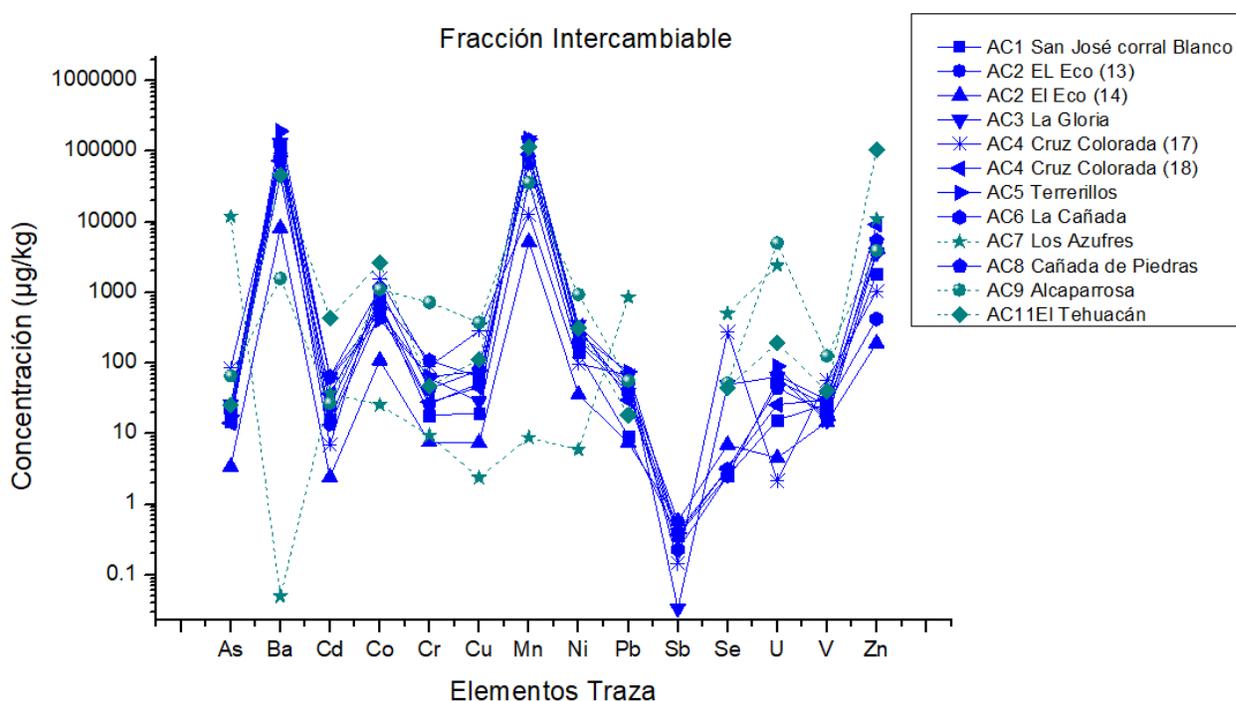
La figura 120 muestra el diagrama Schoeller modificado para los sitios muestreados del suelo y los elementos traza de la fracción intercambiable. En donde Ba y Cd son los que tienen una concentración mayor y en los sitios con línea punteada considerados hidrotermales tienen mayor concentración en elementos como As, Cr, Pb, U y Zn.

Como se indicó anteriormente la fracción intercambiable se identifica por un fácil transporte de los elementos. Además, las plantas y hongos pueden incorporar estos elementos de manera directa o se puede insertar a la cadena alimenticia a través de la ingesta directa del agua.

En este diagrama se muestra una alta concentración de As en el sitio AC7 Los Azufres. Las condiciones ambientales favorecen la presencia del arsénico inorgánico, As (III) y As(V), siendo una de las formas más tóxicas del elemento. Este punto es importante porque el As es un elemento con un alto grado de toxicidad clasificado como agente cancerígeno clase 1 por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (Smeester et al., 2011, Mandal y Suzuki, 2002).

También para el punto AC7 Los Azufres, se aprecia que el Pb está casi un orden de magnitud más arriba que los demás puntos, esto se debe a que en la zona realizan actividades de casería y carreras y continuamente disparan lo que es un aporte significativo de este elemento además del aporte geogénico de las rocas existentes en la zona (Sosa-Ceballos et al., 2018b).

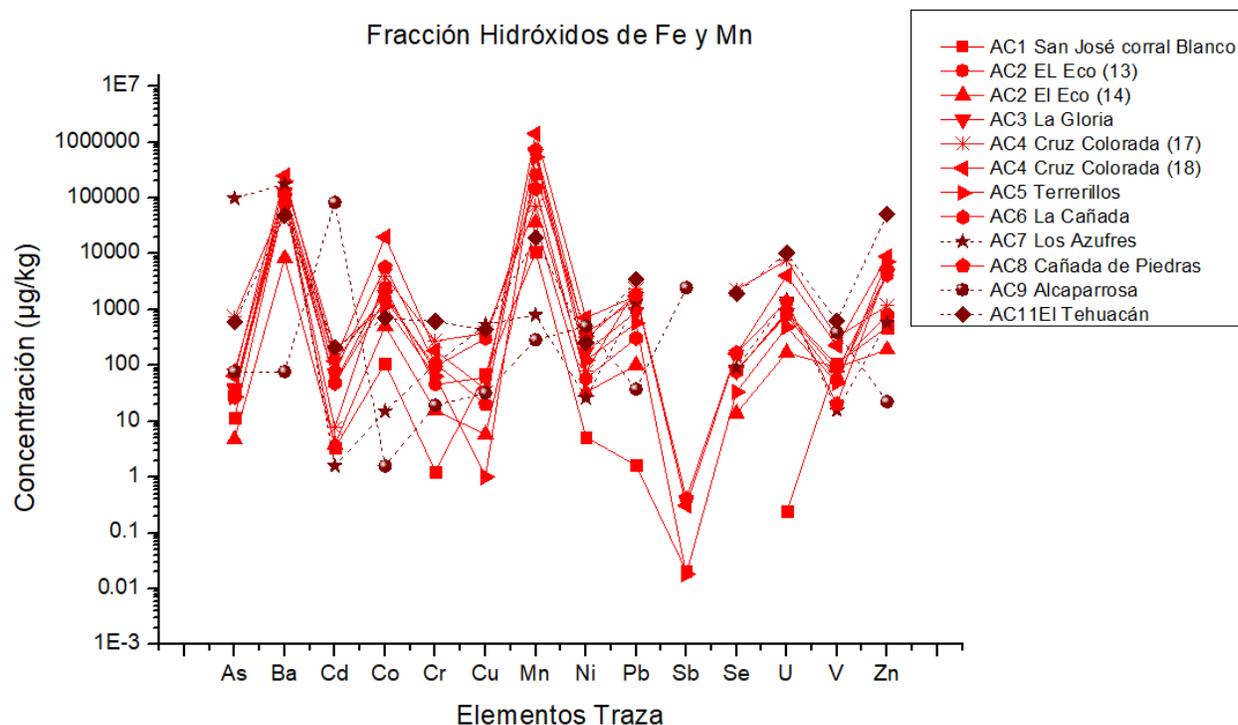
Por otro lado, el U sobresale para dos puntos AC7 y AC9, estos sitios hidrotermales al tener bajos pH tanto de agua como de suelo están en constante intemperismo al material parental, se sabe que las rocas que conforman el material parental del suelo contienen U por lo tanto este elemento puede estar presente bajo las condiciones acidas de estos sitios.



**Figura 120.**–Diagrama Schoeller que representa la concentración en  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de los elementos traza analizados en la extracción secuencial para la fracción intercambiable. Los puntos en color claro cian y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales.

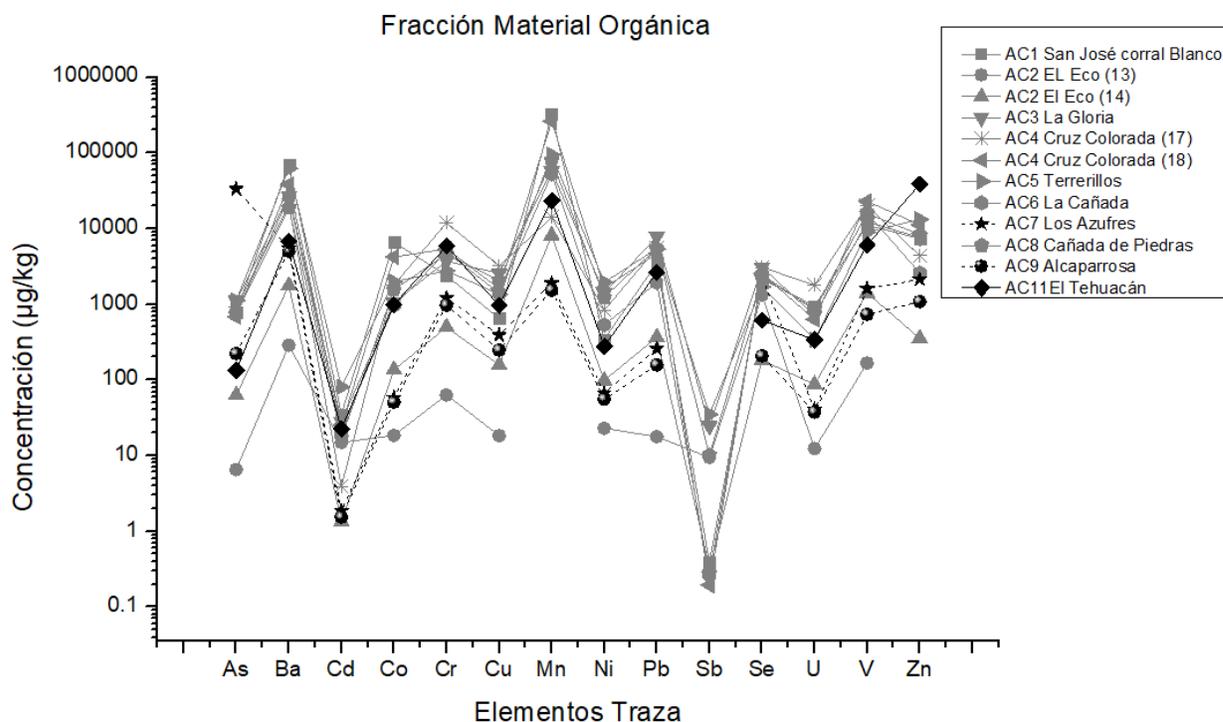
La figura 121 muestra el diagrama Schoeller modificado para los sitios muestreados del suelo y los elementos traza de la fracción de hidróxidos de Fe y Mn. En donde el Ba y Mn son los que tienen una concentración mayor en la zona. En los sitios considerados hidrotermales (línea punteada) tienen mayor concentración de As, Cd y Zn.

Al igual que el caso anterior el As se presenta en una forma ligada a hidróxidos de Fe y Mn, al igual que el Cd, para los sitios de los Azufres y Alcaparrosa respectivamente. Ya se mencionó anteriormente que los hongos y las plantas son capaces de tomar metales traza como éstos a través de reacciones redox o la liberación de algunos ácidos orgánicos, por lo tanto, estos elementos también son fácilmente transportados en estas condiciones.



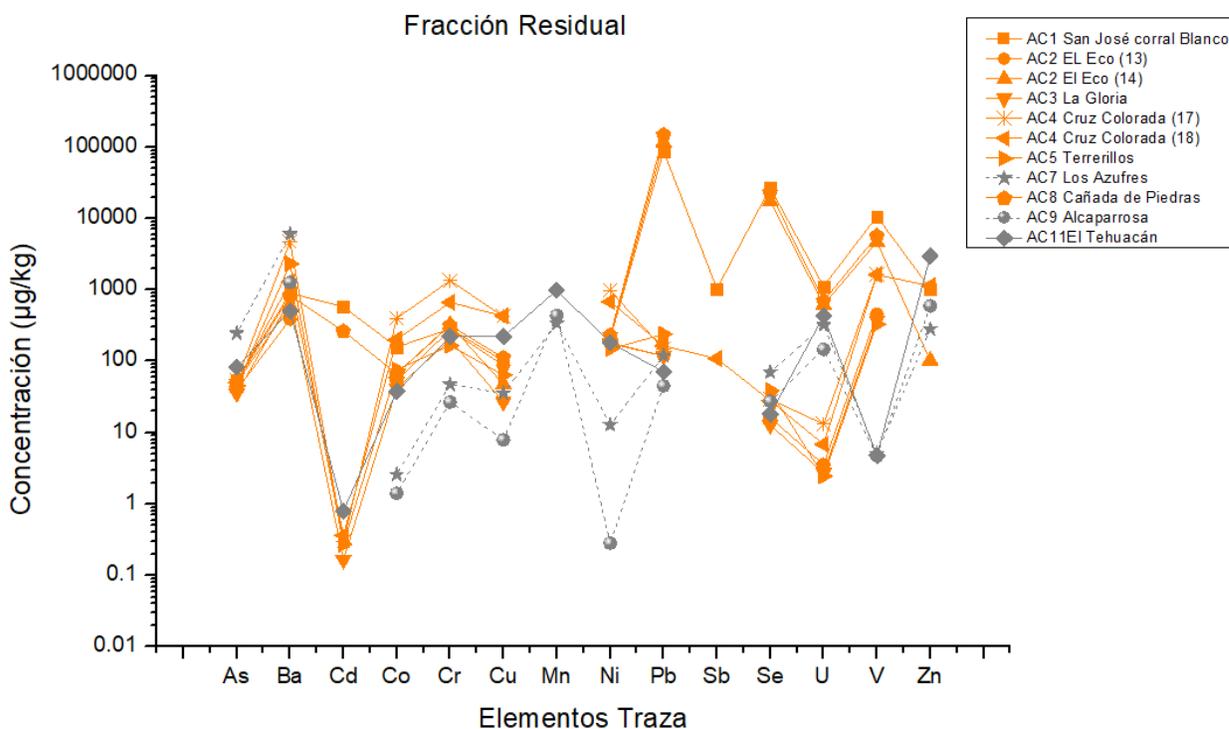
**Figura 121.**—Diagrama Schoeller que representa la concentración en µg/kg de los elementos traza analizados en la extracción secuencial para la fracción de hidróxidos de Fe y Mn. Los puntos de color vino y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales.

El diagrama Scholler modificado de la figura 122, se aprecia que los elementos más abundantes en la fracción de la materia orgánica de los sitios muestreados del suelo son Ba y Mn. Y en los sitios con línea punteada considerados hidrotermales tienen mayor concentración los elementos como As para el sitio AC7 Los Azufres y Zn para el sitio AC11 El Tehuacán.



**Figura 122.**-Diagrama Schoeller que representa la concentración en µg/kg de los elementos traza analizados en la extracción secuencial para la fracción de la materia orgánica. Los puntos de color negro y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales.

Se observa en la figura 123 el diagrama Schoeller modificado, para la fracción residual, para los sitios muestreados del suelo. Los elementos como Pb, Se y V son los que tienen una concentración mayor para los puntos AC1 San José Corral Blanco y AC2 EL Eco, y en los sitios con línea punteada considerados como hidrotermales resalta la presencia del Mn y una disminución en el Ni para los puntos AC7 Los Azufres y AC9 Alcaparrosa.



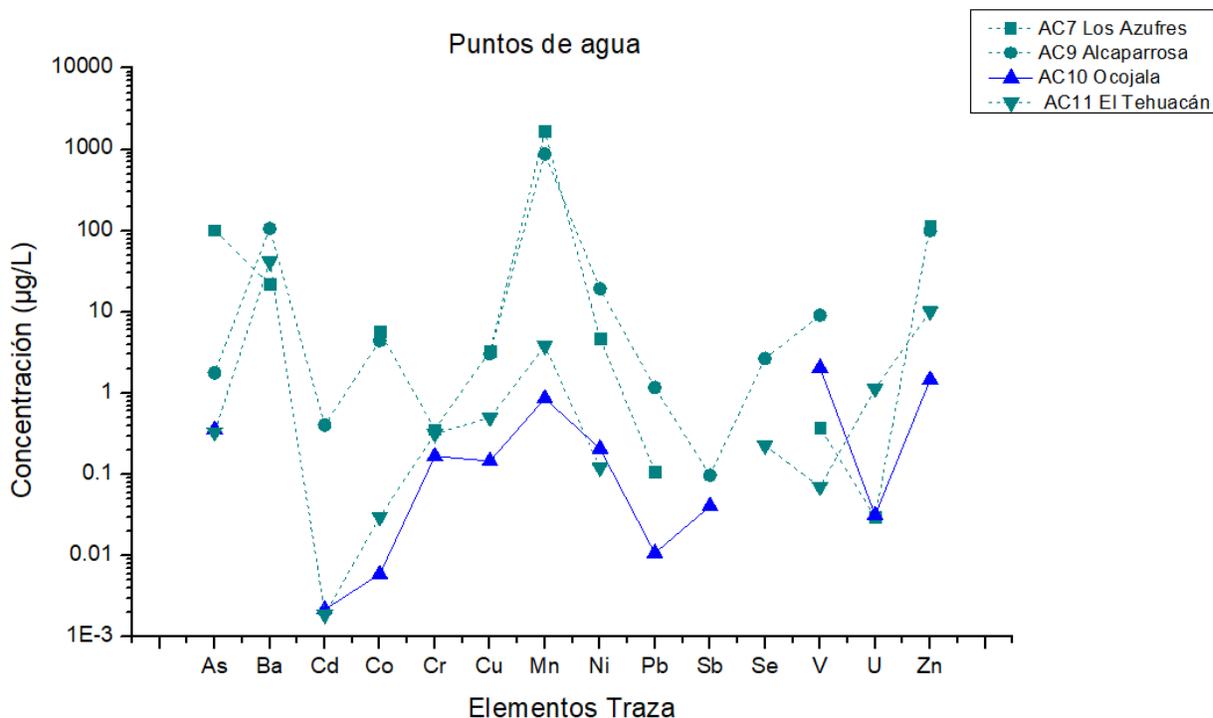
**Figura 123.**-Diagrama Schoeller que representa la concentración en µg/kg de los elementos traza analizados en la extracción secuencial para la fracción de residual. Los puntos de color gris y con líneas punteadas representan sitios considerados como hidrotermales.

El diagrama de Schoeller modificado, para los elementos traza disueltos en el agua, revela que los elementos más concentrados en el agua son el V y el Zn para Ocojala (AC10) y para los puntos hidrotermales es el As, Ba, Mn y Zn (Ver Figura 124). Estos resultados son consistentes con las concentraciones de estos elementos en la fracción intercambiable del suelo en estos sitios.

Los puntos que sobrepasan los límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2017 (Secretaría de Salud, 2017) están representados en la siguiente tabla (Ver Tabla 48):

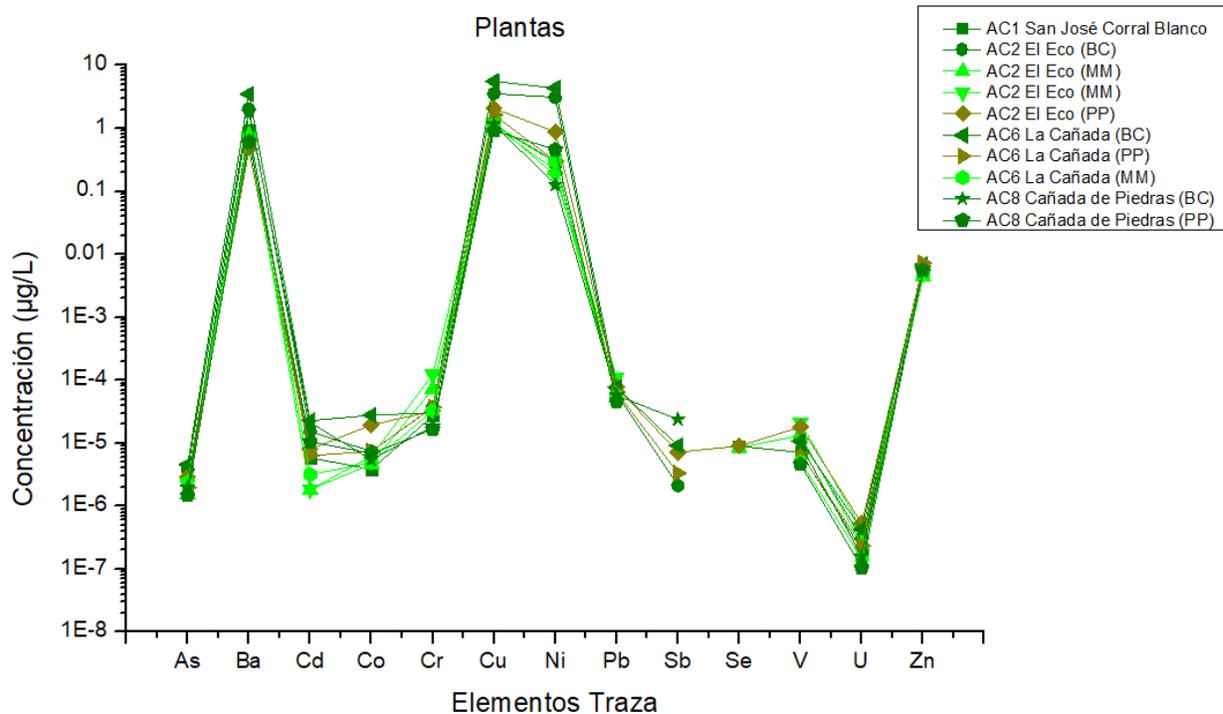
**Tabla 48.**- Límites máximos permisibles para los elementos traza.

Elemento	Límite en la NOM (µg/L)	Localidad que lo rebasa	Valor encontrado en (µg/L)	Veces que lo rebasa
As	25	AC7 Los Azufres	100	4
Mn	150	AC7 Los Azufres	3750	25
		AC9 Alcaparrosa	900	6
Pb	10	AC9 Alcaparrosa	20	2



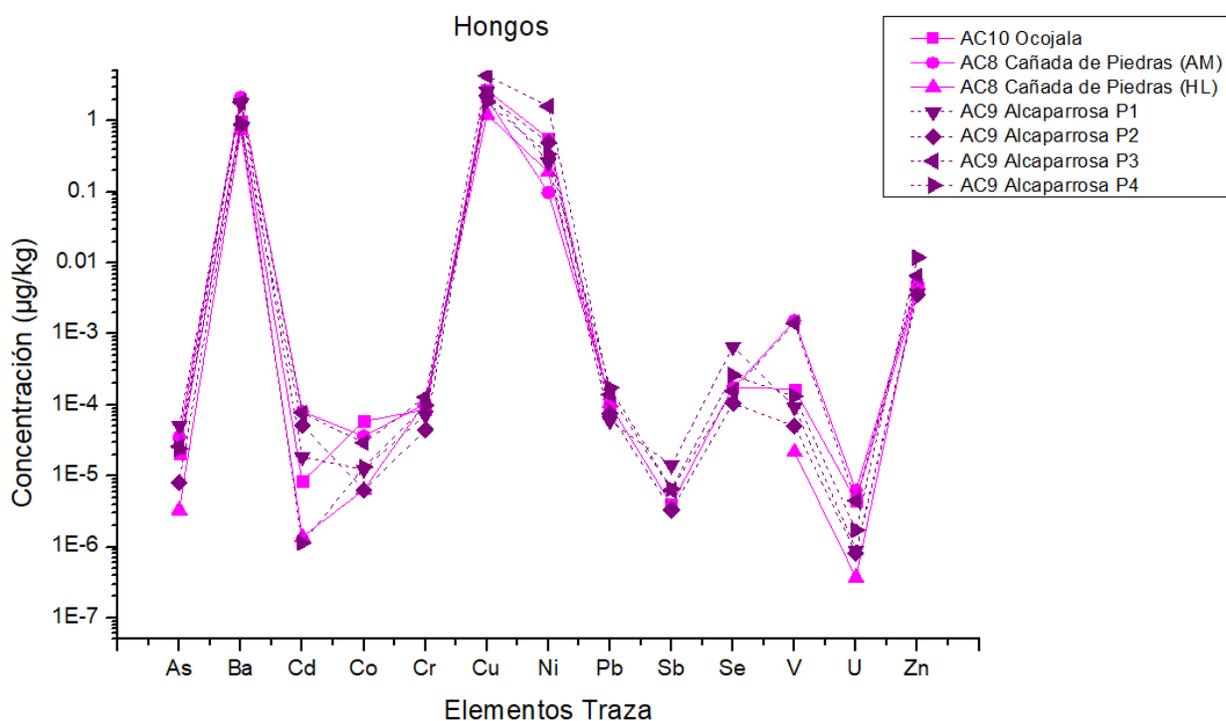
**Figura 124.**—Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos traza para el agua en una concentración de µg/L. Los sitios que están en color cian y líneas punteadas son considerados hidrotermales.

Para el caso de las plantas el diagrama de Schoeller modificado, muestra que los elementos traza con una mayor concentración son el Ba, Cu, Ni y Zn (Ver Figura 125). Todas las muestras presentan el mismo patrón dentro del diagrama de Schoeller lo que se interpreta como que todas tienen concentraciones muy parecidas entre ellas obtenidas en el análisis. Cabe destacar que no se muestrearon plantas en las zonas hidrotermales.



**Figura 125.**-Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos traza para las plantas en una concentración de µg/kg. BC (*Baccharis conferta*), MM (*Muhlebergia macroura*) y PP (*Pinus Patula*).

El diagrama de Schoeller modificado, para los hongos muestra que el elemento traza con una mayor concentración es el Ba, Cu, Ni y Zn (Ver Figura 126) en los sitios hidrotermales y no hidrotermales.



**Figura 126.**-Diagrama de Schoeller modificado que muestra los elementos traza para los hongos en una concentración de  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Los sitios que están en color morado oscuro y líneas punteadas son considerados hidrotermales. AM (*Amanita muscaria*) y HL (*Hypomyces lactifluorum*).

De manera global se pueden diferenciar dos grupos de sitios para las muestras de los suelos, el primero son los que están fuera de los sitios hidrotermales con intervalos de pH del suelo entre 5 y 6.5 y el segundo grupo son los que sí están asociados a puntos donde hay actividad hidrotermal, con intervalos de pH cercanos a 2 y uno de ellos de 5 (AC11 El Tehuacán).

Para los sitios hidrotermales los elementos mayoritarios que principalmente destacan en todas las fracciones son Al, Fe, Na y S. Los elementos traza As, Mn y Zn son los más relevantes en las diversas fracciones del suelo. Existen algunos otros elementos que destacan, como el Cr, Pb y U para las diferentes fracciones de manera puntual, Sosa-Ceballos y colaboradores, en el 2018, demostraron que las rocas que conforman estos sitios AC7, AC9 y AC11 contienen elementos como el Cr, Pb y U, estas rocas al estar expuestas a aguas con pH de 2 y 4 se van intemperizando y liberando al ambiente.

La presencia del Fe, S y As son relevantes en todos los sitios, pero en especial en los hidrotermales (AC7, AC9 y AC11), por las concentraciones elevadas que presentan. Enfocados por ahora en el S, trabajos previos en la zona (Tello & Hinojosa, 1986; López Hernández, 2009) reportan un flujo continuo de  $\text{H}_2\text{S}$ . Mismo que al disolverse en el agua, da pie a la formación de diversos minerales como el Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) Pirita ( $\text{FeS}$ ), Galena ( $\text{PbS}$ ), Blenda ( $\text{ZnS}$ ) entre otros reportados en la literatura (Sanzano Aguntín, 2019).

Con esto se podría explicar el bajo pH de las aguas (2-4), muestreadas cercanas a los sitios hidrotermales debido a la disolución de este gas en el agua subterránea o superficial de la zona.

Por otro lado, si se pone atención en el S del suelo, (*Ver Tabla 41*), se observa que principalmente se encuentra en la fracción de la materia orgánica, esto probablemente se deba a que los minerales que se han formado a lo largo del sistema hidrotermal han sido material para la pedogénesis de los suelos; el flujo del H<sub>2</sub>S reacciona con el agua de los poros del suelo y forma diversos minerales. Otra posible fuente son los fertilizantes, al ser un intento de proveer los nutrientes necesarios para la planta, se agrega S como uno de los elementos base para su metabolismo (Meyer, 1977), sin embargo, la agricultura practicada en la zona es de temporal y para consume local.

El Fe es otro elemento que se tomó en cuenta, los diagramas de Schoeller modificados para las cuatro fracciones del suelo (*Ver Figuras 113, 114, 115 y 116*), muestran que, para la fracción intercambiable, el Fe está en una mayor concentración en los sitios hidrotermales que en los sitios no hidrotermales. El transporte del Fe depende principalmente del pH para su movilización y de la presencia y ausencia de algunos elementos y compuestos disueltos que reaccionan para formar complejos o fases minerales.

Dos elementos que determinan la presencia del Fe en diversas formas son el O<sub>2</sub> y el S, el primero forma óxidos de Fe y el segundo forma minerales como la pirita, este último depende de condiciones anóxicas para su formación (Kendall et al., 2012).

Los bajos valores de pH producidos por el H<sub>2</sub>S podrían explicar la presencia de forma disuelta en el agua en los sitios hidrotermales. Además, las altas concentraciones de S como sulfuro podrían formar y precipitar como pirita. A su vez después de ser oxidada por el O<sub>2</sub> atmosférico a través de reacciones redox puede encontrarse en la fase de hidróxidos de Fe y Mn, formando algunos de estos compuestos (Chang y Goldsbey, 2013; Roca et al., 2007). En la materia orgánica podría estar como un elemento que ha sido sujeto de diversos procesos de sorción o adsorción y complejación de ácidos húmicos. En la fase residual también podría estar formando parte de algunos de los minerales que contiene la roca madre de la cual se ha generado el suelo (Roca et al., 2007).

El As, es un elemento que está asociado a ambientes sedimentarios, a diversas fuentes hidrotermales y a formaciones volcánicas (Lillo, 2008). El As está en concentraciones elevadas en todos los perfiles de suelo de este estudio. Es probable que la presencia de este elemento principalmente se deba a la alteración hidrotermal del sistema geotérmico, lo cual puede formar diversos minerales tanto en las rocas como en

suelo, tales como: (Arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), Tennantina ( $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ ) o Enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ )) de forma hidrotermal y también se encuentra en óxidos sobre todo de Fe, Mn y Al. (Mandal y Suzuki, 2002), así como a los procesos de disolución promovidos por los bajos valores de pH, debido a la presencia continua de gases hidrotermales.

Algunos de los mecanismos que pueden retener al As es la adsorción de As (V) por medio de la formación de hidróxidos u oxihidróxidos de Fe (Lillo, 2008; Mandal y Suzuki, 2002; Meyer, 1977). Los fosfatos son otro grupo de minerales que pueden tener contenido alto de As, a su vez puede sustituir al  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Ti}^{4+}$  en la formación de minerales en las rocas (Lillo, 2008).

De acuerdo a lo anterior, se puede ver que los diagramas de Schoeller modificados (*Ver Figuras 120, 121, 122 y 123*) que muestran las concentraciones para las 4 fracciones del suelo; se identifica la presencia del As. Sin embargo, los diagramas de Schoeller modificados para las plantas y los hongos (*Ver Figuras 125 y 126*), muestran que casi no hay presencia de este elemento en su estructura, por lo tanto, es muy probable que este elemento está formando alguna de estas fases minerales y/o formando hidróxidos u oxihidróxidos que no les permite estar biodisponibles para la vegetación y por lo tanto no presentan bioacumulación del mismo bajo las condiciones actuales del sistema. Aunque hay que recordar que los análisis de las plantas son cualitativos y que ninguna de las muestras de plantas fue tomada cerca de los sitios con hidrotermalismo, aunque los hongos sí.

Elementos como el As, Fe y S al encontrarse en forma disuelta en condiciones ácidas generadas por los gases en los sitios hidrotermales y considerando la toxicidad de éstos, sobre todo del As; según la Organización Mundial de la Salud (OMS) y diversos autores como Flanagan, 2012, puede ser un riesgo para la salud si existe la ingesta en formas inorgánicas como están presentes en el agua y un poco menos dañina pero no menos importante en organismos que bioacumularon estos elementos.

Se recomienda moderar o evitar la ingesta de esta agua en los sitios hidrotermales para prevenir afectaciones a la salud, siendo este conducto de ingesta uno de los que predomina en la región.

## Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

---

La presencia de gases como el H<sub>2</sub>S y el CO<sub>2</sub> permiten que elementos como el Al, Fe, As y Mn, al estar en condiciones de bajos valores de pH (entre 2 y 5), se encuentren de forma disuelta, lo que permite su transporte del suelo al agua. Al correlacionar las concentraciones de la fracción intercambiable del suelo con las concentraciones de elementos disueltos en agua, se encuentra una correspondencia entre la presencia de Al, As, Ba, Fe, Mn, Na, S y Zn, principalmente en las zonas hidrotermales.

Los perfiles AC1 al AC5 y AC8 tienen la composición en la extracción secuencial muy similar por lo que, es muy probable que estén ocurriendo los mismos mecanismos de transporte entre las matrices ambientales debido a su similitud.

Las zonas con influencia hidrotermal con bajo pH, favorecen la presencia de elementos potencialmente tóxicos en la fracción intercambiable del suelo y por tanto su transporte al agua y su absorción por las plantas y hongos capaces de realizar este proceso. Poniendo atención en las fracciones intercambiable y la ligada a hidróxidos, que son las fracciones que hacen más fácil el transporte de elementos; tanto hacia las plantas como los hongos, pueden estar asimilando algunos nutrientes como K y Ca, incluso bioacumulando Al y en algunos casos Fe, así como absorbiendo algunas trazas de Ba, Cu, Ni y Zn.

Las plantas y hongos seleccionados son organismos reconocidos como bioacumuladores, en especial los hongos, esto puede ser un riesgo en especial con las especies comestibles o que están en contacto directo con la población como *Boletus edulis* que es una especie comestible. Se recomienda hacer más estudios sobre todo del monitoreo de los elementos como As y Cd en especies vegetales comestibles.

El azufre es un elemento importante para los sitios hidrotermales y en especial cuando existen condiciones híper ácidas tanto de suelo como de agua, porque generan un ambiente que facilita el transporte de elementos traza que pueden desplazarse hacia otros sitios y entrar en contacto con la flora y las poblaciones cercanas. Se recomienda hacer más estudios de especiación química de los elementos traza, y monitoreos anuales por temporalidad para ver el comportamiento no solo de este elemento sino de todos los anteriormente mencionados ya que en formas disueltas pueden ser un riesgo para la población.

## Literatura citada

---

- Alvarado, C., Barahona, M. 2017. Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la cuenca del río suquiapa. El Salvador. Cuadernos de Investigación UNED, 9(1), 23–33. consultado el 15 07 2020 de <http://www.scielo.sa.cr/pdf/cinn/v9n1/1659-4266-cinn-9-01-00023.pdf>
- Ayala M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Mc Graw Hill Interamericana. Barcelona, España.
- Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., Segura-Araya, G., Bolaños-Alfaro, J. D., Cordero-Castro, G., Segura-Araya, G. 2017. Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), 15. doi:10.18845/tm.v30i4.3408
- Bosch Mayol, M., Costa, J. L., Cabria, F. N., Aparicio, V. C. 2012. Relación entre la variabilidad espacial y la conductividad eléctrica del suelo y el contenido de sodio en el suelo. *Revista ciencias del suelo* 30(2), 95–105.
- Chang, R., Goldsbey, K. 2013. Fundamentos de química. México McGraw-Hill. ISBN: 978-607-15-0928-4.
- Collao, S., Arce, E., Andía, A. 2002. Mineralogía química e inclusiones fluidas en los depositos de nitrato en la región de Maria Elena en Chile. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, 47(2), 181–190. doi:10.4067/S0366-16442002000200016
- Díaz, J. 2006. Bioacumulación de metales pesados y otros contaminantes en macromicetos. *Revista Recursos Rurais*, (2nd ed.).
- Dickson, M., Fanelli, M. 2004. ¿Qué es la energía geotérmica?. Instituto de Geociencias. Consultado el 10.10 2021 de: [https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6601/El calor de la Tierra%3A fuente inagotable de energía sostenible.pdf?sequence=4](https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6601/El%20calor%20de%20la%20Tierra%3A%20fuente%20inagotable%20de%20energía%20sostenible.pdf?sequence=4)
- Domínguez, J. M., Schifter, I. 1992. Las arcillas: el barro noble. Fondo de Cultura Económica. Consultado el 18 12 2020 de: [http://dx.b-ok.org/foreignfiction/638000/793e839f32b0e174ae5e88d60c4183c4.pdf/\\_as/\[\\_\]\\_Las\\_Arcillas\\_El\\_Barro\\_Noble\(b-ok.org\).pdf](http://dx.b-ok.org/foreignfiction/638000/793e839f32b0e174ae5e88d60c4183c4.pdf/_as/[_]_Las_Arcillas_El_Barro_Noble(b-ok.org).pdf)
- Drever, J. I. 1988. *Geoquímica de aguas naturales*. Prentice Hall (2nd ed).Universidad de Wyoming Englewood Cliffs, Nueva Jersey, Estados Unidos. ISBN:0-13-351396-3 .
- Dulio Torres Rodríguez. 2003. El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambientefica*, 13(2), 11–13. doi:10.1590/s0104-14282003000200004
- Ferrari Pedraglio, L. 2000. Avances en el conocimiento de la faja volcánica transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84–92. doi:10.18268/bsgm2000v53n1a5

- Flanagan, S., Johnston, R., Zheng, Y. 2012. Arsenico en agua de pozos en Bangladesh: salud e impactos económicos para la mitigación del arsénico: Boletín de la Organización Mundial de la Salud, 90(11), 839–846. doi:10.2471/blt.11.101253
- Gutiérrez, J., González-Partida, E. 2016. Procesos geológicos del campo geotérmico de Acozulco, Puebla, México. Tlamati sabiduría, 2. consultado el 19 05 2021 en: <http://tlamati.uagro.mx/t7e2/355.pdf>
- Hung, D. Q., Nekrassova, O., Compton, R. G. 2004. Metodos analíticos para arsénico inorgánico en agua. Revision talanta, 64(2), 269–277. doi:10.1016/j.talanta.2004.01.027
- Juárez Vázquez, L. V, Vela Correa, G., Cruz Chávez, E., Chimal Hernández, A., Sandoval, O. A. A., Rivera Becerril, F. 2010. Características de sustratos e identificación de plantas micorrizadas establecidas en presas de jales del distrito minero de Pachuca. Sociedades rurales, producción y medio ambiente. vol. 11, número 21. .
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., Bello-Amez, S. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. idesia (arica). 49–61. doi:10.4067/s0718-34292006000100009
- Kendall, B., Anbar, A. D., Kappler, A., Konhauser, K. O. 2012. Fundamentos de geología (1a ed.). John Wileyand Sons.
- Lancho, J. G. 1982. La materia orgánica del suelo, su importancia en suelos naturales y cultivados. Centro de Edafología y Biología aplicada EXCMA, Diputación Provincial, Salamanca. doi:10.13140/RG.2.2.16599.68002
- Lillo, J. 2008. Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. grupo de estudios de minería y medioambiente. Gemm, 33. consultado el 28 09 2021 de: [http://www.aulados.net/GEMM/Documentos/Peligros\\_geoquimicos\\_As/Peligros\\_As\\_2.pdf](http://www.aulados.net/GEMM/Documentos/Peligros_geoquimicos_As/Peligros_As_2.pdf)
- Llatance, W. O., Gonza Saavedra, C. J., Guzmán Castillo, W., Pariente Mondragón, E. 2018. Bioacumulación de cadmio en el cacao (theobroma cacao) en la comunidad nativa de Pakun, Perú. artículo. Revista forestal del Perú, 33(1), 63. doi:10.21704/rfp.v33i1.1156
- López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., Quijano-León, J. L. 2009. Actividad hidrotermal en el complejo caldera de Tulancingo-Acozulco, México central: estudios exploratorios. geothermics, 38(3), 279–293. doi:10.1016/j.geothermics.2009.05.001
- López, F. Y. 2000. Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera. División de investigación de la Universidad Nacional de Colombia (1ª ed.). impresora feriva s.a.: Palmira, Colombia.
- López Hernández, A. 2009. Evolución volcánica del complejo Tulancingo-Acozulco y su sistema hidrotermal, estados de Hidalgo y Puebla, México. Universidad Nacional Autónoma de México. 170.

- Mandal, B. K., Suzuki, K. T. 2002. Arsenico alrededor del mundo. Revision. *talanta*, 201–235. doi:10.1016/S0065-2113(08)70013-0
- Manjarrez, J., Bernal, H. 2018. Región agroindustrial Acatzingo Hidalgo, Puebla caracterizticas y potenciales. articulo de investigación. *revista de planeación y control microfinanciero*, 4(14), 8–15.
- Martinez, Y., Rivero, C. 2005. Evaluación de diferentes métodos para determinar las fracciones de metales pesados presentes en el suelo. *Revista ingeniería uc*, 12(3), 14–20.
- Meyer, B. 1977. *Azufre, energía y ambiente*. (Elsevier, ed.). doi:10.1016/B978-0-444-41595-0.50009-7
- Mitchell, J., Soga, K. 2005. *Fundamentos del comportamiento del suelo*. (3a ed.). John Wileyand Sons: Canada.
- Morales, J. M. L., Sepúlveda-Jiménez, G. 2012. El daño por oxidacion cusado por cobre y la respuesta de las plantas. *Revista interciencia*, 37(11), 805–811.
- Morales M., M. 2014. Estudio de cuenca de abasto para la región Chignahuapan- Zacatlán, Puebla. 225. consultado el 29 09 2021 de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/22/6249Chignahuapan - Zacatlan.pdf>
- Moreno, R., Asensio, I., Blanquer, G., Manuel, J. 2011. Óxidos e hidróxidos. Universidad Politécnica de Valencia. Consultado el 19 02 2020 de: <http://hdl.handle.net/10251/13680>
- Nicholson K. 1993. *Fluidos geotermicos, quimica y tecnicas de exploración*. Springer Verlag (1a ed.). doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Norton L. D. 1984. Teoria de los sistemas hidrotermales. *Revista ciencia del planeta tierra*, 12, 155–177.
- OMS. 2018. Guías para la calidad del agua de consumo humano. Organización Mundial de la Salud, 4, 608. consultado el 25 01 2020 de: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2020, agosto 1. OMS Lista numerica de ECHs. Consultado el 5 07 2020, de: [https://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc\\_numerical/en/](https://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_numerical/en/)
- Peiffer, L., Bernard-Romero, R., Mazot, A., Taran, Y. A., Guevara, M., Santoyo, E. 2014. Geoquímica de fluidos y flujos de gas del suelo (CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>S) en un prometedor sistema geotérmico de roca seca caliente: la caldera de Aocolco, México. *Revista de vulcanología y exploración geotermica*, 284, 122–137. doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.07.019
- Quinto, A., Santoyo, E., Torres, V., Gonzalez, E., Castillo, D. 1995. Estudio geoquimico-ambiental de los efluentes naturales producidos en la zona geotermica de Aocolco, Puebla. *Revista de ingenieria hidraulica en Mexico*, 10(3), 21–27.

- Quiroz, A., Espinosa-García, F., Ilangovan, K. 2002. Efectos de quelatos hidrosolubles naturales de tres especies de plantas en la movilización de metales pesados. *Boletín de contaminación ambiental y toxicología*, 68(6), 862–869. doi:10.1007/s00128-002-0034-5
- Rauret, G., Lopez-Sanchez, J. F., Sahuquillo, A., Barahona, E., Lachica, M., Ure, A. M., Davidson, C. M., Gomez, A., Luck, D., Bacon, J., Yli-Halla, M., Muntau, H., Quevauviller, P. 2000. Aplicación de la extracción secuencial modificada por BCR (tres-pasos) procedimientos para la extracción de metales pesados en sedimentos anegados y el material de referencial del suelo (CRM 480) complementado por tres años de estabilidad de ácido acético. *Revista de monitoreo ambiental*. 2(3), 228–233. doi:10.1039/b001496f
- Reyes-Cortes, M., Rentería-Villalobos, M., Valenzuela-Hernandez, M., Silva-SAenz, D. C., Burciaga-Valencia, L., Fuentes-Montero, M., Herrera-Peraza, E. F., Reyes-Cortes, I., Rascon-Muro, C., Montero-Cabrera, M. E. 2008. Contenido de uranio en los estratos arcillosos de la cuenca de. *Revista latinoamericana de recursos naturales*, 4(2), 77–83.
- Reyes, M. 2010. Comportamiento de los metales pesados en el suelo. *Revista epsilon*, 15(15), 181–189.
- Roca, N., Pazos, M. S., Bech, J. 2007. Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc en suelos del no argentino. *Revista ciencia del suelo*, 25(1), 31–42.
- Rosas Verdugo, E. 2017. Hidrología e hidroquímica de tres zonas con potencial geotérmico. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 121 hojas.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Poncedel León, J., Hill, M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Elaborado por el departamento de. *suelo y aguas*, 68. doi:10.1039/TF9686403358
- Sánchez San Román, F. X. 2012. Transporte de contaminantes. hidrología superficial y subterránea, 2, 1–13. website [https://hidrologia.usal.es/temas/Transporte\\_de\\_contaminantes.pdf](https://hidrologia.usal.es/temas/Transporte_de_contaminantes.pdf)
- Santoyo, E., Barragan, R. 2010. Energía geotérmica. *revista ciencia*, 40–51. consultado el 12 08 2021 de: [https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/61\\_2/PDF/EnergiaGeotermica.pdf](https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/61_2/PDF/EnergiaGeotermica.pdf)
- Sanzano A. 2019. El azufre del suelo. Facultad de agronomía y zootecnia Universidad Nacional de Tucumán, *Revista catedral de edafología*, 1–6.
- Secretaría de Salud. 2017. Proyecto de norma oficial mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2017. Agua para uso y consumo humano límites permisibles de la calidad del agua. consultado el 2 12 2021, de: diario oficial de la federación website: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5581179&fecha=06/12/2019](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5581179&fecha=06/12/2019)
- SENER. 2015. Permiso que adjudica la secretaría de energía a la comisión federal de electricidad a quien en lo sucesivo se denominará como la secretaría y el permisionario, respectivamente para llevar a cabo actividades de exploración de recursos geotérmicos. Mexico, df.

- Shadow, E. 2019. Compendio de notas de metodos del microondas de digestión ácida MARS 6, CEM. Manual operativo. Consultado el 19 04 2020 de: <https://cem.com/en/operation-manual-for-mars-6>.
- Siebe, C., Reinhold, J., Stahr, K. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Revista de la sociedad mexicana de las ciencias del suelo p. 70.
- Siegel R.F. 2002. Geoquímica ambiental de metales potencialmente tóxicos. Springer, Berlin, Heidelberg (1a ed., Vol. 1). doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-662-04739-2>
- Smeester, L., Rager, J. E., Bailey, K. A., Guan, X., Smith, N., García-Vargas, G., Del Razo, L. M., Drobná, Z., Kelkar, H., Stýblo, M., Fry, R. C. 2011. Cambios epigenéticos en individuos con arsenicosis. Revista investigación química en toxicología, 24(2), 165–167. doi:10.1021/tx1004419
- Son, S. H., Lee, W. B., Kim, D., Lee, Y., Nam, S. H. 2019. Un metodo analítico alternativo para determiar especies de arsénico en arroz usando cromatografía ionica inductiva acoplada a espectrometria de plasma de masas. Revista química de la comida, 270. 353–358. doi:10.1016/j.foodchem.2018.07.066
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Salazar-Hermenegildo, N., Boijseauneau-López, M. E., Pérez-Orozco, J. D. 2018a. Los magmas del complejo de la caldera de acoculco: génesis, evolución y relación con el sistema geotérmico de acoculco. Revista de vulcanología e investigación geotérmica, 358, 288–306. doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.06.002
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Salazar-Hermenegildo, N., Boijseauneau-López, M. E., Pérez-Orozco, J. D. 2018b. Los complejos magmáticos de la caldera de Acoculco: génesis, evolución y relación con el sistema geotermico de Acoculco. Revista de investigación vulcanología y geotermia, 358, 288–306. doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.06.002
- Streit, B. 1992. Procesos de bioacumulación en los ecosistemas. Revista experientia, 48, 955–970.
- Tarback, E. J., Lutgens, F. K. 2005. Ciencias de la tierra. Pearson. 736 p ISBN: 978 84 832 2690 2
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., Bisson, M. 1979a. Procedimiento de extracción secuencial para la especificación de metales traza en partículas. Revista química analítica, 51(7), 844–851. doi:10.1021/ac50043a017
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., Bisson, M. 1979b. Procedimiento de extracción secuencial para la especificación de metales traza en partículas. Revista química analítica, 51(7), 844–851. doi:10.1021/ac50043a017
- Vilar, S., Gutiérrez, A., Antezana, J., Carral, P., Álvarez, A. 2003. Estudio comparativo diferentes métodos de extracción secuencial para metales pesados en suelos. Boletin geologico y minero, 114(4), 453–461.
- Zolezzi, B., Matias, O. 2015. Sistemas volcánicos e hidrotermales activos de los andes de Chile central, Tesis universidad de Chile, 274p.

## Anexo

A continuación, se presentan los datos obtenidos en los análisis de extracción secuencial para los elementos mayoritarios y los elementos traza en las cuatro fracciones del suelo; intercambiable, hidróxidos de Fe y Mn, materia orgánica y residual.

También se presentan los datos obtenidos en el análisis por ICP-MS para los elementos mayoritarios y traza en la digestión ácida de plantas y hongos.

Con estos datos se construyeron los diagramas para la extracción secuencial presentados en el análisis por sitio y los diagramas de Schoeller presentados en el análisis global.

**Tabla 49.-** Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la fracción intercambiable en los suelos de cada sitio.

Elemento	Sitios											
	AC1	AC2(13)	AC2(14)	AC3	AC4(17)	AC4(18)	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC11
	mg/kg											
<b>Al</b>	70.22	111.44	196.84	991.68	172.82	188.84	790.36	1482.42	3058.16	398.06	1872.72	104.96
<b>Ca</b>	1680.38	2475.74	2103.46	3003.84	1196.62	2259.64	6214.86	1967.4	1064.16	1903.72	756.04	1150.96
<b>Fe</b>	7.6	9.76	6.76	13.78	2.3	10.04	19.5	19.7	1471.6	10.08	1649	330.92
<b>K</b>	398.66	405.54	393.34	396.02	416.56	880.12	530.18	388.86	267.24	545.88	541.8	230.96
<b>Mg</b>	349.88	430.58	323.16	302.8	428.82	301.98	405.74	227.6	193.44	347.92	129.4	239.44
<b>Na</b>	25.56	13.94	21.1	16.96	20.46	14.02	17.86	18.42	103.72	12.82	498.76	69.64
<b>P</b>	2.06	4.2	2.32	4.36	0.52	11.56	6.4	2.2	8.2	4.84	5.84	0.56
<b>S</b>	5.96	18.56	11.46	7.08	0.32	53.28	6.42	5.8	10643.12	9.32	13545.84	7.72

**Tabla 50.-** Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la fracción hidróxidos de Fe y Mn en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado).

Elemento	Sitios											
	AC1	AC2(13)	AC2(14)	AC3	AC4(17)	AC4(18)	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC11
	mg/kg											
<b>Al</b>	1.48	1002.16	1246.76	2546.1	1001.74	1456.24	2761.32	2483.84	435	1719.86	152.28	563.56
<b>Ca</b>	491.18	935.8	423.56	440.56	302.34	622.24	1023.84	207.58	30.32	410.56	27.12	242.64
<b>Fe</b>	3.3	638.84	722.66	853.74	295.06	1395.84	920.88	529.02	1677.6	1064.62	675.68	4509.4
<b>K</b>	153.58	128.68	131.12	67.68	186.84	423.7	150.06	127.1	148.84	134.64	96.32	39.24
<b>Mg</b>	78.44	52.96	21.1	11.06	85.86	40.74	18.76	9.76	5.48	22.6	4.6	22.36
<b>Na</b>	2.56	0.38	0.64	2.36	0.66	0.94	0.06	ND	30.08	0.88	36.6	7.88
<b>P</b>	2.68	4.08	2.4	5.8	ND	51.36	12.6	1.32	70.12	11.58	20.04	4.28
<b>S</b>	8.36	9.56	13.26	22.1	ND	64.66	11.16	12.3	245.24	17.06	91.72	9.32

**Tabla 51.-** Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la fracción materia orgánica en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado).

Elemento	Sitios											
	AC1	AC2(13)	AC2(14)	AC3	AC4(17)	AC4(18)	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC11
	mg/kg											
<b>Al</b>	1441.42	2713.32	2686.92	10943.86	2650.96	3556.02	10818.24	11824.04	819.16	4790.3	342.2	1193.48
<b>Ca</b>	160.62	99.9	58.74	86.66	233.48	72.1	187.24	67.1	46.08	67.9	38.76	43.68
<b>Fe</b>	1368.96	2475.12	2108.6	2558.52	298.3	2422.58	3085.52	2874.5	534.8	3344.52	302.24	2230.44
<b>K</b>	993.06	91.74	81.36	46.4	155.02	103.48	99.3	64.46	180.76	62.94	185.76	47.76
<b>Mg</b>	19.54	49.04	26.32	16.72	63.48	33.88	43.76	18.4	23.76	40.22	16	27.36
<b>Na</b>	1.04	15.52	8.46	4.48	0.92	0.58	8.98	ND	73	9.74	117.2	52.12
<b>P</b>	26.52	209.68	160.9	488.64	ND	350.86	807.42	145	66	279.44	34.68	ND
<b>S</b>	76.7	302.4	184.42	266.14	0.34	251.5	300.16	224.26	10360.04	291.16	8731.64	142.28

**Tabla 52.-** Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la fracción residual en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado).

Elemento	Sitios										
	AC1	AC2(13)	AC2(14)	AC3	AC4(17)	AC4(18)	AC5	AC7	AC8	AC9	AC11
	mg/kg										
<b>Al</b>	587.25	460.2	526.05	438.15	1959.45	1182.75	379.65	320.85	676.65	132.3	379.5
<b>Ca</b>	7.35	ND	ND	4.05	ND	ND	4.8	ND	2.1	ND	6.6
<b>Fe</b>	562.8	273	350.25	258.9	1307.7	942.6	191.1	26.7	421.05	13.65	304.65
<b>K</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	41.55	ND	41.55	18.3
<b>Mg</b>	15.9	13.5	15.45	14.85	27.75	44.4	14.4	13.35	15.9	9	6.45
<b>Na</b>	ND	ND	10.2	ND	ND	ND	ND	12.9	ND	13.65	21.75
<b>P</b>	ND	ND	9.15	ND	11.25	20.85	ND	4.2	12.45	2.1	4.5
<b>S</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	48.45	ND	55.8	2.55

**Tabla 53.-** Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para el agua muestreada de cada sitio. ND (No Detectado).

Elemento	Sitios			
	AC7	AC9	AC10	AC11
	mg/kg			
<b>Al</b>	10.682	23.046	0.005	ND
<b>Ca</b>	34.768	20.959	6.375	7.659
<b>Fe</b>	2.779	18.249	0.007	0.059
<b>K</b>	11.863	7.416	4.14	4.557
<b>Mg</b>	8.848	5.904	2.78	5.235
<b>Na</b>	20.35	6.461	10.273	17.466
<b>P</b>	0.03	0.461	0.052	ND
<b>S</b>	75.5	272.897	0.316	0.822

**Tabla 54.-** Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la digestión ácida de las plantas. ND (No Detectado). BC (*Baccharis conferta*), MM (*Muhlenbergia macroura*) y PP (*Pinus Patula*).

Elemento	Sitios									
	AC1	AC2(BC)	AC2(BC)	AC2(BC)	AC2(BC)	AC6	AC6	AC6	AC8	AC8
	mg/kg									
<b>Al</b>	ND	ND	ND	12.50	17.83	ND	24.27	ND	ND	12.36
<b>Ca</b>	236.02	338.38	149.16	74.43	295.96	296.56	190.61	99.84	309.55	221.26
<b>Fe</b>	14.38	8.97	11.93	10.12	10.70	10.68	8.88	6.50	6.49	4.71
<b>K</b>	781.15	831.61	344.27	351.33	385.70	860.02	396.61	340.29	957.55	ND
<b>Mg</b>	42.53	43.05	20.88	17.27	79.64	61.09	81.10	16.54	64.27	70.62
<b>P</b>	62.30	52.61	ND	ND	63.00	45.67	63.93	ND	71.34	65.91
<b>S</b>	49.12	39.46	29.24	ND	28.53	36.18	49.13	ND	30.07	ND

**Tabla 55.**-Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en mg/kg, para la digestión ácida de los hongos. AM (*Amanita muscaria*) y HL (*Hypomyces lactifluorum*).

Elemento	Sitios						
	AC10	AC8(AM)	AC8(HL)	AC9 P1	AC9 P2	AC9 P3	AC9 P4
	mg/kg						
<b>Al</b>	201.45	323.95	214.37	56.89	76.05	42.51	99.40
<b>Ca</b>	46.40	61.08	107.78	40.72	181.44	40.12	30.54
<b>Fe</b>	73.41	132.34	91.02	374.25	32.34	21.56	58.68
<b>K</b>	755.87	853.29	924.55	722.16	602.40	457.49	418.56
<b>Mg</b>	22.32	29.34	30.54	18.56	30.54	17.37	19.76
<b>P</b>	155.64	174.25	167.66	175.45	104.79	134.13	191.62
<b>S</b>	111.00	62.28	46.71	114.37	78.44	115.57	150.90

**Tabla 56.-** Concentraciones obtenidas de los elementos traza en  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , para la fracción intercambiable en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado).

Elemento	Sitios											
	AC1	AC2(13)	AC2(14)	AC3	AC4(17)	AC4(18)	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC11
	$\mu\text{g}/\text{kg}$											
<b>As</b>	14.77	21.09	3.42	26.37	84.59	14.15	17.84	21.25	11953.13	23.98	66.00	25.43
<b>Ba</b>	111522.11	44320.12	8204.91	131924.07	74342.24	73539.49	192455.71	124125.07	0.05	79869.51	1579.99	45950.42
<b>Cd</b>	16.26	13.45	2.43	64.69	6.90	36.57	61.48	24.04	37.21	64.84	27.21	435.25
<b>Co</b>	703.04	511.79	109.82	524.80	1533.71	696.96	409.09	840.58	25.54	1128.12	1113.98	2643.03
<b>Cr</b>	18.18	26.25	7.58	60.97	90.25	28.01	63.89	109.17	9.44	43.29	725.83	46.99
<b>Cu</b>	19.55	51.69	7.43	28.73	286.87	45.22	77.58	63.53	2.38	79.11	373.89	113.13
<b>Mn</b>	36538.70	86290.56	5226.46	143883.04	12772.96	90965.00	148655.24	68431.91	8.79	143222.96	35962.36	114523.70
<b>Ni</b>	139.86	206.61	35.96	348.78	98.01	331.41	257.84	186.36	5.94	305.95	938.35	309.66
<b>Pb</b>	9.24	51.04	7.43	66.11	67.46	29.89	75.39	39.50	851.87	40.31	56.10	18.34
<b>Sb</b>	0.36	0.57	0.58	0.03	0.14	0.37	0.39	0.23	ND	0.41	ND	ND
<b>Se</b>	2.51	ND	6.98	49.40	274.15	3.14	ND	2.52	500.13	3.14	52.30	44.82
<b>U</b>	15.61	67.45	4.54	64.47	2.14	25.63	90.20	56.22	2405.51	44.98	5012.90	193.61
<b>V</b>	26.20	30.14	14.68	15.44	56.77	30.72	15.69	25.47	ND	19.50	126.03	40.19
<b>Zn</b>	1834.60	3752.18	192.49	3646.52	1038.67	9196.78	3660.36	423.71	10930.89	5463.63	3935.70	104543.71

**Tabla 57.-**Concentraciones obtenidas de los elementos traza en  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , para la fracción hidróxidos de Fe y Mn en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado).

Elemento	Sitios											
	AC1	AC2(13)	AC2(14)	AC3	AC4(17)	AC4(18)	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC11
	$\mu\text{g}/\text{kg}$											
<b>As</b>	11.40	31.98	4.75	38.40	738.09	64.92	27.35	27.24	99235.49	78.64	77.71	600.80
<b>Ba</b>	91052.92	81416.12	8363.68	126032.76	88091.60	250107.54	199410.02	120049.48	178537.95	108400.04	77.71	48299.42
<b>Cd</b>	3.32	50.50	3.83	119.82	7.68	119.24	198.58	48.15	1.58	79.18	83692.35	212.81
<b>Co</b>	110.32	2481.21	512.14	1848.96	3932.43	20139.99	1165.38	1536.32	15.20	5766.52	1.58	703.11
<b>Cr</b>	1.26	45.69	15.69	81.81	274.67	186.43	63.79	95.40	105.78	109.28	19.37	617.66
<b>Cu</b>	71.20	61.14	5.82	0.00	380.38	37.62	1.01	305.31	546.62	20.19	32.13	437.24
<b>Mn</b>	10843.96	260766.20	36440.86	626496.00	72595.18	1428280.35	538336.69	146649.04	801.15	727717.65	288.28	19685.36
<b>Ni</b>	5.26	383.40	33.32	175.69	78.18	720.61	123.66	58.75	26.25	305.82	508.18	255.64
<b>Pb</b>	1.62	1495.81	102.04	921.45	2318.82	1758.57	580.25	308.95	1349.32	1851.17	37.75	3517.47
<b>Sb</b>	0.02	ND	ND	ND	ND	0.31	0.02	ND	ND	0.41	2481.09	ND
<b>Se</b>	ND	82.69	13.92	79.04	2274.51	161.46	33.52	77.96	91.25	169.17	ND	1944.42
<b>U</b>	0.24	800.60	170.92	869.80	7755.10	4063.89	489.74	930.58	1492.39	1380.54	ND	10387.71
<b>V</b>	109.78	56.67	93.02	81.38	320.92	228.58	49.26	100.12	15.70	20.38	391.69	628.84
<b>Zn</b>	479.92	4169.68	191.66	4358.10	1182.84	8923.94	7222.06	809.01	580.18	5174.81	22.42	51408.92

**Tabla 58.**-Concentraciones obtenidas de los elementos traza en  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , para la fracción materia orgánica en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado).

Elemento	Sitios											
	AC1	AC2(13)	AC2(14)	AC3	AC4(17)	AC4(18)	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC11
	$\mu\text{g}/\text{kg}$											
<b>As</b>	782.54	6.53	62.70	1115.74	924.03	681.60	1111.17	756.80	33332.06	740.65	222.29	133.70
<b>Ba</b>	70777.25	286.82	1765.91	27146.99	20330.82	37921.66	61941.24	25990.89	5500.47	18892.38	4977.07	6800.94
<b>Cd</b>	35.12	14.87	1.34	28.17	3.90	25.12	80.67	21.35	1.86	17.15	1.53	22.47
<b>Co</b>	6612.79	18.47	136.29	1054.08	1794.81	4212.28	1985.47	961.66	58.21	1550.90	50.54	984.18
<b>Cr</b>	2390.11	63.40	496.88	3714.42	11881.46	5368.44	2766.38	4885.95	1205.69	4619.84	970.46	5861.68
<b>Cu</b>	648.45	18.23	157.57	2558.28	3207.84	1611.13	1351.79	1401.05	390.39	2052.12	246.87	953.69
<b>Mn</b>	321139.06	-1.96	8130.21	57710.58	14031.03	260696.27	94330.76	52164.05	1891.42	79600.09	1529.93	23429.88
<b>Ni</b>	343.10	22.85	98.30	1392.15	836.10	1646.28	1949.26	534.39	66.45	1246.88	55.46	277.34
<b>Pb</b>	3477.87	17.71	366.72	7842.39	5476.11	4635.05	5384.99	1928.76	257.81	5455.05	157.26	2637.35
<b>Sb</b>	0.39	9.46	0.33	24.53	ND	0.19	35.05	0.26	ND	10.17	ND	ND
<b>Se</b>	2143.98	1310.34	182.08	3086.16	3069.80	2517.68	1704.98	2484.90	2284.37	2264.69	207.01	615.87
<b>U</b>	944.56	12.36	87.28	708.35	1796.86	630.77	338.71	828.60	40.68	875.69	37.48	337.80
<b>V</b>	11045.46	166.55	1405.85	12269.03	20005.39	22880.20	8948.85	16021.55	1600.53	15765.32	733.82	6052.23
<b>Zn</b>	7355.64	0.00	353.77	7591.56	4379.92	11186.91	13158.41	2586.47	2133.10	8307.70	1081.95	38607.54

**Tabla 59.**-Concentraciones obtenidas de los elementos traza en  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , para la fracción residual en los suelos de cada sitio. ND (No Detectado).

Elemento	Sitios										
	AC1	AC2(13)	AC2(14)	AC3	AC4(17)	AC4(18)	AC5	AC7	AC8	AC9	AC11
	$\mu\text{g}/\text{kg}$										
<b>As</b>	54.25	39.76	50.64	35.45	53.44	50.36	45.50	245.66	51.40	0.00	82.81
<b>Ba</b>	900.60	387.83	601.24	723.66	4736.01	1294.56	2310.06	6000.83	825.07	1262.41	502.17
<b>Cd</b>	576.88	0.00	0.00	0.17	0.30	0.36	0.27	0.00	262.66	0.00	0.80
<b>Co</b>	157.35	54.11	67.60	42.01	398.71	201.12	76.09	2.58	66.60	1.41	37.86
<b>Cr</b>	284.03	272.57	323.75	201.17	1345.93	664.92	165.79	47.25	316.10	26.80	223.52
<b>Cu</b>	101.26	87.24	47.48	26.88	421.13	428.93	63.98	35.46	111.80	7.92	219.48
<b>Mn</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	337.46	0.00	436.94	985.91
<b>Ni</b>	207.40	180.72	218.76	176.76	971.05	680.69	148.38	12.85	230.17	0.28	179.98
<b>Pb</b>	87392.46	119.09	116217.45	118.25	148.33	163.64	238.81	119.38	147978.42	45.34	71.52
<b>Sb</b>	1034.50	0.00	0.00	0.00	0.00	108.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Se</b>	26908.69	16.19	17423.12	12.85	29.30	28.03	38.98	69.89	22845.57	27.26	18.03
<b>U</b>	1116.88	3.58	614.81	2.72	13.17	6.86	2.44	319.95	698.62	146.89	428.45
<b>V</b>	10696.38	452.36	4691.67	372.75	1616.02	1631.30	330.13	5.09	5699.56	4.72	4.75
<b>Zn</b>	1033.27	0.00	102.52	0.00	0.00	1132.45	0.00	281.47	0.00	594.88	2950.99

**Tabla 60.-** Concentraciones obtenidas de los elementos mayoritarios en  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , para el agua muestreada de cada sitio. ND (No Detectado).

Elemento	Sitios			
	AC7	AC9	AC10	AC11
	$\mu\text{g}/\text{kg}$			
<b>As</b>	102	1.78445	0.35864	0.33128
<b>Ba</b>	21.9	106.18838	ND	41.54679
<b>Cd</b>	ND	0.40663	0.00218	0.00188
<b>Co</b>	5.8	4.44977	0.00594	0.02986
<b>Cr</b>	0.36	ND	0.16779	0.31815
<b>Cu</b>	3.3	3.0534	0.14658	0.49939
<b>Mn</b>	1678	879.9024	0.86408	3.8258
<b>Ni</b>	4.78	19.27588	0.20858	0.12042
<b>Pb</b>	0.11	1.17411	0.01076	ND
<b>Sb</b>	ND	0.09762	0.04088	ND
<b>Se</b>	ND	2.66308	ND	0.22683
<b>V</b>	0.38	9.07156	2.04101	0.07051
<b>U</b>	0.03	ND	0.03169	1.13526
<b>Zn</b>	115	100.082	1.47291	10.1309

**Tabla 61.-** Concentraciones obtenidas de los elementos traza en  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , para la digestión ácida de las plantas. ND (No Detectado). BC (*Baccharis conferta*), MM (*Muhlenbergia macroura*) y PP (*Pinus Patula*).

Elemento	Sitios									
	AC1	AC2(BC)	AC2(BC)	AC2(BC)	AC2(BC)	AC6	AC6	AC6	AC8	AC8
	$\mu\text{g}/\text{kg}$									
<b>As</b>	$2 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
<b>Ba</b>	0.95	2.03	0.75	0.73	0.063	3.58	0.46	0.71	1.82	0.006
<b>Cd</b>	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
<b>Co</b>	$3 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{-6}$
<b>Cr</b>	$2 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
<b>Cu</b>	1.12	3.57	1.08	1.23	2.07	5.59	1.63	1.14	1.16	0.91
<b>Mn</b>	0.02	3.11	0.21	0.17	0.88	4.37	0.33	0.37	0.12	0.041
<b>Ni</b>	$5 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$
<b>Pb</b>	ND	$2 \times 10^{-6}$	ND	ND	$7 \times 10^{-6}$	$9 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	ND	$2 \times 10^{-5}$	ND
<b>Sb</b>	$8 \times 10^{-6}$	ND	$8 \times 10^{-6}$	ND	$8 \times 10^{-6}$	ND	ND	ND	ND	ND
<b>Se</b>	$7 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-6}$	$9 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$
<b>U</b>	$1 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$
<b>V</b>	0.005	0.005	0.004	0.004	0.006	0.006	0.007	0.004	0.005	0.005
<b>Zn</b>	$2 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$

**Tabla 62.-** Concentraciones obtenidas de los elementos traza en  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , para la digestión ácida de los hongos. ND (No Detectado). AM (*Amanita muscaria*) y HL (*Hypomyces lactiflorum*).

Elemento	Sitios						
	AC10	AC8(AM)	AC8(HL)	AC9 P1	AC9 P2	AC9 P3	AC9 P4
	$\mu\text{g}/\text{kg}$						
As	$2 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$
Ba	0.98	2.14	0.074	1.75	0.08	1.84	0.09
Cd	$8 \times 10^{-6}$	$8 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$
Co	$5 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
Cr	$8 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-5}$
Cu	2.75	2.07	1.24	2.58	2.27	4.33	1.83
Ni	0.57	0.09	0.01	0.02	0.049	1.61	0.03
Pb	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
Sb	$3 \times 10^{-6}$	ND	ND	$1 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{-6}$
Se	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	ND	$6 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
V	$1 \times 10^{-4}$	0.001	$2 \times 10^{-5}$	$9 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-4}$
U	$4 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-7}$	$8 \times 10^{-7}$	$8 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
Zn	0.004	0.005	0.004	0.003	0.003	$6 \times 10^{-3}$	0.001