



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO
Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra
"Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy"



MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

**"Evaluación de la retención/movilización de elementos
potencialmente contaminantes en los suelos de la zona del
Campo Geotérmico Los Azufres"**

TESIS

Para obtener el título de:
Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio

PRESENTA:

Ing. Tzeltzin Sánchez Magaña

DIRECTORA DE TESIS

Dra. María Lourdes González Arqueros

Morelia, Michoacán. Enero 2026



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar al SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación), por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado con el apoyo financiero otorgado mediante la beca, la cual me permitió dedicarme de manera exclusiva al desarrollo del proyecto académico y de investigación.

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría, que me ayudo a cumplir una de mis metas personales y por el apoyo académico durante esta etapa.

Gracias al proyecto “CONAHCYT-PRONACES: Enfermedad Renal Crónica en la Región Oriente de Michoacán y su relación con las condiciones naturales, impacto ambiental y psicosocial” con número 0322739, 2023. Del cual se deriva este trabajo de tesis, por permitirme participar en tan importante investigación, gracias.

A mi directora de tesis, la Dra. María Lourdes González Arqueros, por su paciencia y orientación, apoyo moral y su conocimiento académico brindado durante la elaboración de mi trabajo de investigación. Por, sobre todo la confianza que deposito en mí, para que concluyera la elaboración de mi tesis a pesar de las dificultades, gracias.

Agradezco a los miembros de mi comité sinodal, el Doctor Pedro Corona Chávez, quien me acompañó durante el proyecto de investigación, aportando sus ideas y conocimiento, a la Dra. Erna Martha López Granados por su constante motivación y apoyo en todo mi paso por la maestría, al Dr. Rafael Trueba Regalado, Dra. Diana Cinthia Soria Caballero y Dr. Raul Cortes Martínez por su atenta revisión y comentarios que enriquecieron mi tesis.

Agradezco a la Mtra. Dulce María Bocanegra Ramírez, por su constante apoyo en el laboratorio, su paciencia y disposición para orientarme en cada procedimiento. También a la Lic. Izaney Rodríguez Díaz por su ayuda y apoyo en mi trabajo de laboratorio.

Agradezco a mi amigo y compañero de maestría el M.C. Diego Armando Martínez Ruiz, por motivarme a entrar al posgrado y ayudarme con la conclusión de este, a Jonatan Ponce porque desde la distancia me motivo a querer hacer investigación, así como escribir mi tesis.

Agradezco a mis compañeros de generación: Blanca Estrella, Luis Enrique, Alejandra Sayuri, Rodrigo, Oscar, Sergio, Grecia y Berenice, que formaron parte fundamental en mi paso por la maestría, así como el apoyo brindado durante el trabajo de investigación, dónde aportaron conocimientos o ayuda durante la elaboración de mi tesis.

Agradezco también a compañeros y amigos de otras generaciones de la maestría, Jamila Kristel y Sebastián Zaragoza que me brindaron fortaleza para afrontar y seguir adelante con la realización de mi trabajo, así como su apoyo y paciencia para escuchar las dificultades que se me presentaron durante mi paso por la maestría.

Agradezco a todas las personas que de manera directa o indirecta también aportaron para la realización de esta tesis.

DEDICATORIAS

Quiero dedicar esta tesis, a mi hermano Juan Alfonzo que, a pesar de ya no estar presente en mi vida, fue, es y será la más grande motivación y fuerza en cada etapa de mi vida académica y personal, que sin él no tendría las aspiraciones suficientes para concluir mis metas y propósitos, donde quiera que estés, gracias.

A mis padres, por todo el esfuerzo económico y moral que realizaron durante esta etapa de mi vida y que día con día me dieron el espíritu de lucha para concluir mis objetivos.

A mi prima Cinthia Estefanía, por apoyarme desde la distancia y ser mi fuerza de voluntad para concluir de la mejor forma mis estudios en la maestría como mi trabajo de investigación.

A mis amigos que en algún momento me brindaron su mano en esta etapa y por estar siempre a pesar de la distancia.

ÍNDICE

RESUMEN.....	13
1. INTRODUCCIÓN	15
2. ANTECEDENTES	19
3. JUSTIFICACIÓN	24
4. HIPÓTESIS.....	25
5. OBJETIVOS.....	26
5.1. Objetivos específicos	26
6. ÁREA DE ESTUDIO.....	27
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
7.1. Análisis de muestras	29
7.2. Análisis de metales pesados	31
7.2.1 Índice de Geoacumulación.....	31
7.2.2 Factor de enriquecimiento.....	32
7.2.3 Factor antrópico.....	33
8. RESULTADOS.....	35
8.1. Descripción de las unidades geopedológicas.....	36
8.1.1. AZU-01.....	36
8.1.2. AZU-02.....	37
8.1.3. AZU-03.....	38
8.1.4. AZU-04.....	39
8.1.5. AZU-05.....	40
8.1.6. AZU-06.....	41
8.1.7. AZU-07.....	42
8.1.8. AZU-08.....	43
8.1.9. AZU-09.....	44
8.1.10. AZU-10.....	45
8.1.11. AZU-11.....	46
8.1.12. AZU-12.....	47
8.1.13. AZU-13.....	48
8.2. Propiedades fisicoquímicas de los suelos	49
8.3. Análisis de metales pesados	51
8.4. Índices de contaminación	58

8.4.1.	Índice de geoacumulación (Igeo).....	58
8.4.2.	Factor de enriquecimiento (FE)	62
8.4.3.	Factor antrópico (FA)	64
9.	DISCUSIÓN	66
9.1.	Variabilidad y diversidad de suelos en el CGLA	66
9.2.	Movilidad y/o retención de EPC en los suelos.	71
10.	CONCLUSIÓN.....	78
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	79
12.	ANEXOS	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de grado de contaminación de suelos lgeo.....	33
Tabla 2. Clases de factores de enriquecimiento.....	34
Tabla 3. Interpretación de clases del factor antrópico.....	35
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas de los suelos a nivel superficie 0 cm y 50 cm..	51
Tabla 5. Resultados de elementos mayores y traza en los horizontes de suelo....	52
Tabla 6. Resultados de elementos mayores y traza en los horizontes de suelo....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Localización del área de estudio y del Campo Geotérmico los Azufres (CGLA).	28
Figura 2. Unidades geopedológicas con localización de los sitios AZU en San Pedro Jácuaro y San Isidro Alta Huerta.....	36
Figura 3. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-01.....	37
Figura 4. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-02.....	38
Figura 5. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-03.....	39
Figura 6. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-04.....	40
Figura 7. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-05.....	41
Figura 8. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-06.....	42
Figura 9. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-07.....	43
Figura 10. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-08.....	44
Figura 11. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-09.....	45
Figura 12. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-10.....	46
Figura 23. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-11.....	47
Figura 34. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-12.....	48
Figura 45. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-13.	49
Figura 16. Concentraciones totales de elementos mayoritarios en los perfiles de suelo en superficie 0 cm.....	54
Figura 17. Concentraciones totales de elementos mayores en los horizontes a 50 cm de profundidad.....	55
Figura 18. Concentraciones totales de elementos en los horizontes a nivel de superficie 0 cm.....	57

Figura 19. Concentraciones totales de elementos mayores y traza en los horizontes a 50 cm de profundidad.....	58
Figura 20. Índice de geoacumulación (Igeo) en elementos mayores.....	59
Figura 21. Índice de geoacumulación (Igeo) en elementos traza Sr, Rb y As.....	60
Figura 22. Índice de geoacumulación (Igeo) en elementos traza Ti, K, S y Ba.....	61
Figura 23. Índice de geoacumulación (Igeo) en elementos Zn, Fe y Mn.....	62
Figura 24. Valores del FE de los elementos mayoritarios a nivel superficie y a 50 cm de profundidad en los perfiles AZU. Fuente: elaboración propia.....	63
Figura 25. Valores del FE de los elementos traza a nivel superficie y a 50 cm de profundidad en los perfiles AZU.....	64
Figura 26. Valores del FA de los elementos mayoritarios a nivel superficie y a 50 cm de profundidad.....	65
Figura 27. Valores del FA de los elementos traza a nivel superficie y a 50 cm de profundidad.....	66
Figura 28. Perfiles de suelos representativos de la catena 1 en la zona de la cuenca de San Pedro Jácuaro y San Isidro Alta Huerta.....	69
Figura 29. Perfiles de suelos representativos de la catena 2 en la zona de la cuenca de San Pedro Jácuaro y San Isidro Alta Huerta.....	71
Figura 30. Gráfica de la concentración de As en muestras de suelo en temporada de estiaje y lluvias.....	73
Figura 31. Gráfica de concentración de Zn en muestras de suelo en temporada de estiaje y lluvias.....	74
Figura 32. Grafica de concentración de Ba en muestras de suelo en temporada de estiaje y lluvias.....	75

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Valores de fondo.....	88
Anexo 2. Límites permisibles de metales.....	89
Anexo 3. Propiedades fisicoquímicas de los perfiles AZU-01 al AZU-06.....	90
Anexo 4. Propiedades fisicoquímicas de los perfiles AZU-07 al AZU-13.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

As	Arsénico
Ba	Bario
CCME	Canadian Council of Ministers of the Environment
Cd	Cadmio
CE	Conductividad eléctrica
CGLA	Campo Geotérmico los Azufres
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
Cr	Cromo
Cu	Cobre
EPC	Elementos potencialmente contaminantes
ERCEND	Enfermedad renal crónica de etiología no determinada
FA	Factor antrópico
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Fe	Hierro
FE	Factor de enriquecimiento
Hg	Mercurio
IA	Índice de atenuación
Igeo	Índice de geoacumulación
KCl	Cloruro de potasio
msnm	Metros sobre el nivel del mar
Mn	Manganeso
MO	Materia orgánica
Mo	Molibdeno
Ni	Níquel
NOM	Norma oficial mexicana
OMS	Organización Mundial de la Salud
Pb	Plomo
pH	Potencial hidrógeno

Sb	Antimonio
Se	Selenio
Sn	Estaño
UE	European Union
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
WHO	World Health Organization

RESUMEN

Los suelos tienen la propiedad de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por absorción en función de sus propiedades fisicoquímicas, lo cual hace esencial su estudio y monitoreo en zonas con presencia de elementos potencialmente contaminantes. La zona oriente de Michoacán, dentro del Campo Geotérmico Los Azufres, presenta una alta incidencia de la enfermedad renal crónica de etiología no determinada (ERCEND), lo cual sugiere un origen relacionado a algún tipo de ingesta de agua, aire y/o a una posible contaminación ambiental incluyendo el suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar los suelos representativos de subcuencas de los Municipios de Hidalgo y Zinapécuaro, Michoacán. Con base en el análisis de sus propiedades fisicoquímicas y la correlación geoquímica, en especial con los elementos potencialmente contaminantes (EPC), se determinó su movilidad o retención dentro del suelo. Bajo un enfoque geopedológico, la metodología consistió en la descripción y muestreo de 13 perfiles de suelos, determinando el pH, el porcentaje de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y la textura, asimismo, por el método de fluorescencia de rayos x se analizó la composición química de horizontes representativos en cada perfil y se calcularon los índices de contaminación Igeo. Los resultados mostraron que las propiedades ácidas del suelo y bajos contenidos de materia orgánica promueven la solubilidad y movilidad de los contaminantes a través del perfil de suelo. El índice Igeo mostró valores de As (2.6), moderado a fuertemente contaminado. El factor vinculado con actividades humanas (FA) muestra enriquecimiento extremadamente alto para el azufre S, seguido del arsénico. El arsénico fue el único elemento que sobrepasó los límites máximos permisibles de acuerdo con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, y las normas internacionales de CCME-2007, la EPA-EE. UU.-2015 y la UE-2022. El estudio concluye con la necesidad de implementar programas de monitoreo para determinar si los EPC pueden estar migrando a través de la cadena trófica o a los cuerpos de agua subsuperficiales, como la remediación de suelos encaminada a reducir el riesgo potencial asociado a la presencia de estos elementos.

Palabras clave: Suelos, propiedades fisicoquímicas, índices de contaminación, metales pesados, elementos potencialmente contaminantes.

ABSTRACT

Soil exhibits the capacity to retain or bind substances mechanically or through the process of absorption, contingent upon its physical and chemical properties. This phenomenon underscores the significance of soil study and monitoring in areas where elements with potential contaminating properties are present. In the eastern region of the Mexican state of Michoacán, particularly within the confines of the Campo Geotérmico Los Azufres area, a high prevalence of a exhibits a notable incidence of Renal Cell Carcinoma of unknown etiology (RCC). This condition, characterized by the presence of renal cell carcinoma, has been observed to occur with a notable frequency within the region. The etiology, or the underlying cause, of this health condition remains to be elucidated. This phenomenon suggests a potential association with water intake, air exposure, or other environmental factors, including soil contamination. The objective of the present investigation was to evaluate the representative soils of the subcuencas located in the municipalities of Hidalgo and Zinapécuaro, Michoacán. In the present study, the mobility or retention of the element in question within the soil has been ascertained, following a thorough analysis of its physical and chemical properties and a meticulous geochemical correlation, with particular emphasis on elements that are potentially contaminating (EPCs). In the present study, a geopedological approach was implemented for the methodology, which entailed the description and sampling of 13 soil profiles. In this study, the parameters of acidity were determined, expressed as pH, as well as the percentage of organic matter, the capacity of exchange cations, and the texture of the specimens in question. Furthermore, a comprehensive analysis of the chemical composition of representative horizons in each profile was conducted using the method of X-ray fluorescence. In the final analysis, the estimation of the indices of contamination Igeo was undertaken. The findings of this study suggest a correlation between the soil's acidity and its low levels of organic matter, and the subsequent dissolution and mobility of contaminants in the environment.

Keywords: Soils, physicochemical properties, pollution indices, heavy metals, potentially contaminating elements.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un cuerpo natural, dinámico, no consolidado, compuesto por sólidos (material mineral y orgánico), líquidos y gases, se caracteriza por tener capas (horizontes), resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia a través del tiempo (Sposito, 1994).

La formación del suelo se deriva de un proceso que toma cientos de años. Este proceso está determinado por cinco factores, que son: clima, relieve, material parental, organismos y tiempo (Volke Sepúlveda *et al.*, 2005). Debido al largo tiempo que toma la formación del suelo, es considerado un recurso natural no renovable en años humanos (FAO, 2015).

El suelo constituye un recurso natural que desempeña funciones en la superficie terrestre como un reactor natural, es decir, es filtrante, amortiguador y transformador para regular los ciclos del agua y los ciclos biogeoquímicos. El suelo tiene la propiedad de retener sustancias mecánicamente o fijarlas por adsorción, contribuyendo así a la protección de aguas subterráneas y superficiales, así como a disminuir la penetración de agentes relativamente nocivos al medio ambiente (Sposito, 1994; Volke Sepúlveda *et al.*, 2005)

Se relaciona estrechamente con sus propiedades físicas y químicas. Las propiedades físicas son aquellas que están condicionadas por la masa total del suelo y reflejan características relacionadas con la organización estructural del suelo, las cuales son utilizadas para su descripción o determinadas en laboratorio (Rubio, 2010), algunas de ellas son: el color, la textura, la estructura, la porosidad y la permeabilidad, mientras que las propiedades químicas son las que dependen de la propia composición del suelo como el pH, la materia orgánica (MO), la conductividad eléctrica (CE) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Bu *et al.*, 2016; FAO, 2015).

Así mismo el comportamiento del suelo puede ser afectada por variables como humedad, temperatura y pH. Desafortunadamente, dichas variables están sujetas a ser modificadas drásticamente debido al constante avance de actividades

antropogénicas que generan cambios en la estructura y en el uso del suelo (Pérez, 2018). Uno de los cambios más relevantes se refiere a la introducción de elementos químicos ajenos a un proceso pedológico natural, que aquí se refieren como afectaciones de contaminación del suelo.

La expresión “contaminación del suelo” hace referencia a la presencia de un químico o sustancia fuera de sitio y/o presente en concentraciones más altas de lo normal y, que tendrá efectos adversos sobre los procesos vitales de cualquier organismo al que no esté destinado (García Villanueva, 2022; Rodríguez-Eugenio *et al.*, 2019). Por lo tanto, los suelos contaminados representan un riesgo para la salud humana, en el qué, sus efectos se podrían ver reflejados en diferentes tiempos, incluso en décadas. La contaminación suele ser el resultado de diferentes practicas antrópicas, algunas como agricultura intensiva, derrames o pérdidas de sustancias provenientes de industria que contengan elementos potencialmente contaminantes (EPC), afectando a toda la cadena alimenticia relacionada con los suelos, en particular por la contaminación de alimentos cultivados (Alloway, 2013; García Villanueva, 2022; Pastrana-Corral *et al.*, 2016).

Aunque los EPC en el suelo generalmente suelen provenir de las fuentes antrópicas en algunos casos pueden también tener un origen geológico: es decir que proceden del material parental o roca que dio origen al suelo. Las concentraciones de EPC como cadmio (Cd), cobre (Cu), estaño (Sn), plomo (Pb), zinc (Zn), níquel (Ni) y mercurio (Hg) pueden tener fuente natural de metales pesados (Albanese *et al.*, 2007). Sin embargo, en algunos casos la acumulación de estos elementos puede también ser inducida por procesos extractivos de minería y energía.

El término metal pesado hace referencia al grupo de metales y metaloides de masa relativamente alta como Pb, Cd, Cu, Hg, Sn y Zn. Otros elementos que son considerados son el arsénico (As), antimonio (Sb) y selenio (Se) (Kemp, 1998). No obstante, algunos de estos metales son esenciales para procesos biológicos como: hierro (Fe), manganeso (Mn), Zn, Cu y molibdeno (Mo), mientras que el Cd, Pb y Hg resultan ser tóxicos.

Debido a su naturaleza no biodegradable, los EPC solo se pueden depositar en el subsuelo, en donde su presencia y acumulación pueden producir desequilibrios en los ciclos de nutrientes y la acidificación del propio suelo. En consecuencia, el grado de afectación estará sujeto a sus propiedades fisicoquímicas, las cuales están encargadas de controlar la movilidad, biodisponibilidad, lixiviación y tiempo de acumulación de los contaminantes (Ahmed *et al.*, 2019; FAO & GTIS, 2016; Kemp, 1998; Rodríguez-Eugenio *et al.*, 2019), siendo estos quienes determinarán la distribución y movilidad de los EPC dentro y hacia el ecosistema.

Dentro de las propiedades del suelo, el pH del suelo es uno de los principales parámetros que brinda información acerca de la movilidad de los metales pesados en el sistema. La tendencia ácida favorece la solubilidad y por lo tanto la movilidad de algunos elementos Mn, Fe, Br, Cu y Zn. Por el contrario, valores de pH alcalino disminuyen su movilidad y su disponibilidad de reacción. Por su parte, la materia orgánica (MO) tiende a inmovilizar a los metales en el suelo. Mientras que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) indica el potencial del suelo para retener e intercambiar nutrientes, la cual influye en la fertilidad del suelo al controlar los nutrientes disponibles para las plantas (He *et al.*, 2015; Zeng *et al.*, 2011). En suma, estas propiedades resultan ser fundamentales para evaluar la retención y/o movilidad de los EPC.

Es de vital importancia conocer la fuente, los procesos de lixiviación y la disponibilidad de los diferentes compuestos tóxicos que contaminan el suelo, ya que estos afectarán mediante la cadena trófica al ser humano por el consumo de agua y alimentos provenientes de suelos contaminados (Becerril *et al.*, 2007; Morton-Bermea *et al.*, 2009).

La explotación geotérmica puede inducir procesos de contaminación por elementos potencialmente contaminantes (EPC), procedente de la movilidad de metales pesados. Las plantas geotérmicas pueden tener efectos negativos como la contaminación de aguas superficiales y subterráneas derivado de sustancias peligrosas utilizadas durante la exploración y construcción, también por fallas en el

drenaje, así como por fugas de depósitos superficiales, los cuales suelen contener metales en suspensión o solución (González-Acevedo, 2017).

En la región oriente de Michoacán, principalmente los municipios circundantes de la Sierra de San Andrés, donde se encuentra localizado el Campo Geotérmico Los Azufres (CGLA), se ha registrado un alto índice y prevalencia de la enfermedad renal crónica de etiología no determinada (ERCEND), la cual se atribuye a un posible impacto/contaminación ambiental (Corona-Chávez *et al.*, 2022).

Así mismo en el CGLA se han reportado estudios que evidencian pérdidas de emisiones de fluidos y zonas con fuentes de agua con concentraciones altas de arsénico, boro, silicio y aluminio (Birkle & Merkel, 2000; Corona-Chávez *et al.*, 2022; Panduro-Rivera *et al.*, 2014), que podrían ser la fuente de contaminación ambiental y la posible causa de las afectaciones en la población oriente del estado de Michoacán.

En el presente estudio se llevó a cabo un análisis bajo un enfoque geopedológico de perfiles de suelos de la cuenca donde se ubican las localidades de San Pedro Jácuaro y San Isidro Alta Huerta, que son colindantes al CGLA, con la finalidad de identificar la retención o movilización de elementos potencialmente contaminantes a través de una serie de perfiles de suelos. Se presentan resultados de la descripción de perfiles de suelos representativos del área, la evaluación de las propiedades fisicoquímicas y la evaluación del índice de geoacumulación, el factor de enriquecimiento y el factor antrópico.

2. ANTECEDENTES

Las actividades antropogénicas generalmente implican de un uso intensivo del suelo y de los recursos naturales como el agua, como ocurre en el caso de la instalación y operación de plantas geotérmicas. Estas plantas operan principalmente para la generación de energía eléctrica, induciendo así alteraciones significativas del subsuelo modificando la estructura y composición de este, tanto física como químicamente. Dichas alteraciones suelen afectar las propiedades del suelo relacionadas con la porosidad, la aireación y la capacidad de filtrar agua (Mataix-Solera, 2000). A su vez, las pérdidas accidentales de la planta como emisiones de gases o fluidos pueden generar procesos de salinización, acidificación o contaminación química, comprometiendo la estabilidad del suelo y repercutiendo en los servicios ecosistémicos que provee (FAO, 2015; Ossiel & Ramos, 2019).

La energía geotérmica es considerada como una fuente de energía limpia y alternativa en términos de disponibilidad y a su vez poco “contaminante” en comparación con la producción de energía eléctrica con combustibles fósiles. Sin embargo, las plantas geotérmicas pueden tener efectos negativos como la contaminación de aguas superficiales y subterráneas derivado de sustancias peligrosas utilizadas durante la exploración y construcción, también por fallas en el drenaje, así como por fugas de depósitos superficiales, los cuales suelen contener metales en suspensión o solución como son el As, Hg, Pb, Zn, B y S (González-Acevedo, 2017).

Las plantas geotérmicas han recibido atención en lo que respecta a la movilización del elemento Hg hacia el medio ambiente. En Italia, Baldi (1988) cuantificó concentraciones de mercurio en el suelo y en líquenes alrededor de una planta geotérmica, la cual presentó concentraciones en el suelo de hasta 0.3 mg/kg, reportando que el Hg disminuyó a una distancia de 0.6 km. Sin embargo, descubrió que el Hg puede seguir extendiéndose debido a la acción de los vientos que predominan en la zona.

En el campo geotérmico de Dachny ubicado en Kamchatka, Rusia, se realizó un estudio que evidenció un enriquecimiento significativo en As, donde los fluidos emitidos por el campo presentaron concentraciones de hasta 9 mg/kg, mientras que, en los manantiales termales cercanos, los niveles del As se mantuvieron por debajo de los 10 µg/kg, indicando un contraste en la calidad del agua atribuible a la actividad geotérmica (Ilgen *et al.*, 2011).

En Asia las investigaciones en materia de energía geotérmica siguen en constante actualización, un estudio realizado en china por Hu *et al.*, (2023) empleó una revisión de literatura científica sistemática para identificar los efectos ambientales en la salud humana asociado con la explotación geotérmica. Uno de los principales impactos mencionados fue la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subsuperficiales por impacto de emisiones atmosféricas, la presencia de elementos tóxicos como As y Fe, los cuales están presentes en los fluidos geotérmicos. Además, señaló que las poblaciones cercanas a las plantas geotérmicas pueden estar expuestas a riesgos respiratorios por la inhalación de gases y a la contaminación del agua potable por el As, Hg y Cd.

La contaminación del suelo por metales pesados o elementos traza son casos de estudios recurrentes como en Tiquillaca, Perú realizado por Fernández-Ochoa *et al.*, (2022), utilizando índices de contaminación para evaluar el suelo, siendo el índice de contaminación denominado Igeo el cual mostró resultados de As, Cd y Pb con niveles altos de contaminación yendo de moderada a fuerte, mientras que Ba, Cr, Cu, Ni y Zn no mostraron contaminación significativa. Por otra parte, las muestras de suelo presentaron acidez (pH de 4.1) y un bajo porcentaje de materia orgánica (0.8 %), favoreciendo la solubilidad y la movilidad de los metales, aumentando en consecuencia su potencial de lixiviación hacia el agua subterránea. Concluyó que la contaminación del suelo representa un riesgo ambiental para los ecosistemas andinos, especialmente para zonas agrícolas y ganaderas.

En la subcuenca del Alto Balsas en Tlaxcala y Puebla, Castro-González *et al.* (2019), evaluaron la procedencia natural o antrópica de los metales pesados presentes en suelos irrigados con las aguas residuales mediante el índice de

contaminación Igeo y el factor de enriquecimiento (FE). Se colectaron muestras de agua y suelo, determinando las concentraciones de Cd, Pb, Ni, Cu, Co, Cr, Zn y As mediante espectrometría de emisión óptica. Los resultados de metales y arsénico en agua no superaron los límites de la NOM-001-ECOL-1996 ni de regulaciones internacionales. En cuanto a los suelos de uso agrícola, el Igeo mostró valores entre 0.003 y 3.0, indicando contaminación moderada para Cd. El índice FE presentó valores entre 1.5 y 6.0, indicando enriquecimiento antrópico. El autor concluyó que el mayor contenido de metales en el suelo agrícola puede deberse al tiempo de uso de aguas para irrigar.

Quevedo & Meneses (2014), realizaron un análisis haciendo uso del Igeo y el factor de enriquecimiento en suelos agrícolas en San Alfonso en Machachi, Ecuador, para determinar la posible fuente de Pb, Cd y Ni. Los resultados mostraron para el Igeo valores de 1.7 y 1.1 mg/kg para plomo, indicando contaminación moderada, para Cd valores de 6.4 y 6.6 mg/kg indicando contaminación extrema y el valor menor a 0 para Ni, no presenta contaminación. El FE mostró 10.3 mg/kg y 12.9 mg/kg para plomo (enriquecimiento moderado), el Cd mostró valores de 484.8 y 568.1 mg/kg (enriquecimiento alto) mostrando así que el enriquecimiento proviene de fuentes antropogénicas. En conclusión, los índices mostraron un grave enriquecimiento antrópico del Cd.

En relación con los estudios de impacto ambiental en zonas geotérmicas en México, Pastrana-Corral (2017) evaluó la concentración de metales pesados en los suelos adyacentes al complejo geotérmico de Cerro Prieto en Mexicali, Baja California. Reportó una relación directa entre la distancia del complejo geotérmico y la presencia de Hg en el suelo de hasta 0.26 mg/kg a una distancia de 1000 metros al complejo, las concentraciones de Hg disminuyeron en los sitios de control (0.05 mg/kg). Sin embargo, las concentraciones de Hg fueron bajas respecto a la norma oficial mexicana para la restauración de suelos (23 mg/kg). Concluyó que las actividades del complejo están deteriorando la calidad del suelo conforme se aproxima al perímetro de la zona.

Los estudios antes mencionados sobre las actividades industriales de las plantas geotérmicas y la presencia de metales pesados en el suelo, como en mantos acuíferos alrededor o dentro de las plantas, permiten considerar más regiones en el país donde podría estar ocurriendo un impacto ambiental significativo para la población, tal es el caso de la asociada a la Franja Volcánica Trans-Mexicana, específicamente la región oriente del estado de Michoacán.

La región oriente de Michoacán presenta alta incidencia y prevalencia de la enfermedad renal crónica de etiología no determinada (ERCEND) desde hace más de 25 años. Esto es atribuible a factores ambientales como metales pesados, pesticidas o micotoxinas, compuestos potencialmente tóxicos, los cuales pueden aumentar el riesgo de desarrollar la enfermedad (Corona-Chávez *et al.*, 2022; Panduro-Rivera *et al.*, 2014; Robinson-Fuentes *et al.*, 2023).

Existen varios estudios referentes a las ERC en el oriente de Michoacán (Birkle & Merkel, 2000; Panduro-Rivera *et al.*, 2014). Los estudios enfocados en el impacto ambiental reportan principalmente concentraciones de elementos potencialmente contaminantes (metales pesados) y en agua de río y de consumo adyacentes al campo geotérmico Los Azufres. La incertidumbre por encontrar una posible fuente principal de contaminación y la relación del impacto ambiental con la ERCEND, han motivado diferentes investigaciones en la región, algunas de ellas en el ámbito clínico y otras a la evaluación de contaminantes en el entorno (Santacruz-Benitez, 2017; Wesseling *et al.*, 2017).

Birkle y Merkel (2000) analizaron la concentración de metales en segmentos en presas de enfriamiento del campo geotérmico Los Azufres (CGLA), localizado en la parte oeste, encontrando niveles de As, Hg y Ti que rebasaron los estándares internacionales (referencia) para suelos contaminados.

Para el área de estudio se han reportado la presencia de EPC en estudios de calidad de agua (Al, Fe, Mn, Cr, Cd, Na y As), los cuales se encuentran cumpliendo de acuerdo con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2021, Panduro-Rivera *et al.* (2014), reportó que la mayoría de los parámetros de calidad del agua que consume la población en la zona oriente de Michoacán se encuentran dentro de los límites

establecidos por las normas NOM-127, NOM-041 y OMS-2011. Sin embargo, destacan algunos parámetros como el pH ácido en el agua que podrían ocasionar disoluciones de estos metales tóxicos. El pH ácido tiende a favorecer la disolución de las rocas del subsuelo además de ocasionar la corrosión en sistemas de distribución del agua y la disolución de los metales potencialmente contaminantes.

Un estudio en específico para la tenencia de San Pedro Jácuaro por Santacruz-Benitez (2017) referente a la calidad del agua, presentó concentraciones de elementos potencialmente tóxicos como el Cd, el cual se registra en Tierras Coloradas, Alta Huerta, La Rosita, Las Palmitas y el Cerrito. Asimismo, el As presentó niveles altos en Laguna Larga y Tierras Coloradas.

En México se han identificado tres principales ambientes hidrogeológicos en donde se han detectado presencia de elementos traza, específicamente el As en aguas subterráneas como: al noreste, norte y centro del país, donde se llevan a cabo actividad minera, al norte, centro y en aguas geotérmicas en la zona centro de México (Arreguín Cortés *et al.*, 2009).

Evaluar las propiedades fisicoquímicas del suelo permiten anticipar, identificar su capacidad de retención, movilidad y transformación a los contaminantes potenciales, particularmente los metales pesados, que podrían afectar los acuíferos subterráneos, siendo clave para una gestión sostenible de los recursos e implementar medidas de protección ambiental a corto, mediano y largo plazo (FAO, 2018).

3. JUSTIFICACIÓN

Las localidades de San Pedro Jácharo y San Isidro Alta Huerta, pertenecientes al municipio de Hidalgo en la región oriente de Michoacán, presentan una alta incidencia y prevalencia de la Enfermedad Renal Crónica de Etiología no Determinada (ERCEND). Estas localidades colindan con el Campo Geotérmico Los Azufres el cual es considerado una de las plantas geotérmicas más importantes de México.

A pesar de que la energía geotérmica se considera una energía limpia, las plantas geotérmicas generan emisiones y pérdidas de líquidos, gases y desechos con compuestos tóxicos (elementos potencialmente contaminantes, EPC) que pueden afectar la calidad y la salud del suelo (Ayala *et al.*, 2025; Soltani *et al.*, 2021). Estos EPC se pueden retener o movilizar en el suelo en función de las propiedades del mismo y de los factores biofísicos y antropogénicos del paisaje. Por ende, el estudio de los suelos en zonas geotérmicas es de vital importancia para conocer el nivel del impacto ambiental de las operaciones de una planta geotérmica sobre el suelo, así como las afectaciones al medio ambiente y las poblaciones colindantes.

4. HIPÓTESIS

Las propiedades fisicoquímicas del suelo que influyen en la acumulación y/o movilización de los elementos potencialmente contaminantes dentro del perfil edáfico son: pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y textura (Sposito, 2016). Por lo tanto, se espera que aquellas unidades geopedológicas que presenten diversas combinaciones como son: suelos con valores de pH extremadamente ácidos o alcalinos, texturas medias/gruesas, una baja capacidad de intercambio catiónico y un bajo porcentaje de materia orgánica, tendrán una mayor movilidad a los elementos potencialmente contaminantes (Alloway, 2013; Bu *et al.*, 2016) , en cambio los perfiles que presenten valores de pH neutros, texturas finas, un alto porcentaje de materia orgánica, así como una alta capacidad de intercambio catiónico serán los que tengan mayor retención de elementos potencialmente contaminantes.

Por ende, se espera que, los perfiles en las geoformas de valles intermontano, piedemonte o planicies bajo uso de suelo forestal serán los que presenten propiedades idóneas para retención a los EPC, y que presenten valores de pH neutros, alto porcentaje de materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC) alta y texturas finas. Y aquellos perfiles en geoformas de laderas abruptas y planicies aluviales bajo uso de suelo agrícola, presenten valores de pH extremos (ácidos o alcalinos), bajo porcentaje de materia orgánica (MO), baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) y texturas medias/gruesas, propiciando la movilidad de los EPC.

5. OBJETIVOS

Evaluar la capacidad de retención y/o movilización de los elementos potencialmente contaminantes en los suelos de la zona del Campo Geotérmico Los Azufres, en las subcuencas de las localidades de San Isidro Alta Huerta y San Pedro Jácuaró.

5.1. Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades fisicoquímicas de pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y textura de los suelos con relación al paisaje.
- Determinar las concentraciones de los elementos As, Ba, Cu, Zn, Hg y Mn y comparar con los límites permisibles de suelos contaminados de acuerdo con las NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, y normas internacionales CCME-2007 de Canadá, la EPA EE. UU.-2015 y de la Unión Europea-2022.
- Evaluar el nivel de contaminación del suelo mediante el índice de geoacumulación, el factor de enriquecimiento y el factor antrópico de los elementos potencialmente contaminantes.

6. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca en la que se encuentran las localidades de San Pedro Jácuaró y San Isidro Alta Huerta, pertenecientes al municipio de Ciudad Hidalgo, se encuentra en el oriente del estado de Michoacán, a 110 kilómetros de la ciudad de Morelia, con una extensión de 131.7 km² y una altitud de más de 2100 msnm (Figura 1 mapa de localización).

El área de estudio se encuentra ubicada, en la parte baja al sursureste de la Sierra de San Andrés y del Campo Geotérmico Los Azufres (CGLA), siendo esta la segunda planta geotérmica más importante de México después de Cerro Prieto, y que posiciona al país en sexto lugar de generación geotermoeléctrica en el mundo (Mendoza-Rangel & Cuauhtémoc, 2004; Núñez-Hernández, 2019).

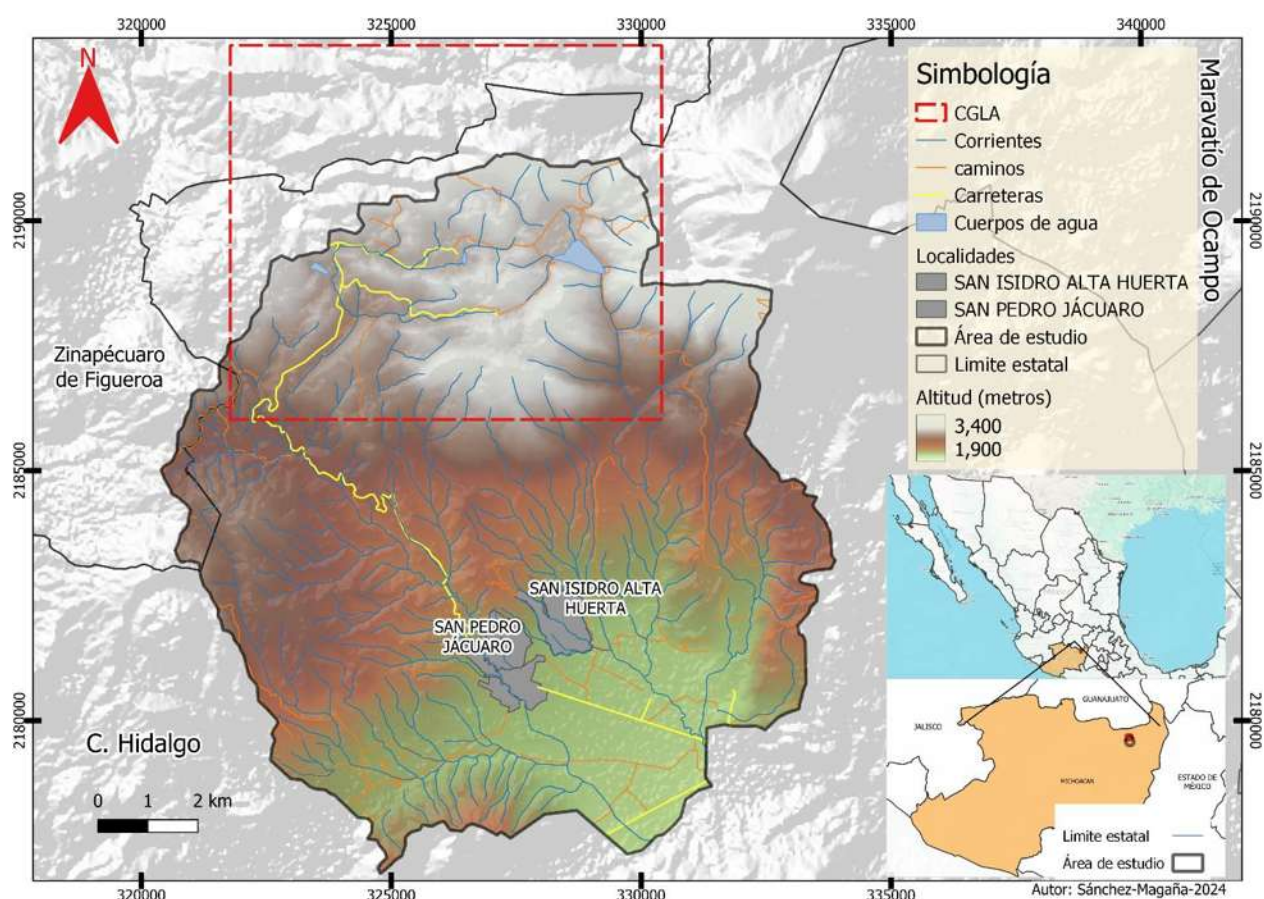


Figura 1. Mapa de Localización del área de estudio y del Campo Geotérmico los Azufres (CGLA).

Fuente: elaboración propia con base en datos INEGI 2021.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

Bajo un enfoque geopedológico (Zinck, 2015), que radica en evaluar las unidades del paisaje que relacionan a los suelos con el relieve, lo cual permite identificar procesos geopedológicos que definen las características de cada suelo y unidad.

Los sitios de muestreo se definieron con base en el mapa de unidades geopedológicas realizado por González-Arqueros (2022, comunicación personal). La delimitación de unidades de paisaje se realizó en función de los factores formadores de suelo y los factores de erosión hídrica. Para ello, se determinaron los elementos principales que permiten la delimitación del paisaje en unidades a partir de información: litológica, edafológica, topográfica, climática, vegetación y/o uso de suelo y manejo.

Se delimitaron trece unidades geopedológicas para realizar el levantamiento en campo, el cual consistió en la caracterización y descripción de las catenas representativas. Una catena es una secuencia de suelos que va a lo largo de las diferentes posiciones del relieve o de una pendiente y presenta diferencias en sus propiedades físicas, químicas y morfológicas debido a la topografía y los procesos de formación del suelo González-Arqueros (2022), los suelos en laderas de una colina rara vez son uniformes, en consecuencia, los factores formadores del suelo varían de la cima a la base desarrollando así diferentes tipos de suelo (Tran *et al.*, 2020).

Por lo que nos permite comprender como el relieve y la posición en la pendiente influyen en las propiedades fisicoquímicas de los suelos.

Las muestras de suelo fueron tomadas por cada horizonte de los perfiles representativos, que corresponden a cada unidad geopedológica (13) de la zona de estudio y se describieron de acuerdo con la metodología propuesta por (Soil Science Division Staff, 2017) y el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo por (Siebe *et al.*, 2006). Para el análisis de propiedades fisicoquímicas se tomaron muestras perturbadas y no perturbadas por horizonte.

Para la evaluación de metales pesados se seleccionaron las muestras a profundidad de ≈ 0 y de ≈ 50 cm por perfil. A cada sitio se le tomaron datos de georreferenciación, humedad dentro del perfil, temperatura e infiltración con un infiltrómetro digital de doble anillo Turf Tec IN2-W.

7.1. Análisis de muestras

Las muestras se procesaron en el laboratorio del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT) de las UMSNH.

Los parámetros analizados fueron:

- Porcentaje de piedras
- Porcentaje de tierra fina
- Conductividad eléctrica (CE)
- Humedad
- Densidad aparente
- Densidad real
- Color
- pH H₂O y en KCl
- Materia orgánica
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC)
- Textura

Se realizó un pretratamiento de secado al aire y un tamizado a una malla de 2 mm de luz de malla (ASTM N° 10 diámetro 8”), el material que traspasó el tamiz (<2 mm) fue usado para los análisis fisicoquímicos. A partir de esto se obtuvieron los porcentajes de rocas y tierra fina.

El color se registró a partir de la tabla de colores Munsell 2000 bajo luz natural. La determinación de la humedad y densidad aparente se realizó por el método volumétrico. La densidad real se determinó por el método del picnómetro. La conductividad eléctrica (CE) y el pH se midieron con un conductímetro marca Hanna Instruments modelo HI9812-5.

Se determinó el pH en H₂O y KCl 1N mediante un potenciómetro previamente calibrado con soluciones buffer pH 4.0 y 7.0. El pH en H₂O se utiliza para medir la acidez actual del suelo, es decir, la concentración de iones (H⁺) presentes en la

solución acuosa. Por otro lado, el pH en KCl 1N permite conocer la acidez intercambiable o potencial, es decir la cantidad de protones (H^+) (Brady & Weil, 2014).

La materia orgánica del suelo se determinó a través del método Walkley y Black (1934) de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002). La capacidad de intercambio de cationes (CIC), que se define como la suma de cationes intercambiables de un suelo, se determinó por el método Versenato (EDTA), específico para suelos ácidos y neutros. La textura se realizó a través del método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1962) (NOM-021-RECNAT-2000, 2002).

7.2. Análisis de metales pesados

Los análisis de concentración total de los elementos potencialmente contaminantes fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía UNAM, CDMX, Unidad Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, con el equipo portátil NITON, se realizó un análisis de elementos mayores en muestra fundida por fluorescencia de rayos X con un equipo RIGAKU PRIMUS II (LANGEM-PT-LFRX-01).

Para la obtención del grado de contaminación presente en el suelo, así como el impacto ambiental por metales pesados, se determinó el uso de índices de contaminación con respecto a las concentraciones y su valor de fondo, fueron los siguientes: el Índice de geoacumulación (Igeo), el Factor de enriquecimiento (FE) y el Factor antrópico (FA), los cuales permitan cuantificar, clasificar y comprender la extensión, origen y/o posible fuente de contaminación en el suelo (Fernandes & Nayak, 2016; MÜLLER, 1986; Muyulema-Allaica *et al.*, 2019).

La elección de estos índices se da principalmente a que son herramientas importantes, ampliamente aceptados y utilizados en estudios previos de suelos, con la capacidad para evaluar de manera complementaria el grado de enriquecimiento, así como el origen de los EPC, en conjunto los tres índices nos permiten una interpretación integral sobre la potencial contaminación en el suelo, considerando los procesos naturales así como antrópicos, facilitando la comparación de los resultados con estudios previos (Quevedo & Meneses, 2014; Taghavi *et al.*, 2024).

7.2.1 Índice de Geoacumulación

El índice de geoacumulación sirve para evaluar el grado de contaminación del suelo por sustancias orgánicas e inorgánicas. El Igeo es aplicable a metales pesados, siempre y cuando se tengan las concentraciones en muestras de la zona que no hayan tenido incidencia del hombre, o en su defecto se usan los datos de sus abundancias en la corteza terrestre (Quevedo & Meneses, 2014), como lo fue para nuestro caso de estudio. El Igeo categoriza el grado de contaminación en suelos por metales pesados y elementos metaloides, desde no contaminados a fuertemente contaminados (Tabla 1).

Los valores de Bn se obtuvieron de (Rudnick & Gao, 2014). Se tomó en cuenta el valor de fondo más apegado a las condiciones geológicas a la zona de estudio.

Tabla1. Clasificación de grado de contaminación de suelos Igeo.

Valor I-geo	Clasificación I-geo	Nivel de contaminación
0	< 0	No contaminado
1	0-1	No contaminado a moderadamente contaminado
2	1-2	Moderadamente contaminado
3	2-3	De moderado a fuertemente contaminado
4	3-4	Fuertemente contaminado
5	4-5	De fuertemente a extremadamente contaminado
6	>5	Extremadamente contaminado

Fuente: Elaboración propia, a partir de información extraída de Muyulema-Allaica (2019).

Para calcular el Igeo se utiliza la siguiente ecuación 1 (MÜLLER, 1986):

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{(1.5 \cdot B_n)} \right] \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

Cn=concentración de la fracción analizada de muestra

Bn= concentración de una muestra base (valores de fondo)

1.5=constante para tomar en cuenta las posibles variabilidades litológicas.

7.2.2 Factor de enriquecimiento

El factor de enriquecimiento (FE) determina el aumento o disminución de un elemento teniendo en cuenta las variaciones naturales por la composición litológica y así determinar el origen (Albert *et al.*, 2021; Quevedo & Meneses, 2014). Los elementos más abundantes en la corteza terrestre son tomados en cuenta para el cálculo del factor de enriquecimiento, como Si, Al y Fe, para este caso específico se utilizó el Fe como constante (Ecuación 2) (Akoto & Darko, 2008; Quevedo & Meneses, 2014). El FE clasifica el grado de enriquecimiento en suelos por metales pesados y elementos metaloides, desde enriquecimiento mínimo hasta enriquecimiento extremadamente alto (Tabla 2).

Tabla 2. Clases de factores de enriquecimiento.

Clase de FE	Interpretación
$FE \leq 1.5$	Enriquecimiento mínimo
$2 \leq FE \leq 5$	Enriquecimiento moderado
$5 \leq FE \leq 20$	Enriquecimiento significativo
$40 \leq FE$	Enriquecimiento extremadamente alto

Fuente: Elaboración propia, a partir de información extraída de Quevedo (2014).

Para calcular el factor de enriquecimiento se utiliza la siguiente ecuación:

$$FE = \frac{(X/Fe)_{muestra}}{(X/Fe)_{corteza}} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

FE: factor de enriquecimiento

(X/Fe) muestra: relación de la concentración del metal con el hierro en la muestra

(X/Fe) corteza: relación de la concentración del metal con el hierro en la corteza terrestre.

7.2.3 Factor antrópico

El factor antrópico (FA) se utiliza para evaluar la influencia de las actividades humanas en la concentración de metales pesados u otros contaminantes en el suelo. Se calcula comprobando la relación entre la concentración de un elemento en los sedimentos superficiales (valores de muestra) y su concentración en los sedimentos profundos (valores de la corteza terrestre), permitiendo identificar si la concentración del elemento ha tenido un aumento derivado de actividades antrópicas (Ecuación 3) (Fernandes & Nayak, 2016; Szefer *et al.*, 1998). Los valores para medir el nivel de contaminación del FA y su interpretación están representados en (Tabla 3).

Si el $FA > 1$, indica que existe enriquecimiento antropogénico en el suelo, si el $FA \leq 1$, significa que no hay un enriquecimiento del metal por actividades humanas y la concentración proviene de fuentes naturales.

Tabla 3. Interpretación de clases del factor antrópico.

Clase FA	Nivel de contaminación
< 1	Sin contaminación, posible depleción natural
> 1	Influencia antrópica baja o leve
> 1.5	Contaminación moderada
> 3	Contaminación significativa
> 5	Contaminación severa

Fuente: Elaboración propia, a partir de información extraída de Fernandes & Nayak (2016).

Valores altos de FA sugieren una contaminación significativa causada por actividades humanas (agrícolas y/o industriales).

Para calcular el factor antrópico se utiliza la siguiente ecuación:

$$FA = \frac{C_{muestra}}{C_{fondo}} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde;

FA: factor antrópico

C muestra: es la concentración del elemento en la muestra.

C fondo: es la concentración natural o valor de fondo del mismo elemento.

8. RESULTADOS

De acuerdo con el presente estudio se llevó a cabo la identificación y caracterización de las unidades de suelos representativos en la zona. En total se obtuvieron 13 unidades geopedológicas (ver en Figura 2), cada una con características particulares, aquí se presentan 2 catenas representativas del paisaje, donde a continuación se describen cada uno de los 13 perfiles de suelos, así como en el anexo 3 y 4.

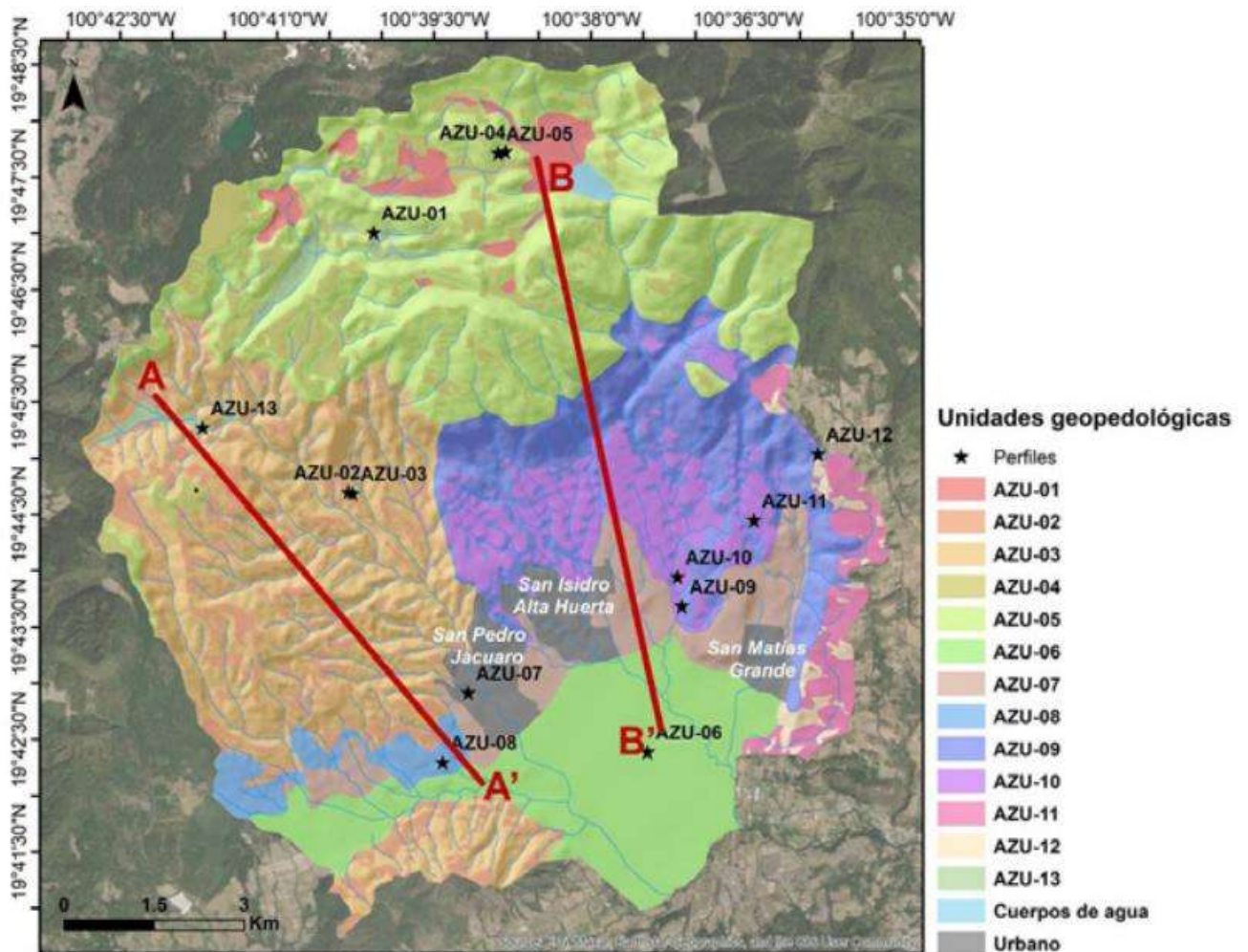


Figura 2. Unidades geopedológicas con localización de los sitios AZU en San Pedro Jácuar y San Isidro Alta Huerta.

Fuente: González-Arqueros (2024).

8.1. Descripción de las unidades geopedológicas

8.1.1. AZU-01

El perfil se ubica en el cerro de San Andrés a 2813 msnm, en un parche de pastizales con fuerte influencia humana, junto al balneario Puentecillas (ver Figura 2), a profundidad de 40 cm, en las coordenadas: 14Q 32529, 218837.

Perfil poco profundo, mojado con presencia de agua a poca profundidad, drenaje deficiente, de color marrón pálido a gris claro. Presenta desarrollo de estructura débil en forma de migajón y bloques subangulares, con agregados de tamaño medio a grueso. El horizonte 2Bg muestra la presencia de pocos cutanes incipientes, manchas y motas con proceso de intemperismo de óxidos de Fe y Mn de color rojo en el exterior de los agregados, lo que deriva en la influencia de la saturación de agua por procesos estagnicos e influencia de manto fluvial. La distribución de raíces es normal con mayor densidad a los 40 cm. Todo el perfil presentó una fuerte reacción al NaF (alófano). El pH es extremadamente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina a media (Tabla 4).

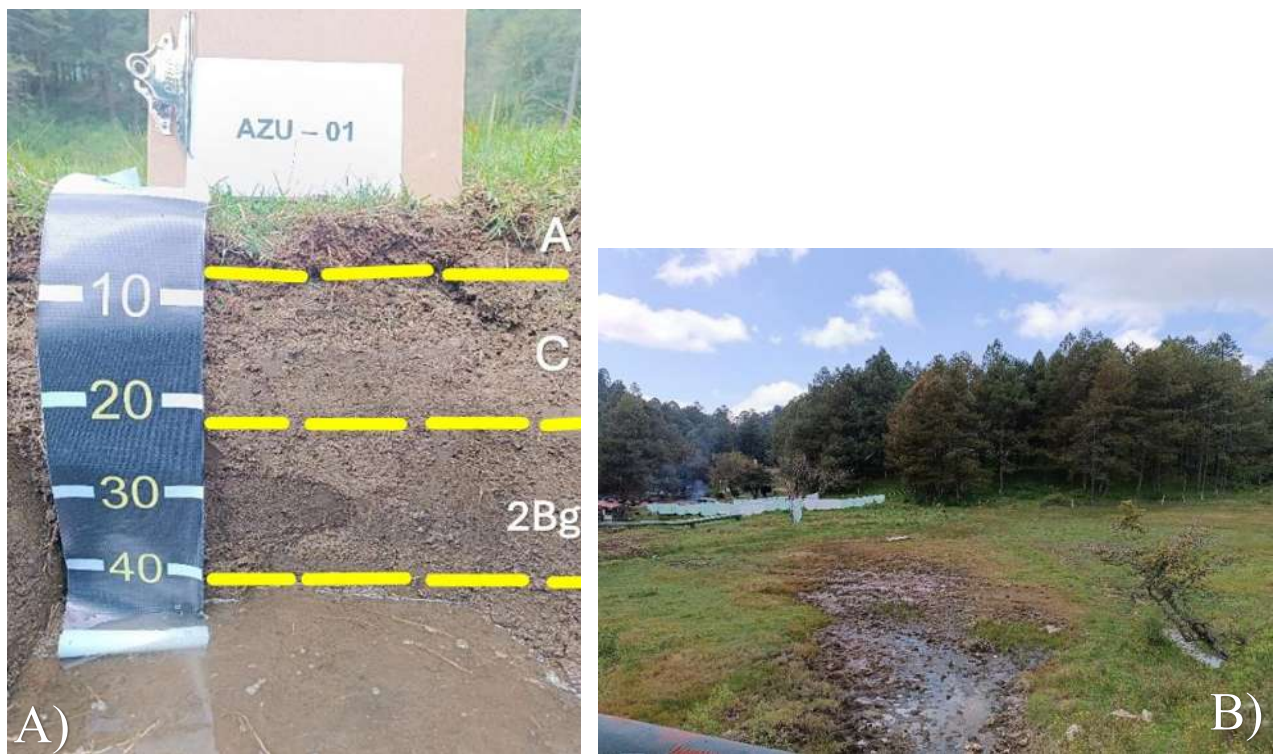


Figura 3. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-01.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2023).

8.1.2. AZU-02

El suelo de este perfil se ubica en el ejido de San Pedro Jácuaró a 2412 msnm, con uso forestal (bosque de pino-encino y madroños), con una profundidad de 126 cm (ver en Figura 3). en las coordenadas: 14Q 32484, 218418.

Perfil profundo, húmedo con drenaje excesivo, en zona de cárcavas, drenaje excesivo, de color marrón muy oscuro en su horizonte superficial y de color gris/blanco en el resto del perfil. Presenta un desarrollo de estructura débil en forma de bloques subangulares, con agregados de tamaño muy fino. Todo el perfil es poroso y permeable. La distribución de raíces es alta, con mayor densidad a los 55 cm de profundidad. Presentó una ligera reacción al NaF (alófano) a partir de su segundo horizonte. El pH es fuertemente a extremadamente ácido, con una textura gruesa (Tabla 4).

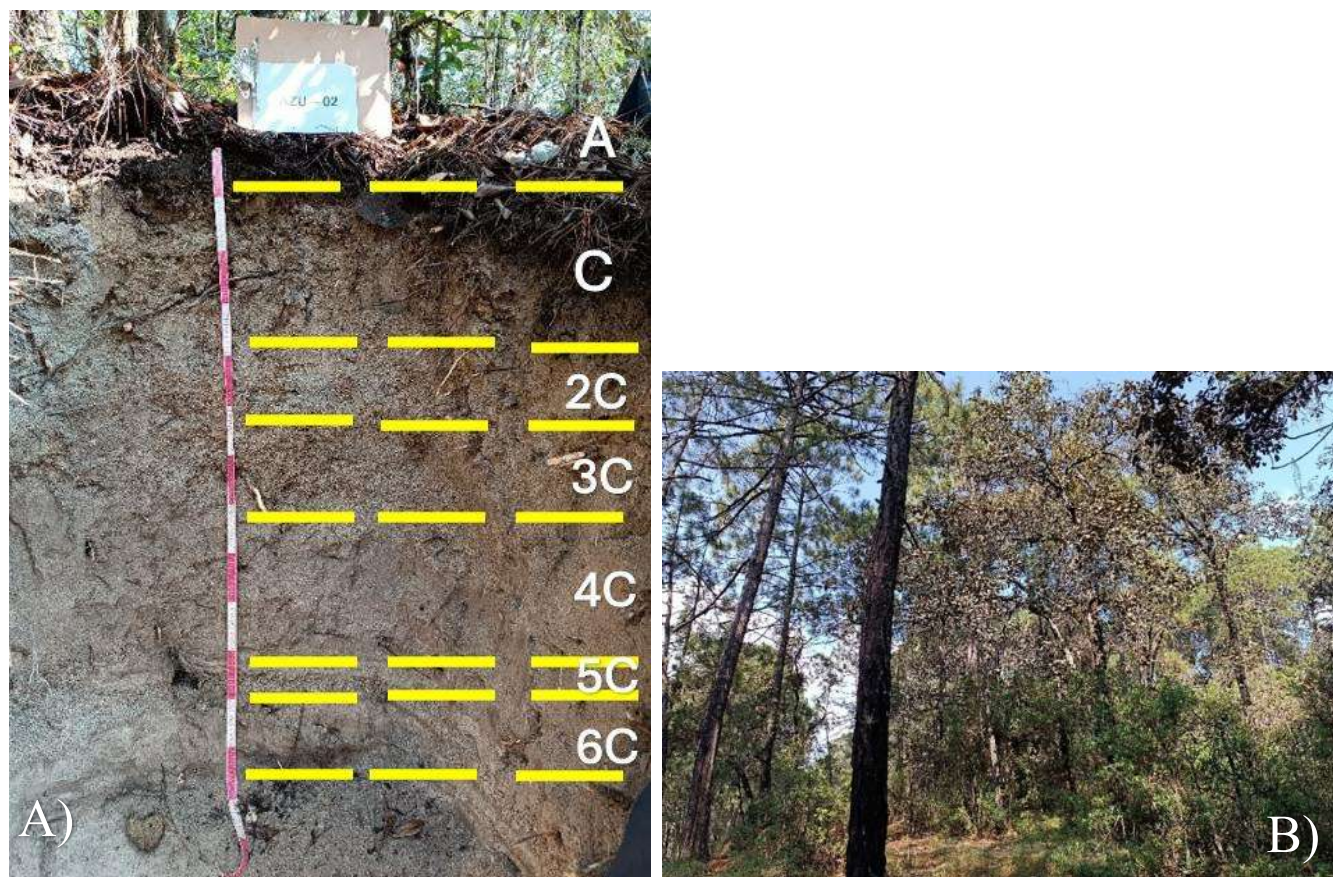


Figura 4. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-02.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2023).

8.1.3. AZU-03

El suelo de este perfil se ubica en el ejido de San Pedro Jácuaró a 2406 msnm, con uso forestal (bosque de pino-encino y madroños), con una profundidad de 90 cm (ver en Figura 4). en las coordenadas: 14Q 32493, 218416.

Perfil moderadamente profundo, húmedo con excesivo drenaje, de color gris pálido a blanco. Desarrollo de estructura débil en forma de bloques subangulares y grano simple, con agregados de tamaño fino. Todo el perfil es poroso y permeable. La distribución de raíces es alta con mayor densidad en los primeros 30 cm. Presentó una ligera reacción al NaF (alófano) a partir de su segundo horizonte. El pH es extremadamente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina a gruesa (Tabla 4).

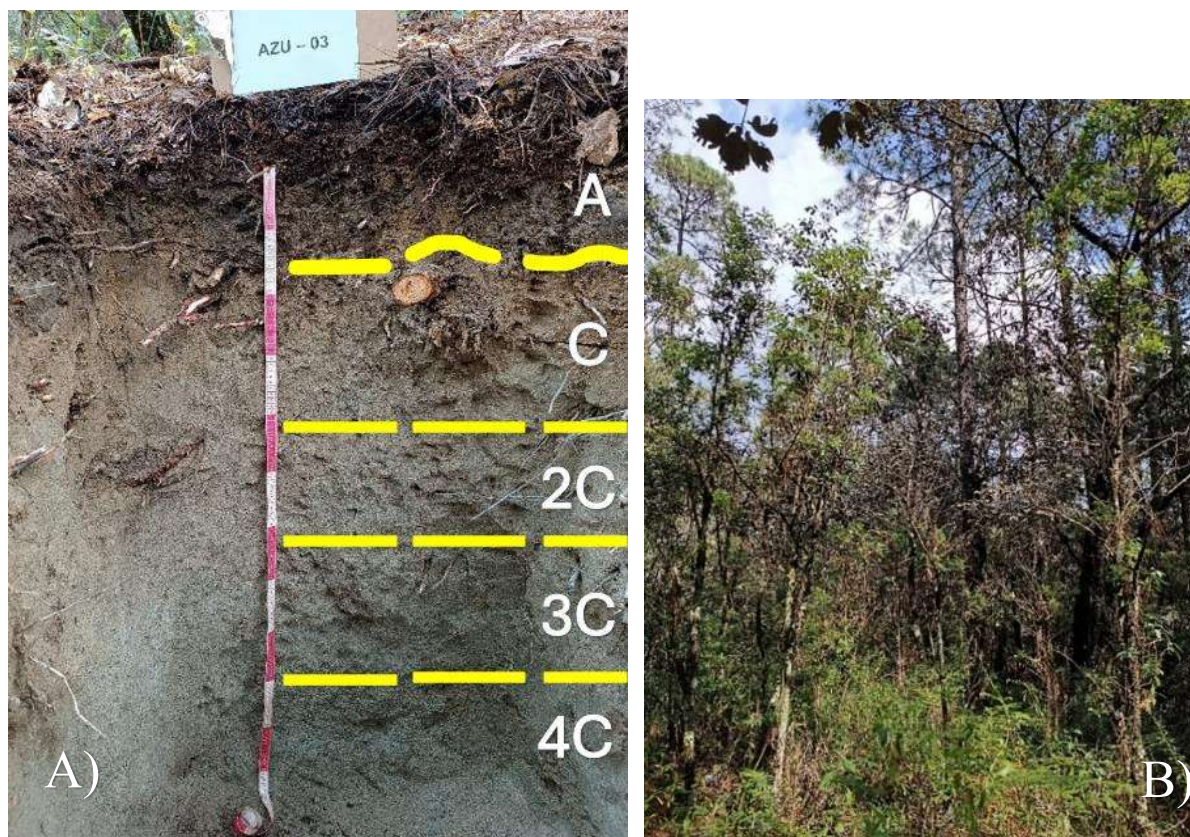


Figura 5. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-03.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2023).

8.1.4. AZU-04

El suelo de este perfil se ubica en la localidad de Rubén Pérez a 2918 msnm, bajo uso forestal de bosque cerrado oyamel (*Abies religiosa* Kunth Schltdl. et Cham.), de condición más húmeda. Con una profundidad de 78 cm (ver en Figura 5). En las coordenadas: 14Q 32746, 218973.

Perfil moderadamente profundo, húmedo, con drenaje moderado, de color negro a marrón amarillento. Presenta desarrollo de estructura fuerte en forma de migajón y bloques subangulares, con agregados de tamaño fino a grueso. Todo el perfil es poroso y permeable. El horizonte B presentó piedras muy grandes, claras en color e intemperizadas. La distribución de raíces es buena con mayor densidad a los 39 cm. Presentó una fuerte reacción al NaF (alófano). El pH es extremadamente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina a fina (Tabla 4).

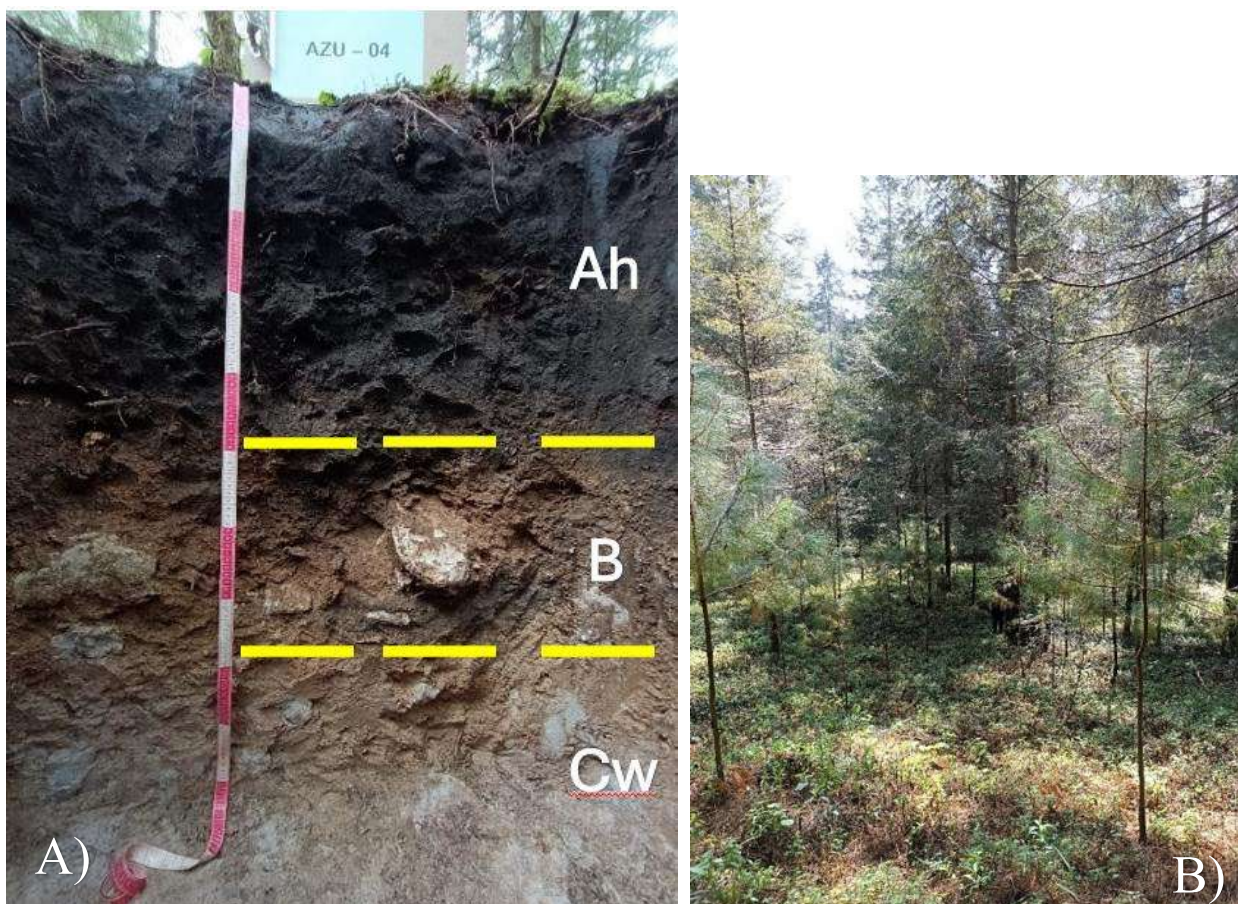


Figura 6. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-04.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2023).

8.1.5. AZU-05

El suelo de este perfil se ubica en la localidad de Rubén Pérez a 2941 msnm bajo uso forestal de bosque cerrado de oyamel (*Abies religiosa* Kunth Schltdl. et Cham.), de condición más húmeda. Con una profundidad de 66 cm (ver en Figura 6). en las coordenadas: 14Q 32735, 218973.

Perfil moderadamente profundo, húmedo, con drenaje moderado, de color negro a marrón intenso a oscuro amarillento. Presenta desarrollo de estructura fuerte en forma de bloques subangulares, con agregados de tamaño fino a grueso. Todo el perfil es poroso. El horizonte B presentó cutanes incipientes y signos de intemperismo químico. La distribución de raíces es alta con mayor densidad a los 30 cm. Presentó una fuerte reacción al NaF (alófano). El pH es fuertemente ácido en todo el perfil, con textura moderadamente fina (Tabla 4).

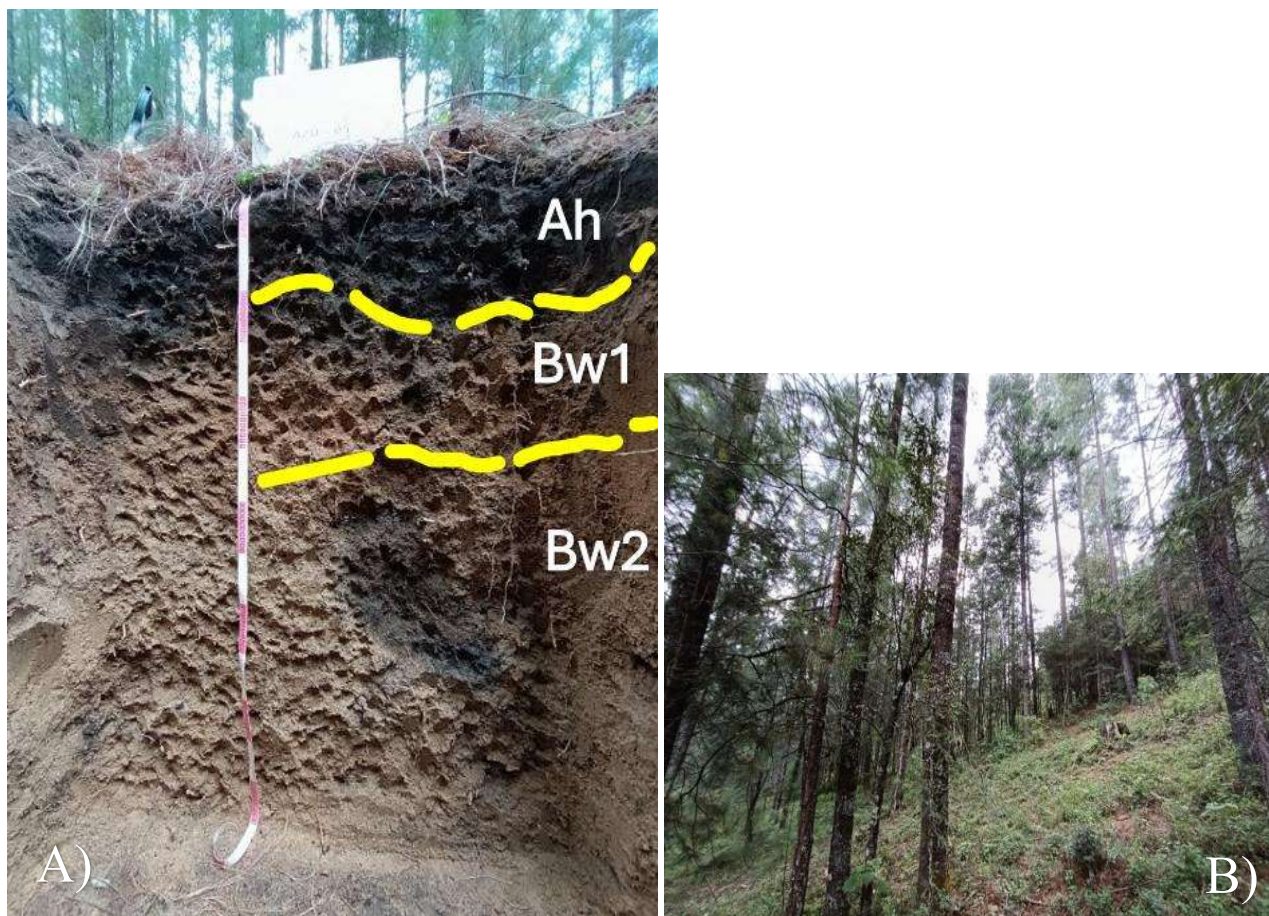


Figura 7. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-05.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2023).

8.1.6. AZU-06

Perfil ubicado en el Comal (ejido) a 2111 msnm, bajo uso agrícola (maíz de riego), con condiciones de hidromorfismo y una profundidad de 40 cm (ver en Figura 7). en las coordenadas: 14Q 32968, 217948.

Perfil poco profundo, mojado, con drenaje deficiente, de color marrón a marrón grisáceo. Presenta desarrollo de estructura débil en forma de bloques angulares, con agregados de tamaño grueso. Todo el perfil presentó signos intensos de reducción/oxidación reflejados en manchas y motas de óxidos de Fe en caras de agregados y poros. La distribución de raíces es baja con mayor densidad a los 16 cm. Presentó ligera reacción al NaF (alófano) a partir de 40 cm. El pH es extremadamente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina (ver en Tabla 4).

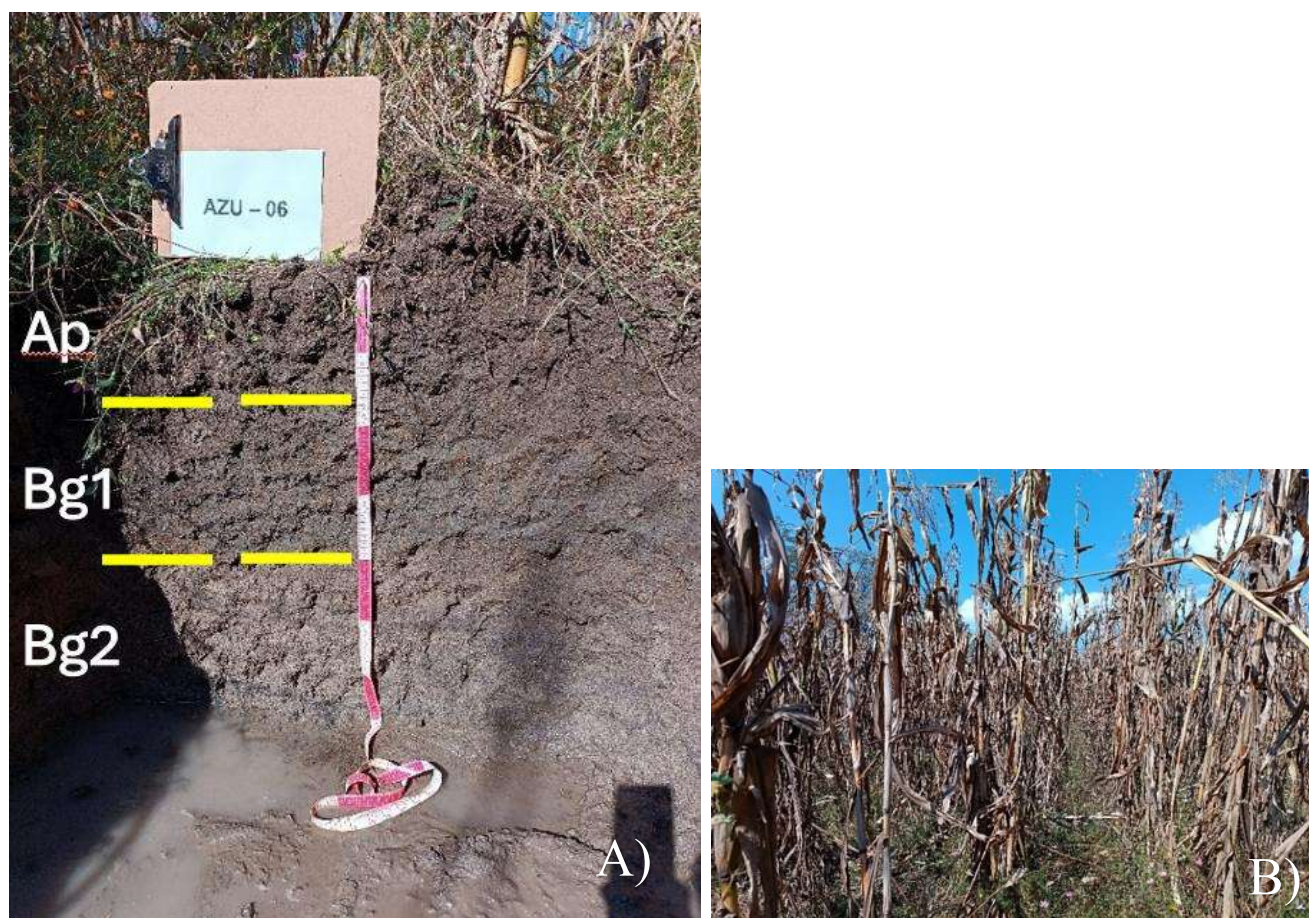


Figura 8. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-06.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2023).

8.1.7. AZU-07

Perfil ubicado en el Comal (ejido) a 2192 msnm, bajo uso agrícola (maíz temporal), con una profundidad de 85 cm (ver en Figura 8). en las coordenadas: 14Q 32688, 218056.

Perfil moderadamente profundo. Fresco, con drenaje deficiente, de color marrón oscuro a marrón amarillento. Presenta desarrollo de estructura débil en forma de bloques angulares, con agregados de tamaño medio a grueso. Todo el perfil presentó signos intensos de reducción/oxidación reflejados en manchas y motas de óxidos de Fe en caras de agregados y poros. La distribución de raíces es media, con mayor densidad a los 30 cm. Presentó ligera reacción al NaF (alófano) a partir de 85 cm. El pH es extremadamente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina (ver Tabla 4).

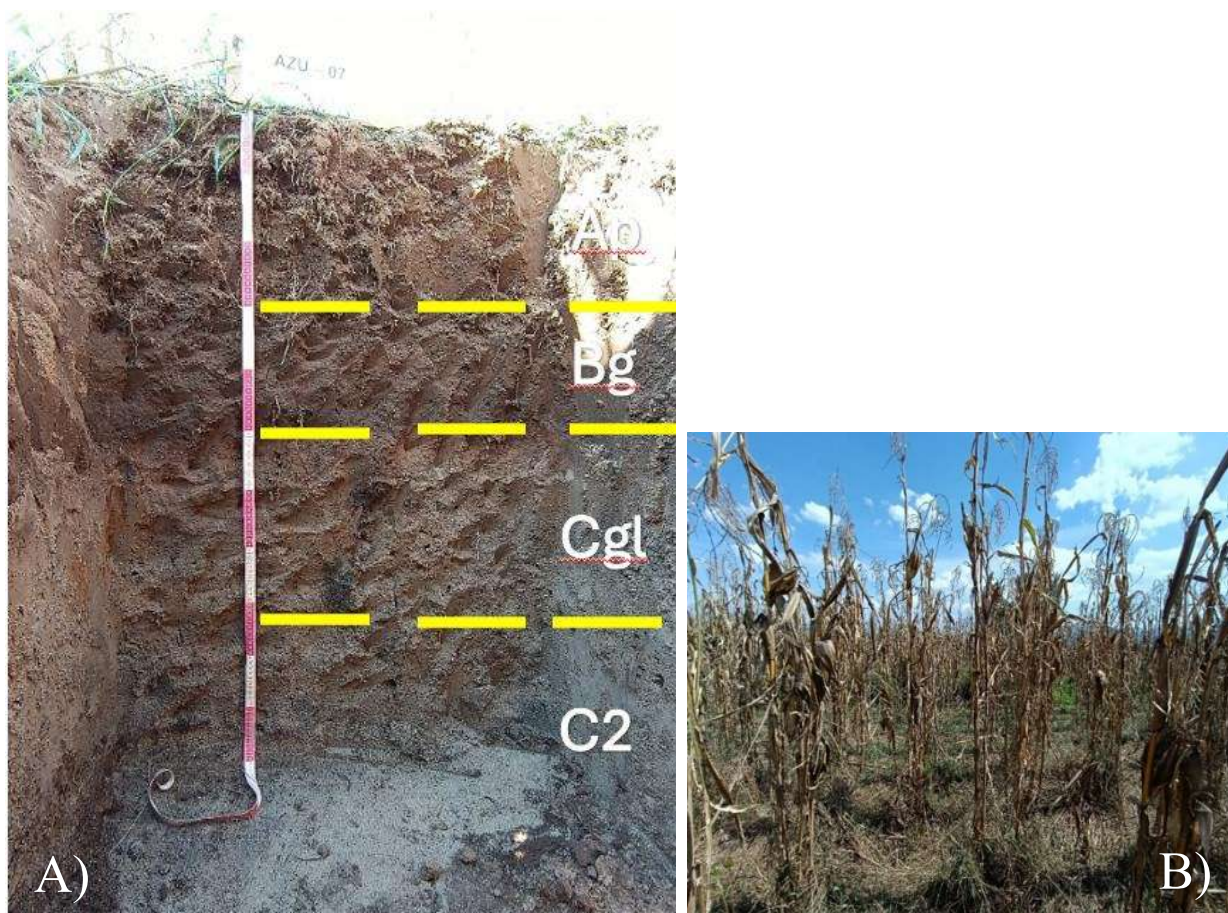


Figura 9. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-07.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2023).

8.1.8. AZU-08

El suelo de este perfil se ubica en San Pedro Jécuaro a 2187 msnm, con uso de suelo forestal (bosque abierto de pino), con una profundidad de 110 cm (ver en Figura 9). en las coordenadas: 14Q 32642, 217976.

Perfil profundo, seco, con drenaje bueno, de color marrón oscuro a marrón amarillento. Desarrollo de estructura débil en forma de bloques angulares y bloques subangulares, con agregados de tamaño medio a grueso. El horizonte 2C presentó mucha inestabilidad, el horizonte 3B presentó influencia de una madriguera y con concreciones blancas, motas/manchas naranjas y rojas. La distribución de raíces es alta con mayor densidad de 25 a 50 cm. Presentó una fuerte reacción al NaF (alófano). El pH es extremadamente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina (ver Tabla 4).



Figura 10. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-08.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2024).

8.1.9. AZU-09

El suelo de este perfil se ubica en el ejido de San Pedro Jácuaró a 2412 msnm, con uso forestal (bosque semiabierto de pino-encino), con una profundidad de 104 cm (ver en Figura 10). en las coordenadas: 14Q 33041, 218231.

Perfil profundo, seco, con drenaje excesivo, de color marrón oscuro. Desarrollo de estructura débil en forma de bloques subangulares, con agregados de tamaño medio a grueso. Presentó piedras grandes dentro del perfil, afloramientos en superficie de 5-10 %. La distribución de raíces es alta con mayor densidad de 10 a 40 cm. presentó fuerte reacción al NaF (alófano). El pH es fuertemente a extremadamente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina (ver Tabla 4).



Figura 11. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-09.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2024).

8.1.10. AZU-10

Ubicado en Rincón de Rubios a 2186 msnm, uso de suelo forestal (bosque semiabierto de pino-encino), influencia antrópica por canchas de fútbol, con una profundidad de 100 cm (ver en Figura 11). en las coordenadas: 14Q 33034, 218279.

Perfil moderadamente profundo, seco, con drenaje bueno, de color marrón oscuro a marrón amarillento. Presenta desarrollo de estructura moderado en forma de bloques subangulares, con agregados de tamaño fino a grueso. El horizonte A presentó restos de carbón orgánico de uso recreativo y materiales fecales de animal < 0.5 cm cilíndricos. La distribución de raíces es alta con mayor densidad a 20 cm. Presentó una fuerte reacción al NaF (alófano). El pH es extremadamente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina (ver Tabla 4).

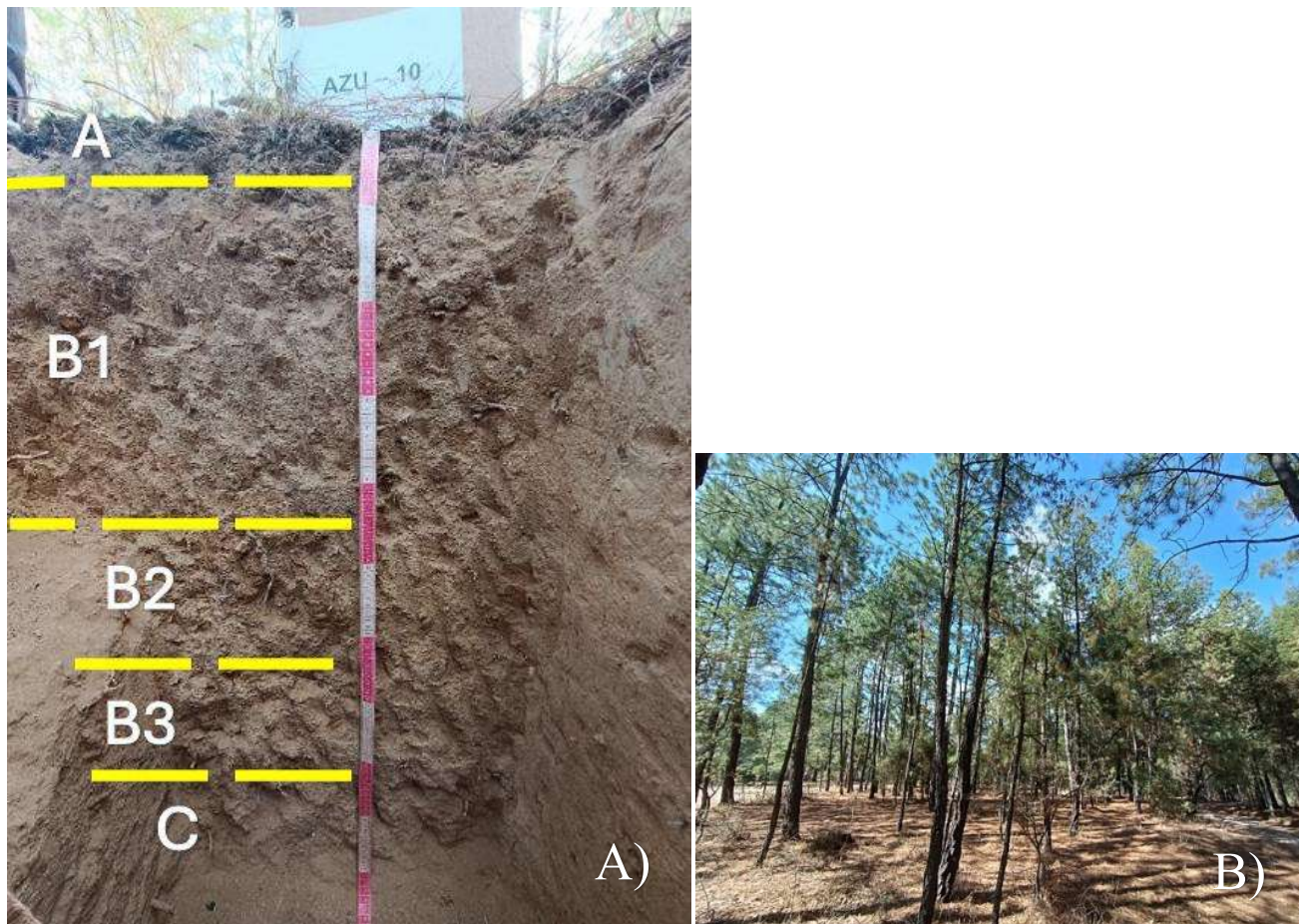


Figura 52. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-10.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2024).

8.1.11. AZU-11

El suelo del perfil está ubicado en la mesa de Guadalupe a 2542 msnm, en zona de uso agrícola que pasó a ser potrero, con una profundidad de 118 cm (ver en Figura 12). en las coordenadas: 14Q 33161, 218372.

Perfil profundo, seco/fresco con drenaje bueno, de color marrón amarillento a marrón muy oscuro. Presenta desarrollo de estructura moderado en forma de bloques subangulares, con agregados de tamaño medio a grueso. El horizonte 2C presentó arena suelta, un cambio de color, de consistencia y humedad brusca. A partir de los 63 cm presentó abundantes slickensides, concreciones de óxidos de Mn y manchas en poros y caras de agregados. La distribución de raíces es normal con mayor densidad a 24 cm. Presentó fuerte reacción al NaF (alófano). El pH es fuertemente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina a media (ver Tabla 4).

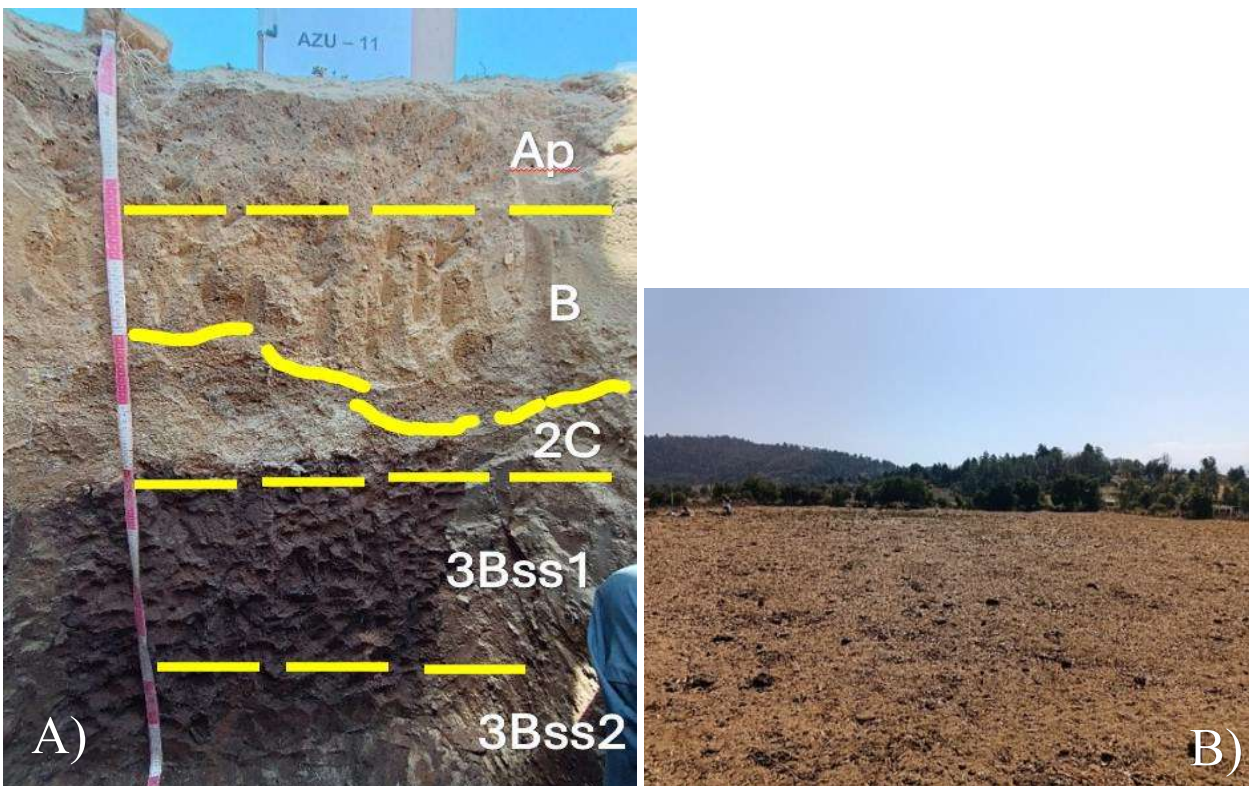


Figura 13. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-11.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2024).

8.1.12. AZU-12

Perfil ubicado en la mesa de Guadalupe a 2543 msnm, con uso de suelo forestal (bosque semiabierto de pino-encino), con una profundidad de 121 cm (ver en Figura 13). en las coordenadas: 14Q 33268, 218481.

Perfil profundo, seco/fresco con drenaje bueno, de color marrón oscuro. Desarrollo de estructura débil en forma de bloques subangulares y granos simples, con agregados de tamaño medio. Entre el horizonte B y 2C presentó mayor contenido de arena. El horizonte 3B mostró cutanes no incipientes en poros. La distribución de raíces es alta con mayor densidad de 20 a 80 cm. Presentó fuerte reacción al NaF (alófano). El pH es fuertemente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina (ver Tabla 4).

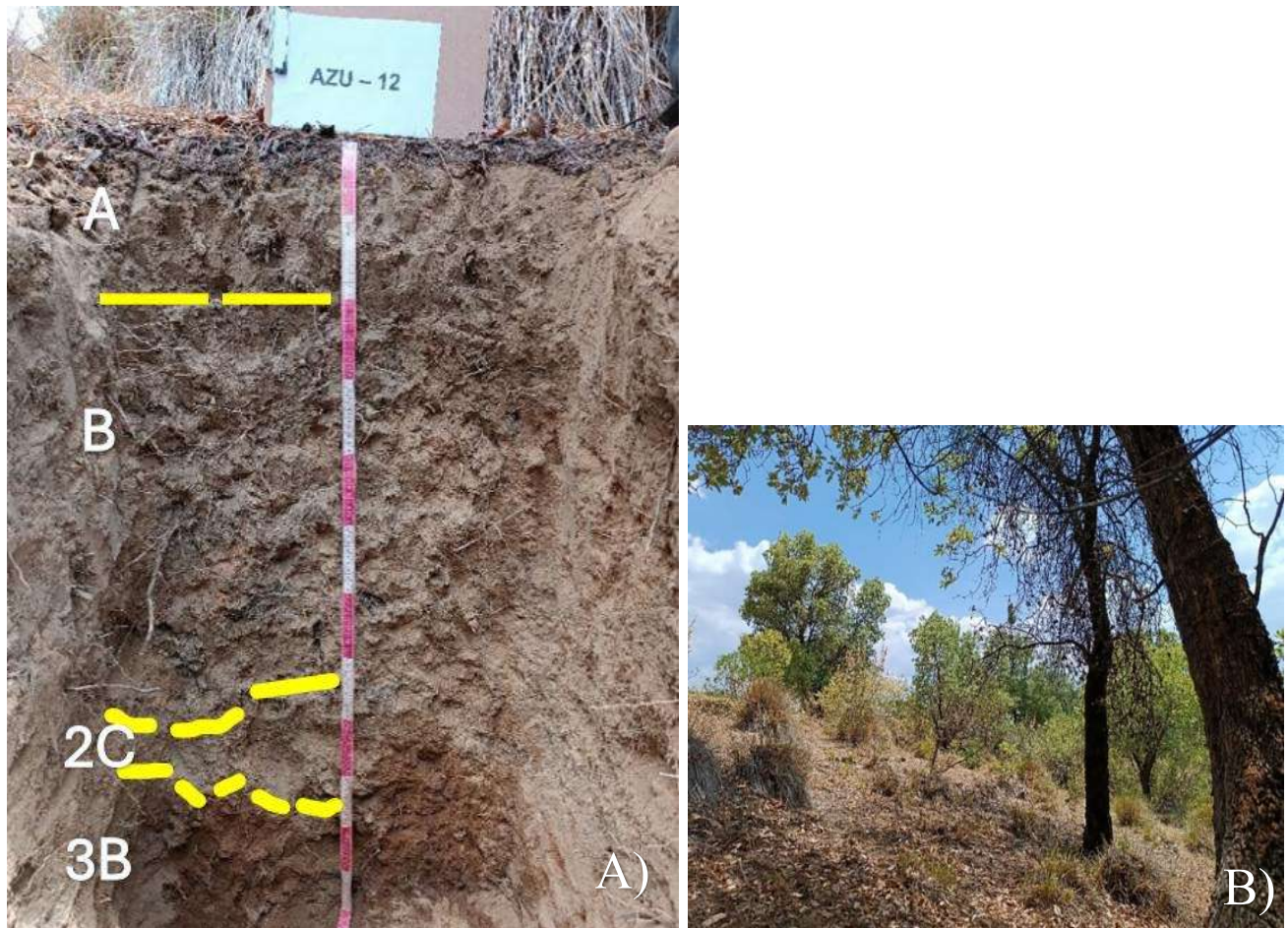


Figura 14. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-12.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2024).

8.1.13. AZU-13

Perfil ubicado en San Pedro Eréndira (baños) a 2531 msnm, con uso de suelo forestal (bosque de pino de reforestación con aproximadamente 10 años), con una profundidad de 121 cm (ver en Figura 14). en las coordenadas: 14Q 32242, 218524.

Perfil profundo, seco con drenaje bueno, de color marrón grisáceo a marrón amarillento. Presenta desarrollo de estructura moderado en forma de bloques subangulares, con agregados de tamaño medio a grueso. Se encontró una roca de tamaño 30x31 cm a mitad del perfil. La distribución de raíces es muy alta con mayor densidad a 40 cm. Presentó fuerte reacción al NaF (alófano). El pH es fuertemente a extremadamente ácido en todo el perfil, con una textura moderadamente fina (ver Tabla 4).

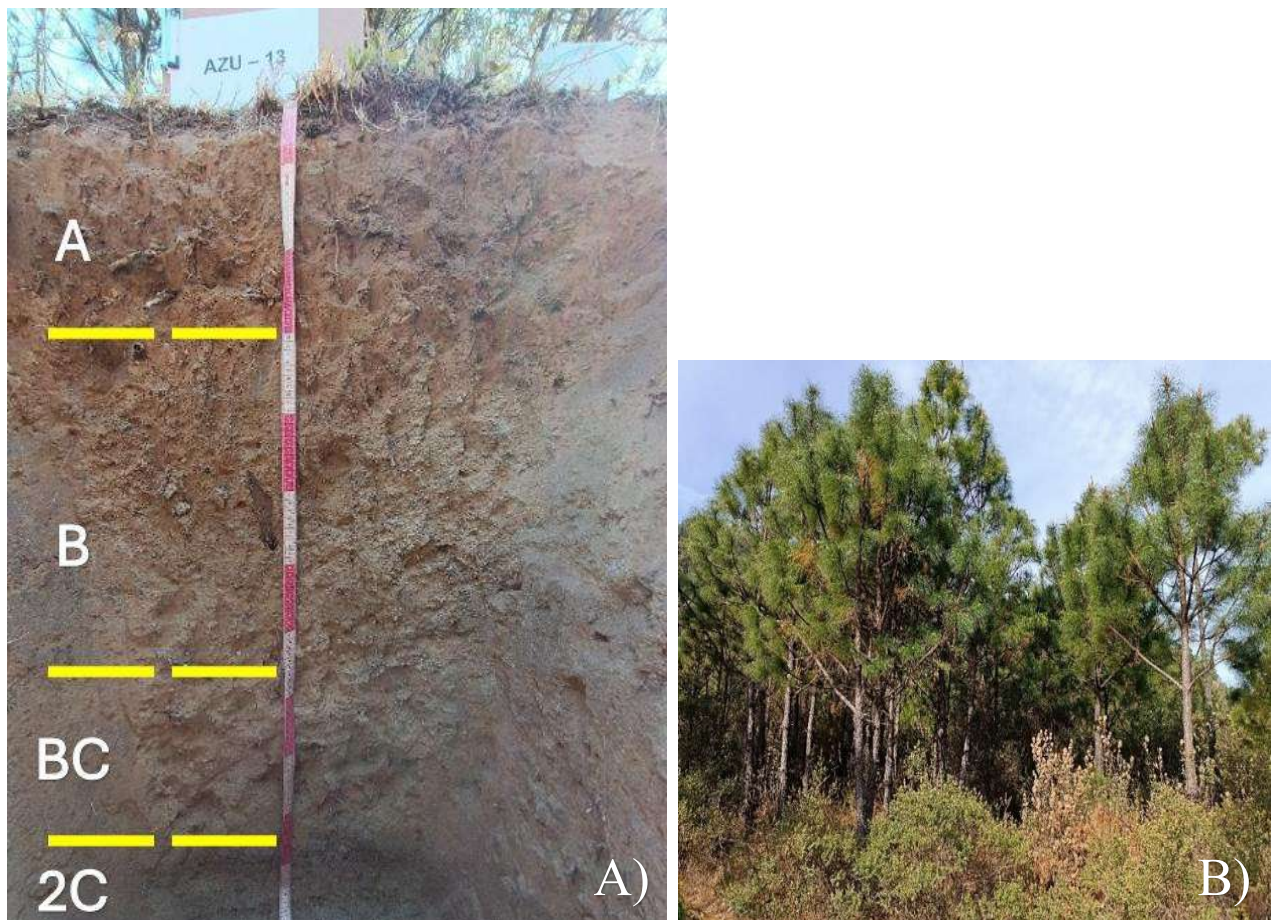


Figura 15. A) y B) Perfil de suelo y uso de suelo de AZU-13.

Fuente: Imagen por González-Arqueros (2024).

8.2. Propiedades fisicoquímicas de los suelos

Los valores de pH en KCl mostró valores de fuertemente a extremadamente ácidos y se encuentran en un rango de 3.5 a 5.8 (Tabla 4). Se observan dos perfiles con mayor acidez: AZU-03 (3.6) y AZU-07 (3.5), el primero se encuentra en zona boscosa y el segundo en zona bajo uso agrícola (cultivo de maíz temporal).

Los valores de pH H₂O oscilaron entre ligera y extremadamente ácidos, con rangos de 4 a 6.7 El perfil AZU-02 mostró ser el más ligero en acidez y AZU-07 mostró valores extremadamente ácidos.

La materia orgánica varió de 0.3 a 17 % (Tabla 4). Los perfiles con un menor contenido de materia orgánica (MO) son AZU-06 (1.6 y 0.3 %), AZU-07 (2.5 y 1.8 %), AZU-08 (1.4 y 1.2 %). Los perfiles con un mayor porcentaje de MO en superficie fueron AZU-01, AZU-04, AZU-05 y AZU-10 con rangos de 14.9 hasta 17.6 %.

Los perfiles de AZU-01 y AZU-05 presentaron muy alta capacidad de intercambio catiónico en la superficie. Mientras que los perfiles que presentaron valores más bajos fueron AZU-03, AZU-06 y AZU-13 a $\approx$ 50 cm de profundidad. El resto de los perfiles presentó CIC de baja a media-alta (Tabla 4).

Las texturas predominantes en los perfiles fueron franco-arcillo-arenosa seguida de franco arcillosa (Tabla 4).

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas de los suelos a nivel superficie 0 cm y 50 cm.

Unidad	Profundidad (cm)									Interpretación			
		pH KCl	pH H ₂ O	Materia orgánica %	CIC (cmol/kg)	% Arcilla	% Limo	% Arena	Textura	pH KCl	Materia orgánica %	CIC (cmol/kg)	Textura
AZU-01	0	4.2	4.8	16.3	42	27.08	43.48	29.44	Franco arcillosa	Extremadamente ácido	Muy alto	Muy alta	Moderadamente fina
AZU-01	50	4.4	5.4	9.7	32	22.72	54.2	23.08	Franco limosa	Extremadamente ácido	Medio	Alta	Media
AZU-02	0	5.3	5.9	4.2	15	14.52	14	71.49	Franco arenosa	Fuertemente ácido	Bajo	Baja	Gruesa
AZU-02	50	4.6	6.1	1.5	14	14.52	2	83.48	Franco arenosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Baja	Gruesa
AZU-03	0	3.6	4.6	3.7	20	22.52	18	59.49	Franco arcillo arenosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Media	Moderadamente fina
AZU-03	50	4.5	5.7	1.5	4	14.52	10	75.48	Franco arenosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Muy baja	Gruesa
AZU-04	0	4.2	4.8	14.9	29	39.08	32.29	28.63	Franco arcillosa	Extremadamente ácido	Alto	Alta	Moderadamente fina
AZU-04	50	4.2	5.1	2.4	29	46.52	16	37.48	Arcillosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Alta	Fina
AZU-05	0	5.2	5.5	17.6	47	35.08	36.6	28.63	Franco arcillosa	Fuertemente ácido	Muy alto	Muy alta	Moderadamente fina
AZU-05	50	5.3	6.2	0.7	17	32.52	20	47.48	Franco arcilla arenosa	Fuertemente ácido	Muy bajo	Media	Moderadamente fina
AZU-06	0	4.3	5.1	1.6	21	28.52	18	53.49	Franco arcilla arenosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Alta	Moderadamente fina
AZU-06	50	5.7	6.6	0.3	10	22.52	14	63.48	Franco arcilla arenosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Baja	Moderadamente fina
AZU-07	0	3.7	4.3	2.5	29	20.52	14	65.48	Franco arcilla arenosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Alta	Moderadamente fina
AZU-07	50	3.5	4	1.8	13	20.52	14	65.49	Franco arcilla arenosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Baja	Moderadamente fina
AZU-08	0	4.2	5.2	1.4	22	23.8	16	60.21	Franco arcilla arenosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Alta	Moderadamente fina
AZU-08	50	4.7	5.9	1.2	13	31.9	14	54.2	Franco arcilla arenosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Baja	Moderadamente fina
AZU-09	0	5	6	9.1	22	29.08	15.69	55.23	Franco arcilla arenosa	Fuertemente ácido	Medio	Alta	Moderadamente fina
AZU-09	50	4.1	5.5	0.6	12	35.8	28	36.2	Franco arcillosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Baja	Moderadamente fina
AZU-10	0	4.8	5.7	17.1	28	33.08	28.55	38.37	Franco arcillosa	Extremadamente ácido	Muy alto	Alta	Moderadamente fina
AZU-10	50	4.4	6.1	0.5	19	33.79	24	42.21	Franco arcillosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Media	Moderadamente fina
AZU-11	0	5	5.7	4	12	21.8	26	52.21	Franco arcilla arenosa	Fuertemente ácido	Muy bajo	Baja	Moderadamente fina
AZU-11	50	5.6	6.3	1	14	21.8	30	48.2	Franca	Fuertemente ácido	Muy bajo	Baja	Mediana
AZU-12	0	5	5.9	5	22	27.08	26.29	46.63	Franco arcilla arenosa	Fuertemente ácido	Bajo	Alta	Moderadamente fina
AZU-12	50	5	6.1	2.2	16	20.16	22	57.84	Franco arcilla arenosa	Fuertemente ácido	Muy bajo	Media	Moderadamente fina
AZU-13	0	5.8	6.7	4.2	22	20.16	22	57.84	Franco arcilla arenosa	Fuertemente ácido	Bajo	Alta	Moderadamente fina
AZU-13	50	4.7	5.7	1.7	10	20.16	22	57.84	Franco arcilla arenosa	Extremadamente ácido	Muy bajo	Baja	Moderadamente fina

Nota: *Interpretación tomada del manual de Siebe y de la NOM-021-SEMARNAT-2000.

8.3. Análisis de metales pesados

En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos por Fluorescencia de Rayos X (laboratorio UNAM, CDMX) de elementos mayores de los sitios AZU a nivel superficie y a >50 cm de profundidad.

Tabla 5. Resultados de elementos mayores y traza en los horizontes de suelo

Componente Unidades	SiO ₂ ppm	TiO ₂ ppm	Al ₂ O ₃ ppm	Fe ₂ O ₃ T ppm	MnO ppm	MgO ppm	CaO ppm	Na ₂ O ppm	K ₂ O ppm	P ₂ O ₅ ppm
AZU-01 0CM	254773	2326	77141	15695	170	2111	4788	13049	18421	764
AZU-01 50CM	275755	2608	16.654	13771	186	2491	5110	12619	16985	908
AZU-02 0CM	307498	1876	19030	16793	527	2648	9470	22716	31405	166
AZU-02 50CM	325838	2092	76200	17863	364	2944	8805	23784	33571	100
AZU-03 0CM	299948	2596	86429	19646	349	2666	8398	20216	25569	170
AZU-03 50CM	322510	2020	79724	16918	325	2093	8512	24059	32293	170
AZU-04 0CM	262034	1912	82677	16988	643	1900	3431	11714	17184	620
AZU-04 50CM	272955	2488	103559	22793	635	1737	2895	11477	17798	454
AZU-05 0CM	239327	1882	91440	17142	867	1816	7254	9948	14669	554
AZU-05 50CM	286325	2296	113630	20975	194	1562	3323	12552	19168	175
AZU-06 0CM	360017	1487	56577	10694	217	1206	4939	17078	24406	266
AZU-06 50CM	346235	1337	71627	12358	139	1556	4617	18955	27163	109
AZU-07 0CM	353556	1307	61684	10071	147	1297	4160	17627	26930	493
AZU-07 50CM	357301	1325	64547	9785	108	1387	4474	18873	28599	153
AZU-08 0CM	337334	1625	73511	15289	310	2087	4817	17827	26457	196
AZU-08 50CM	329480	1577	81142	16128	201	1598	4081	17233	25660	153
AZU-09 0CM	299845	2356	71241	20164	426	2184	6954	15045	20828	297
AZU-09 50CM	262857	4011	117064	46538	263	1755	3774	10475	13299	148
AZU-10 0CM	278808	1960	68103	15198	651	2546	7619	13747	19807	484
AZU-10 50CM	316226	2122	87498	19366	310	2099	4560	15171	22406	271
AZU-11 0CM	316282	1984	71511	17534	503	2853	6046	14147	22505	886
AZU-11 50CM	330780	1439	74787	13792	310	1405	4881	16343	25220	589
AZU-12 0CM	320032	1846	70728	16359	604	2328	6139	14466	21459	454
AZU-12 50CM	321448	1703	76538	16569	263	2123	5732	16032	23676	319
AZU-13 0CM	304773	2380	82910	20283	318	3432	5918	16885	24257	340
AZU-13 50CM	313290	1990	84598	19625	240	2666	5096	18138	25643	231

Fuente: elaboración propia en base a los resultados del laboratorio Fluorescencia de Rayos X. LANGEM UNAM, CDMX, 2024.

En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos por Fluorescencia de Rayos X (laboratorio UNAM, CDMX) de elementos de los sitios AZU a nivel superficie y a >50 cm de profundidad.

Tabla 6. Resultados de elementos mayores y traza en los horizontes de suelo.

Componente Unidades	Sr ppm	Rb ppm	As ppm	Hg ppm	Pb ppm	Zn ppm	Fe ppm	Mn ppm	Ti ppm	K ppm	S ppm	Ba ppm
AZU-01 0CM	59.47	71.26	44.94	<LD	<LD	60.94	15846	94.9	3412	14381	1193	<LD
AZU-01 50CM	65.68	60.08	<LD	<LD	<LD	63.57	11480	107.7	3937	11848	407.9	<LD
AZU-02 0CM	108.5	127.8	<LD	<LD	<LD	47.28	12726	464.6	2188	25990	<LD	42.07
AZU-02 50CM	117.5	138.2	<LD	<LD	<LD	31.6	12057	281.3	1864	31433	<LD	233.7
AZU-03 0CM	125.2	184.6	<LD	<LD	<LD	37.72	16943	282.6	3047	20168	<LD	107.5
AZU-03 50CM	109.6	191.9	<LD	<LD	<LD	33.35	13601	300.9	2555	27701	<LD	324.4
AZU-04 0CM	33.55	64.31	<LD	<LD	<LD	44.92	17482	687.2	3020	11504	<LD	<LD
AZU-04 50CM	29.19	65.6	<LD	<LD	<LD	47.32	20757	604.7	3464	13715	<LD	<LD
AZU-05 0CM	71.99	52.28	<LD	<LD	<LD	69.96	14885	841.2	2288	10725	<LD	<LD
AZU-05 50CM	38.33	61.08	<LD	<LD	<LD	40.14	17850	178.4	2809	13309	<LD	<LD
AZU-06 0CM	65.19	81.88	<LD	<LD	<LD	15.5	9516	232.4	2176	15808	<LD	<LD
AZU-06 50CM	52.55	130.3	<LD	<LD	<LD	19.92	10757	117.6	2217	20271	<LD	53.8
AZU-07 0CM	49.81	91.37	<LD	<LD	<LD	20.08	9155	119.6	2223	20268	<LD	<LD
AZU-07 50CM	51.05	93.84	<LD	<LD	<LD	18.69	8700	79.19	2237	21137	<LD	73.43
AZU-08 0CM	56.32	91.43	<LD	<LD	<LD	26.24	13536	327.4	2748	18412	<LD	<LD
AZU-08 50CM	68.51	104.6	<LD	<LD	<LD	22.71	15408	184	2577	18124	<LD	273.8
AZU-09 0CM	89.32	71.06	<LD	<LD	<LD	38.73	21332	544.5	4044	14105	<LD	135.2
AZU-09 50CM	63.81	44.1	5.14	<LD	<LD	41.93	49737	269.1	5814	8924	<LD	<LD
AZU-10 0CM	89.6	76.64	<LD	<LD	<LD	66.62	18211	964.1	3226	12583	<LD	79.49
AZU-10 50CM	78.01	81.23	<LD	<LD	<LD	35.83	18425	331.9	3343	14880	<LD	259.5
AZU-11 0CM	67.46	56.55	<LD	<LD	<LD	36.91	17387	604.3	3604	13960	<LD	<LD
AZU-11 50CM	106.6	67.27	<LD	<LD	<LD	28.35	14694	376.9	2938	16310	<LD	59.95
AZU-12 0CM	70.5	62.11	<LD	<LD	<LD	33.37	16766	821.1	3629	10502	<LD	<LD
AZU-12 50CM	76.25	75.56	<LD	<LD	<LD	32.32	16946	348.5	3307	13663	<LD	67.98
AZU-13 0CM	61.44	78.86	<LD	<LD	<LD	27.88	19755	339.1	3833	15911	<LD	<LD
AZU-13 50CM	53.36	86.79	<LD	<LD	<LD	27.2	19267	215.4	3398	19336	<LD	117.4

Nota (* <LD = concentración abajo del límite de detección de la técnica empleada). Fuente: elaboración propia en base a los resultados del laboratorio Fluorescencia de Rayos X. LANGEM UNAM, CDMX, 2024.

En la figura 16 se presenta la gráfica con los valores de las concentraciones de los elementos mayores en diagrama de dispersión, obtenidos a nivel de superficie para los 13 perfiles de suelo (AZU), cada elemento está representado por un color para comparar de manera visual entre ellos.

Las concentraciones de los elementos mayores presentes en las muestras de suelos son variables, reflejando diferencias en su composición geoquímica, se observó que el elemento con concentraciones más elevadas fue el Si, seguido por Al, K, Na y Fe superando valores de 10,000 mg/kg. El Si, Al y Fe tuvieron un comportamiento relativamente estable entre perfiles, indicando que forman parte de la fracción mineral dominante en los suelos.

Elementos como Ca, Mg, Na y K mostraron variabilidad entre los perfiles, lo que podría indicar procesos como lixiviación o diferencias en el material parental. Por otro lado, el Ti, Mn y P mostraron menores concentraciones y a su vez presentaron variaciones más marcadas entre los perfiles, lo que podría sugerir procesos de acumulación o de transporte de material.

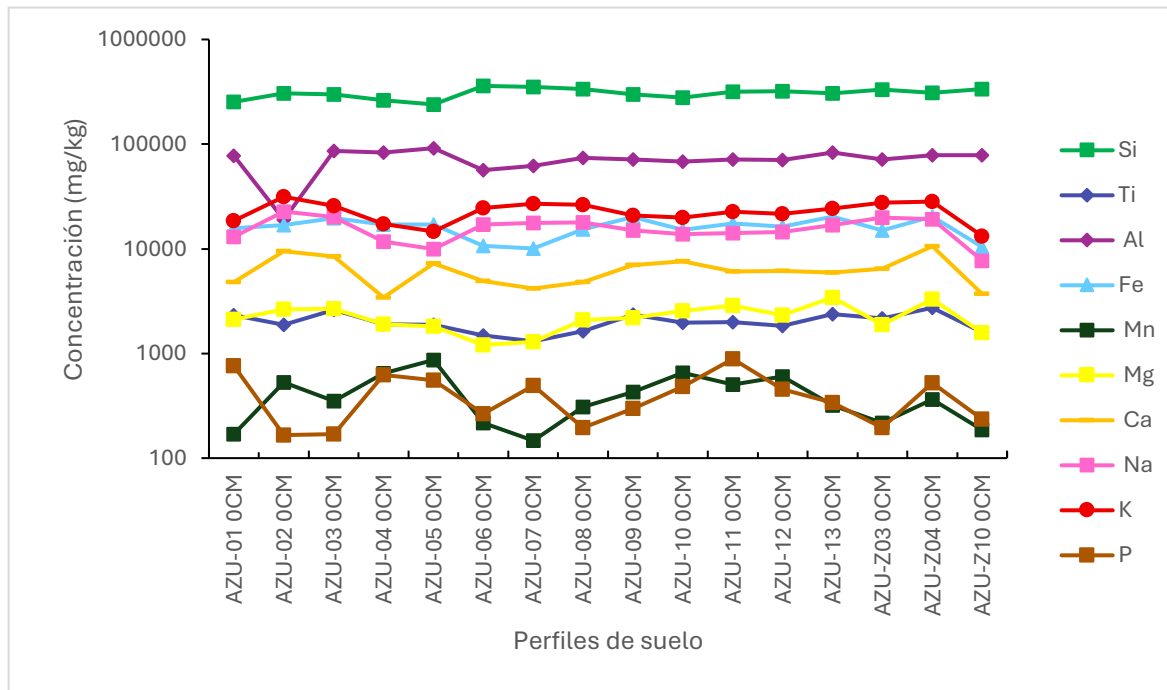


Figura 16. Concentraciones totales de elementos mayoritarios en los perfiles de suelo en superficie 0 cm. Fuente: elaboración propia.

En la figura 17 se presenta la gráfica con los valores de las concentraciones de los elementos mayores en diagrama de dispersión, obtenidos a 50 cm de profundidad para los 13 perfiles de suelo (AZU), cada elemento está representado por un color para comparar de manera visual entre ellos.

Las concentraciones de los elementos mayores presentes en las muestras de suelos son relativamente estables entre los perfiles, se observó que el elemento con concentraciones más elevadas fue el Si nuevamente, seguido por Al, K, Fe y Na superando valores de 15,000 mg/kg. El Si, Al y Fe tuvieron las concentraciones más elevadas.

Elementos como Ca, Mg, Na y K mostraron variabilidad entre los perfiles, lo que podría indicar procesos como lixiviación o diferencias en el material parental, el Ca y Mg tuvieron mayor variabilidad lo que podría indicar influencia de aportes externos. Por otro lado, el Ti, Mn y P mostraron las concentraciones bajas y a su vez presentaron variaciones más marcadas entre los perfiles, lo que podría sugerir procesos de acumulación o de transporte de material. El P en particular mostró valores bajos y dispersos.

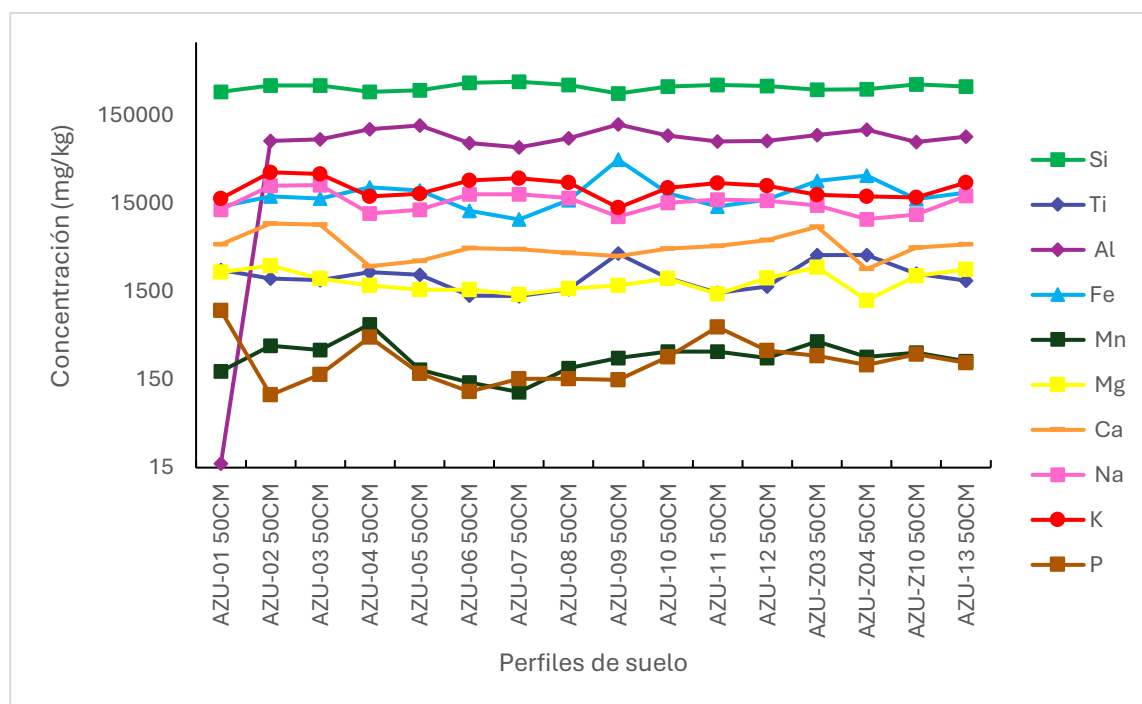


Figura 17. Concentraciones totales de elementos mayores en los horizontes a 50 cm de profundidad. Fuente: elaboración propia.

En la figura 18 se presenta la gráfica con los valores de las concentraciones de elementos mayores y traza en diagrama de dispersión, obtenidos a nivel de superficie para los 13 perfiles de suelo (AZU), cada elemento está representado por un color diferente para comparar de manera visual entre ellos.

Las concentraciones de los elementos mayores Fe, K y Ti presentaron las concentraciones más altas superando valores de 500 mg/kg, con un comportamiento constante entre los perfiles, es importante mencionar que el Fe destaca por ser más estable y dominante.

Por otro lado, elementos como Sr, Ba, S y Zn mostraron variaciones marcadas entre los perfiles, lo que podría estar nuevamente asociado a procesos de lixiviación o contaminación puntual, el Zn y S tienden a oscilar, lo que podría sugerir influencia de factores antrópicos.

En los elementos traza As, Rb y Mn exhibieron variabilidad significativa entre cada perfil, lo que podría deberse a procesos locales o influencia antrópica. Es de importancia mencionar que elementos como el Pb, Hg y As son relevantes desde el punto de vista ambiental, puesto que, incluso en bajas concentraciones pueden representar contaminación antrópica.

Para el caso de los elementos de Hg, S y Ba no se encontraron presentes para todos los perfiles debido a que los valores no alcanzaron el límite de detección para la técnica determinada.

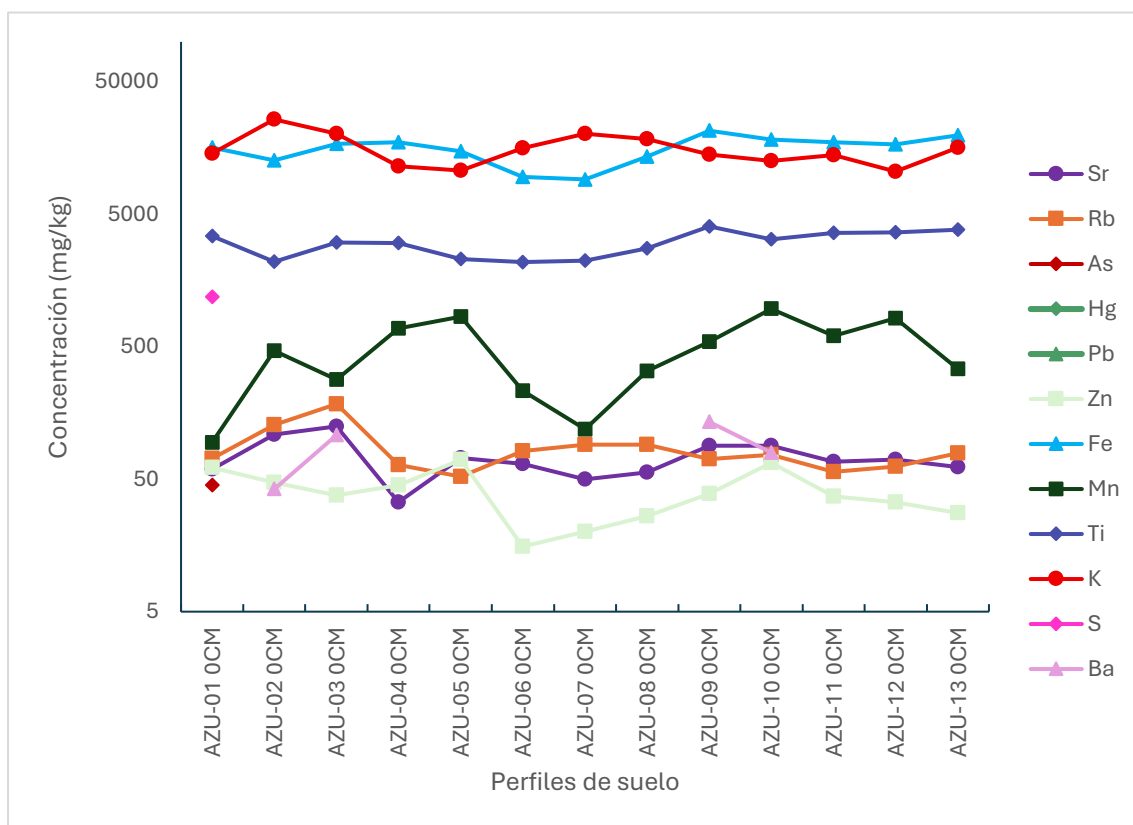


Figura 18. Concentraciones totales de elementos en los horizontes a nivel de superficie 0 cm. Fuente: elaboración propia.

Por último, la figura 19 presenta la gráfica con los valores de las concentraciones de elementos mayores y traza en diagrama de dispersión, obtenidos a 50 cm de profundidad para los 13 perfiles de suelo (AZU), cada elemento está representado por un color para comparar de manera visual entre ellos.

Las concentraciones de los elementos mayores Fe, K y Ti fueron las más altas superando valores de 3000 mg/kg, con un comportamiento estable y destacando al Fe como el más constante y dominante nuevamente a esta profundidad.

En el caso de Sr, Ba, Zn y Mn mostraron variabilidad entre los perfiles, que podría verse influenciado debió a los procesos de movilidad o diferencias en el material parental. El Zn y Mn suelen oscilar, lo que sugiere condiciones redox a esta profundidad o actividades biológicas.

Por otro lado, los elementos traza de As y Rb mostraron variabilidad significativa entre los perfiles lo que podría sugerir movilidad o influencia antrópica. El As presentó concentraciones irregulares, lo que podría indicar aportes externos y/o condiciones específicas de retención en el suelo.

Nuevamente en el caso de los elementos de As, S, Ba, Hg y Pb no se encontraron presentes para todos los perfiles debido a que los valores no alcanzaron el límite de detección para la técnica determinada.

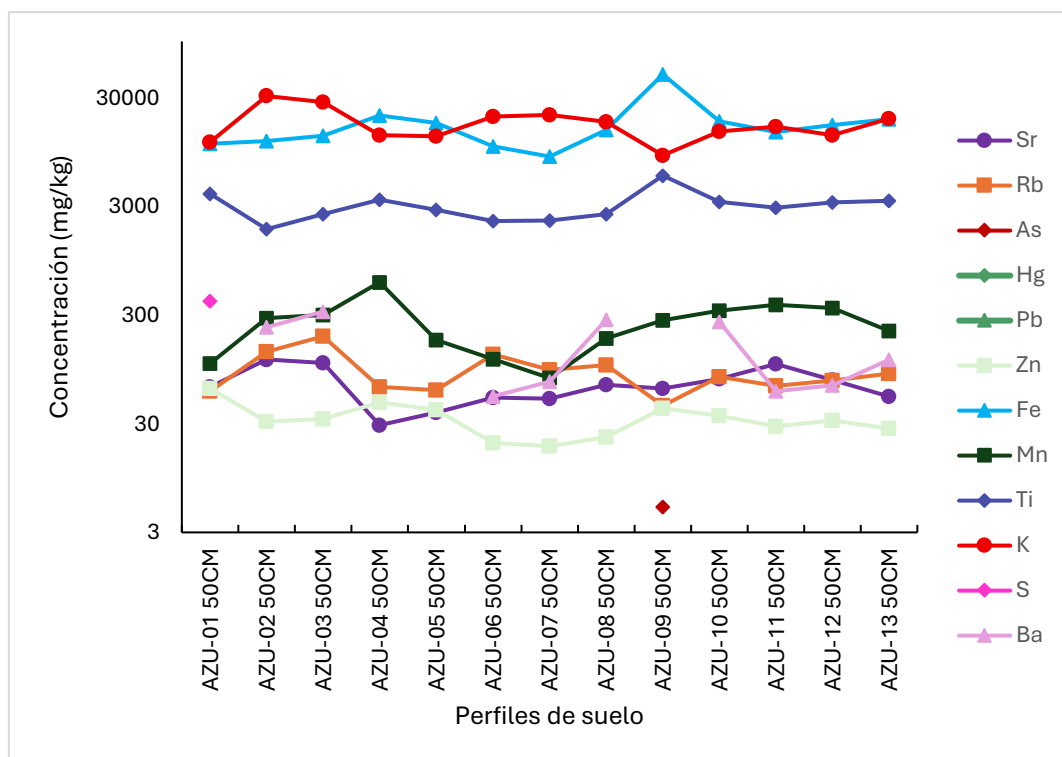


Figura 19. Concentraciones totales de elementos mayores y traza en los horizontes a 50 cm de profundidad. Fuente: elaboración propia.

8.4. Índices de contaminación

8.4.1. Índice de geoacumulación (Igeo)

Los resultados del índice Igeo de los elementos mayores evidenciaron que ninguno de los elementos presentes en las muestras supera el valor 0, correspondiente a no contaminado. Sin embargo, la diferencia con los metales pesados evidencia que el enriquecimiento en las concentraciones este posiblemente asociada con aportes externos del material de origen del suelo.

Los sitios que presentaron valores más altos de estos elementos fueron; AZU-07 y AZU-10 con valores altos para Al a 50 cm de profundidad (ver Figura 20). AZU-09 con valores altos de Fe a 50 cm de profundidad, AZU-02 y AZU-03 con valores de K en todo el perfil y AZU-01 y AZU-11 con valores altos de P tanto en superficie como a 50 cm de profundidad. En general el elemento que presentó valores mayores de Igeo es el P (-0.9: $I_{geo} \leq 0$: No contaminado), aunque no llega a ser peligroso para la zona (Peligro, $1 \leq I_{geo} \leq 2$: Moderado).

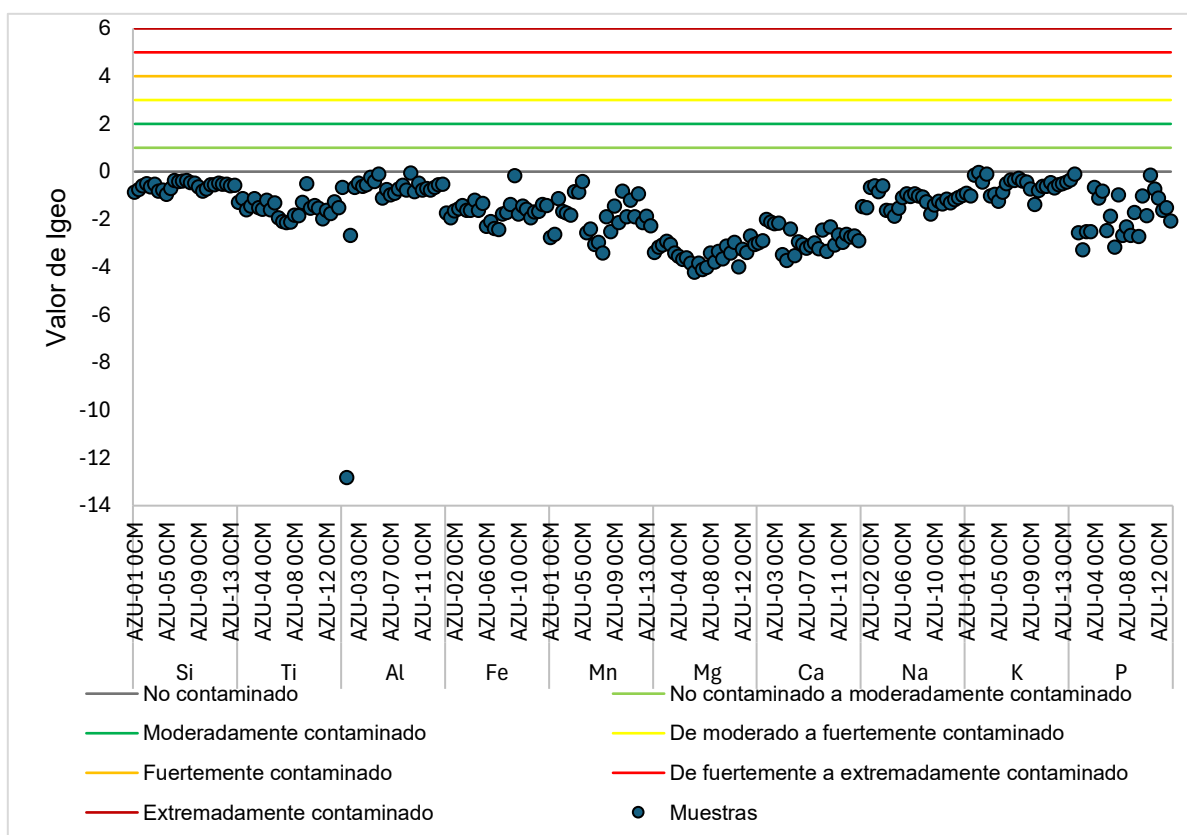


Figura 20. Índice de geoacumulación (Igeo) en elementos mayores. Fuente: elaboración propia en base a Santiago-Seoane (2021).

Los resultados del índice Igeo que se presentan en las Figuras 21 y 22 mostraron que el Rb, S y Ba oscilan entre -1.5 a 3.7 llegando hasta el valor Igeo ≤ 3 : Moderado a fuertemente contaminado.

El elemento que presenta mayores valores de Igeo es el As encontrado en el sitio AZU-01 a nivel superficial (2.6: Igeo ≤ 2 : Moderado a fuerte contaminado) (ver Figura 21) llegando a ser perjudicial y peligroso para la zona. Asimismo, el elemento Rb presentó valores Igeo arriba de 0 (0.1, 0.5 y 0.6: ≤ 0 Igeo ≤ 1 : de no contaminado a Moderado) para los sitios AZU-02, AZU-03 (tanto en superficie como en profundidad) y AZU-06, solo a 50 cm de profundidad.

El comportamiento tanto de As como de Rb representan un riesgo potencial para la salud y el ambiente y qué, además su variabilidad entre los perfiles podría estar vinculado con actividades antrópicas específicas en la zona.

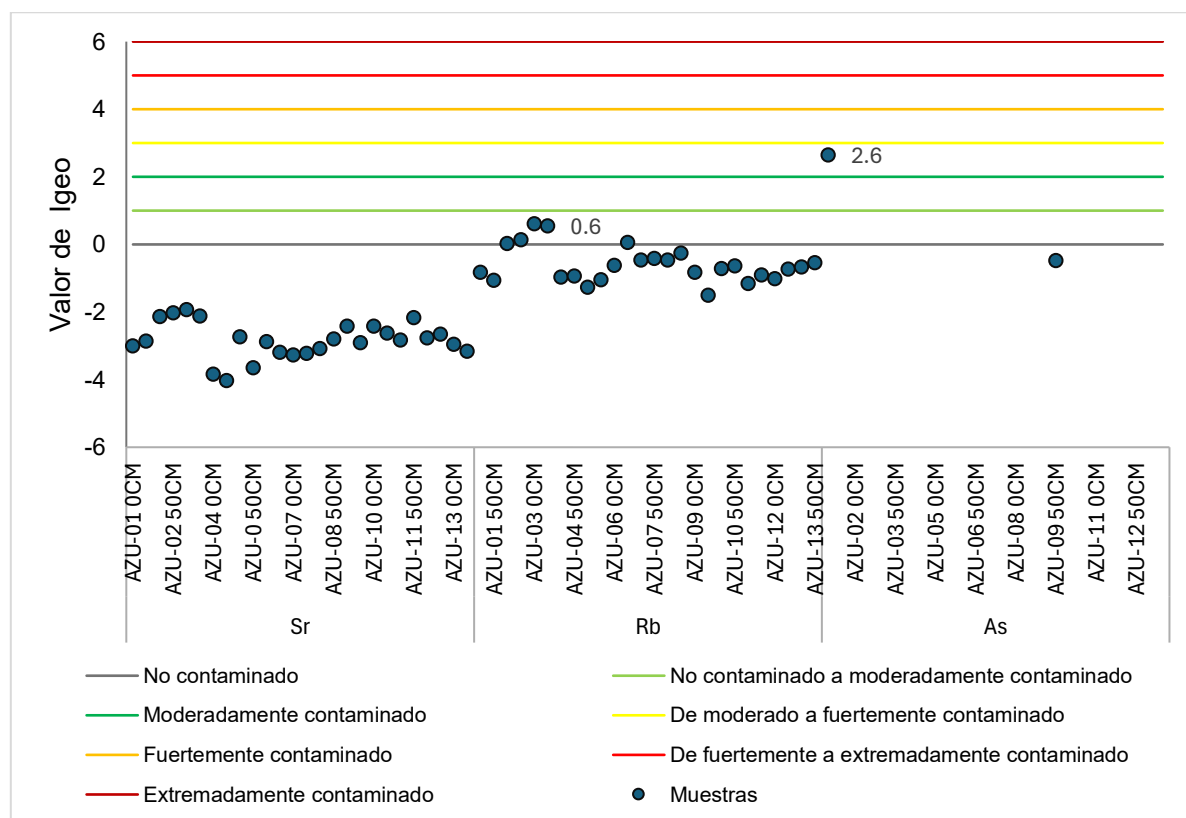


Figura 21. Índice de geoacumulación (Igeo) en elementos traza Sr, Rb y As.

Fuente: elaboración propia en base a Santiago-Seoane (2021).

En la figura 23 el elemento con mayor valor de Igeo es el S con un valor de 3.7 Igeo ≤ 3 : Fuertemente contaminado y 2.1: Igeo $2 \leq$: Moderado a fuerte, ambos medidos para el perfil AZU-01 (en superficie y profundidad, respectivamente), llegando a ser perjudicial y peligroso para la zona. Los elementos Ti y K presentaron valores Igeo igual o cercanos a ≤ 0 (0.0 y -0.1: ≤ 0 Igeo: no contaminado), en los sitios AZU-09 (en profundidad) y AZU-02 (en profundidad), respectivamente.

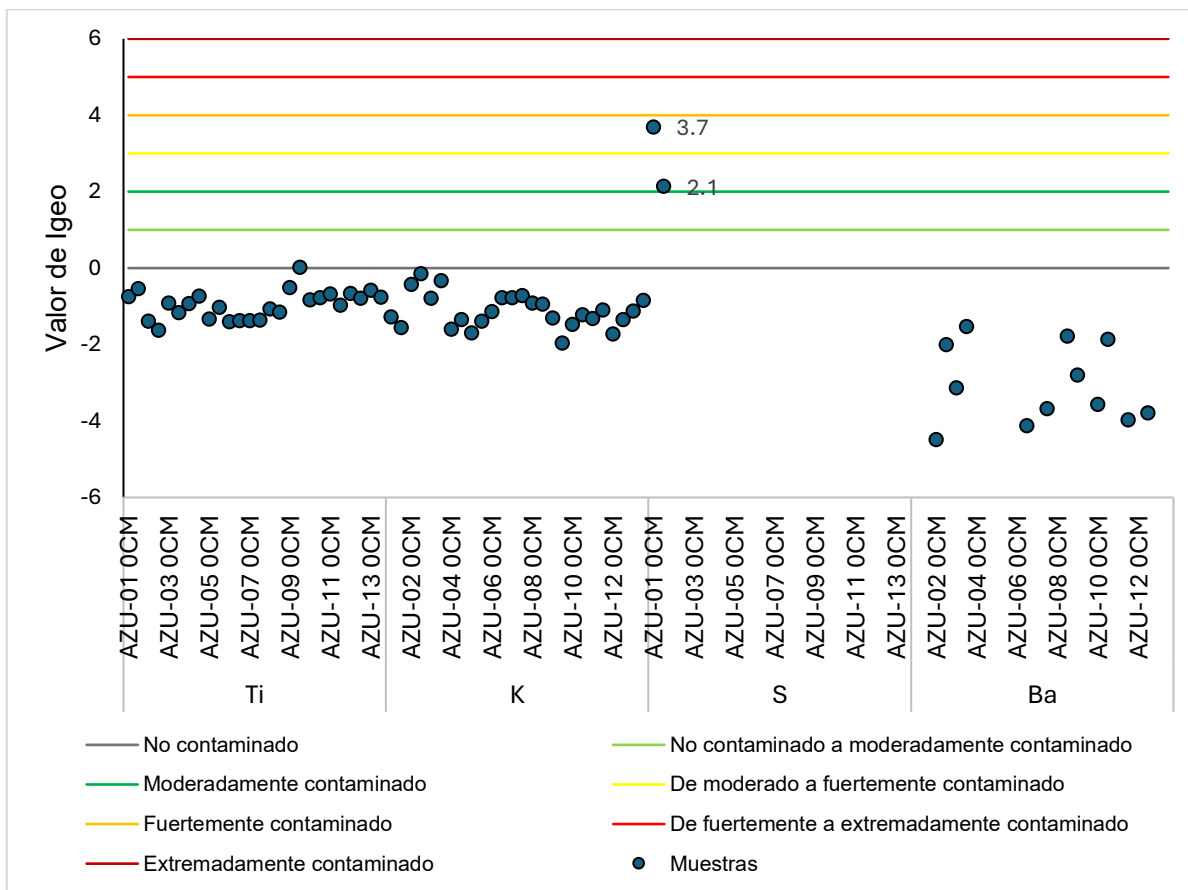


Figura 22. índice de geoacumulación (Igeo) en elementos traza Ti, K, S y Ba.

Fuente: elaboración propia en base a Santiago-Seoane (2021).

Los valores de los elementos Zn, Fe y Mn (ver Figura 23) no presentaron un valor Igeo mayor que ≤ 0 : No contaminado, sin embargo, el Mn (-0.9), en los sitios AZU-05, AZU-10 y AZU-12 en la superficie, Zn (-0.7), en los sitios AZU-05 y AZU-10 en la superficie y Fe (-0.1) para AZU-09 a 50 cm de profundidad son cercanos para sobrepasar de no contaminado a moderado.

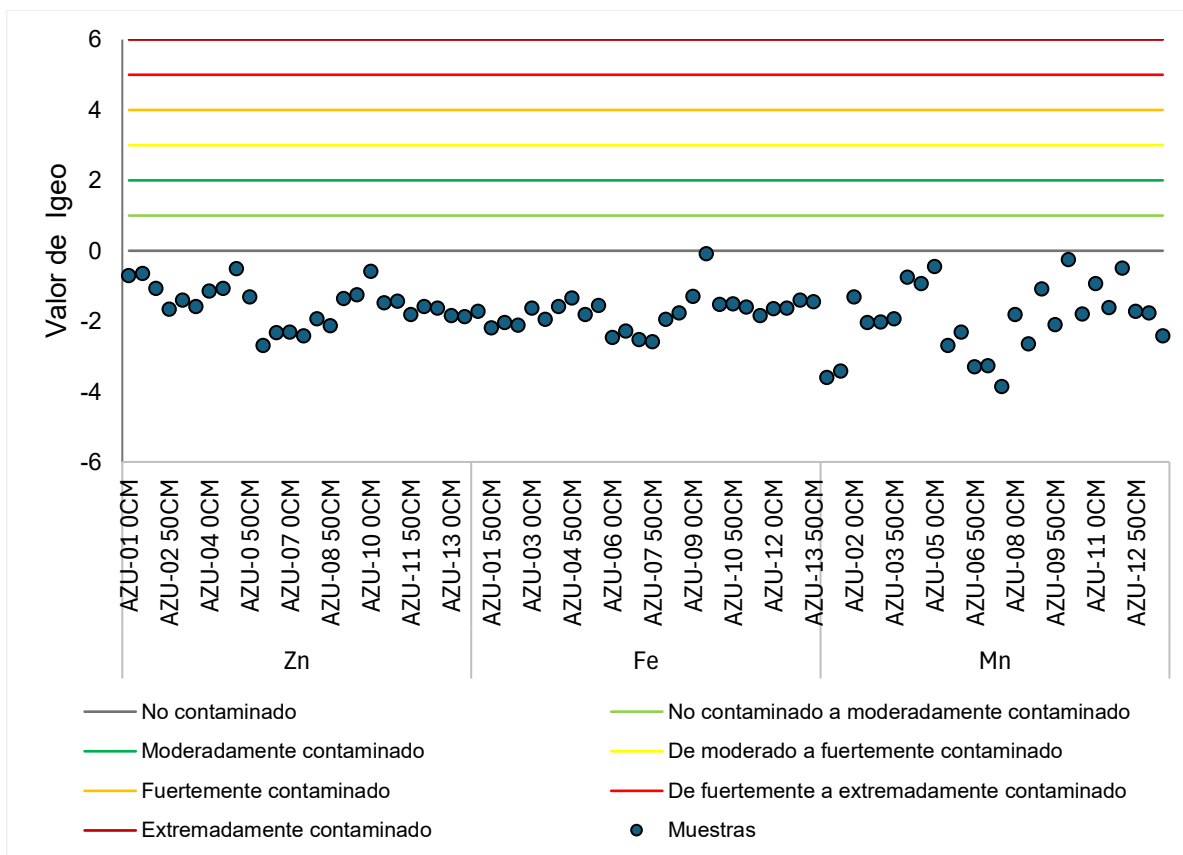


Figura 23. Índice de geoacumulación (Igeo) en elementos Zn, Fe y Mn.

Fuente: elaboración propia en base a Santiago-Seoane (2021).

8.4.2. Factor de enriquecimiento (FE)

Los resultados del FE de los elementos mayoritarios Si, Al, Mn, Na, K y P mostraron un enriquecimiento de mínimo a moderado en todos los perfiles a nivel de superficie y a 50 cm de profundidad. Algunos elementos (Si y Al) mostraron valores constantes mientras que otros presentaron picos en determinadas muestras como el caso de Mn, P y Ti, lo que nos puede indicar que el enriquecimiento no es uniforme, si no localizado en determinados perfiles.

El elemento que mayor enriquecimiento presentó es el K con un valor de 4.4 ($2 \leq FE \leq 5$ E. moderado), medido para el sitio AZU-07 (en profundidad). Si bien el índice Igeo de los óxidos analizados anteriormente mostró que dicho elemento no representaba riesgos para el ecosistema, el valor FE muestra que existe un enriquecimiento del K. Seguido por el Si con un valor de 4.1 ($2 \leq FE \leq 5$ E. moderado), Al con un valor de 2.8 ($2 \leq FE \leq 5$ E. moderado), Na valor de 2.8, todos medidos para el sitio AZU-07 (en profundidad); P valor de 2.7 para el sitio AZU-11 (en superficie) y Mn valor de 2.3 ($2 \leq FE \leq 5$ E. moderado), para el sitio AZU-05 (en superficie) (ver Figura 24).

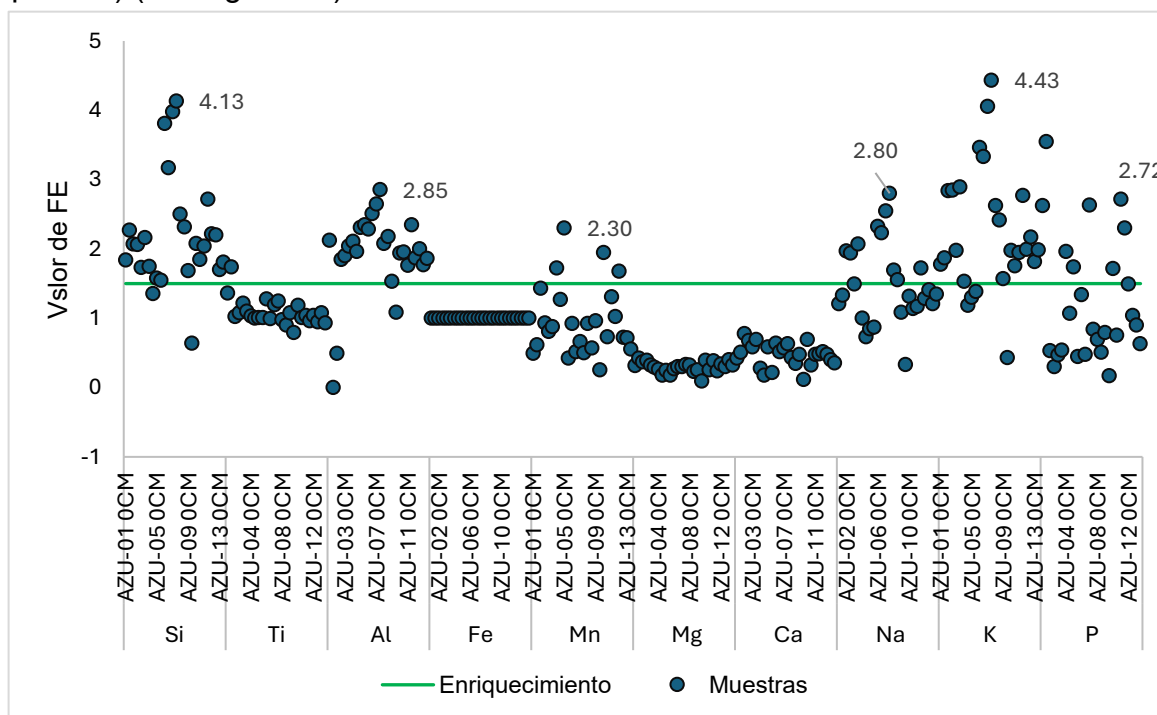


Figura 24. Valores del FE de los elementos mayoritarios a nivel superficie y a 50 cm de profundidad en los perfiles AZU. Fuente: elaboración propia.

En el caso de los demás elementos mayores y traza analizados, el FE mostró que el elemento con mayor enriquecimiento fue el S con un valor de 42.8 (FE ≥ 40 : enriquecimiento extremadamente alto), seguido del As con un valor de 20.8 (FE ≤ 20 : enriquecimiento significativo) para el perfil de AZU-01 tanto a nivel de superficie como a 50 cm de profundidad. Dichas elevaciones en la concentración de los elementos indican posibles fuentes externas, que podrían estar vinculadas a contaminación antrópica o procesos geoquímicos.

Los demás elementos, que mostraron un enriquecimiento de mínimo a enriquecimiento significativo fueron Rb, Zn, Mn, Ti y K, de acuerdo con el siguiente orden: Rb con un valor de 5.9 (FE $5 \leq E$. significativo), medido para el sitio AZU-03 (a profundidad); K con un valor de 4 (2 $\leq$ FE ≤ 5 E. moderado), medido para el sitio AZU-02 (a profundidad); Ti con un valor de 3.2 (2 $\leq$ FE ≤ 5 E. moderado), medido para el sitio AZU-01 (a profundidad); Zn con un valor de 2.9 (2 $\leq$ FE ≤ 5 E. moderado), también medido para el sitio AZU-01 (a profundidad); y Mn con un valor de 2.6 (2 $\leq$ FE ≤ 5 E. moderado), medido para el sitio AZU-05 (en superficie) (ver Figura 25).

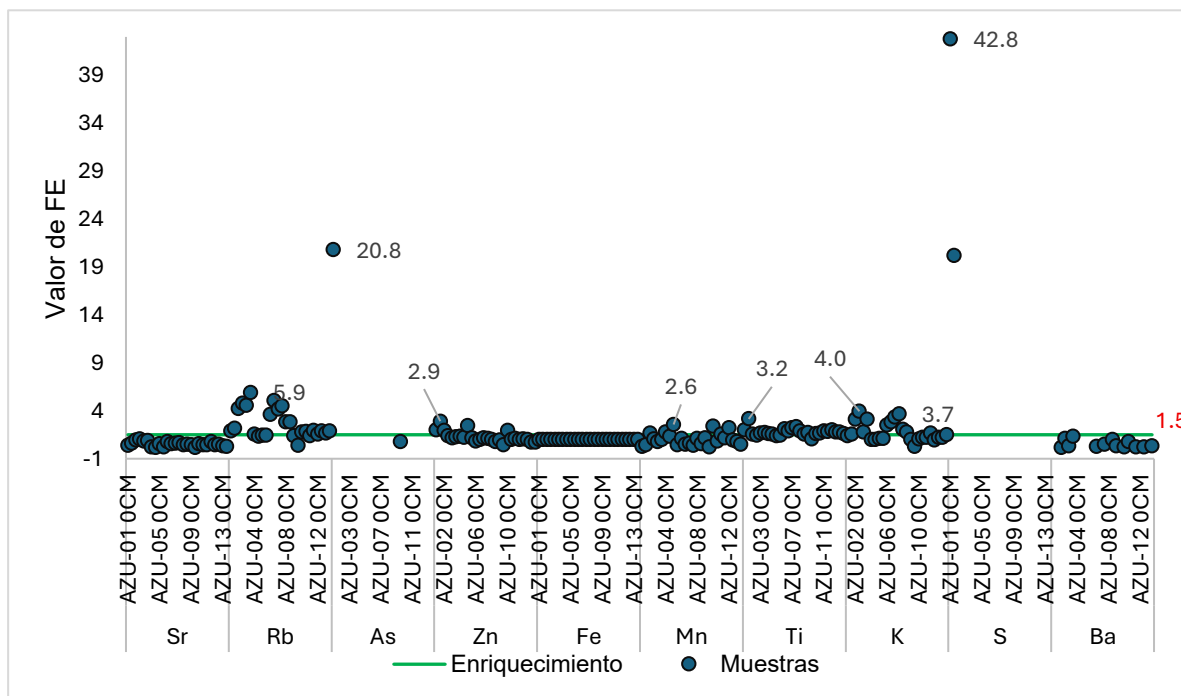


Figura 25. Valores del FE de los elementos traza a nivel superficie y a 50 cm de profundidad en los perfiles AZU.

Fuente: elaboración propia.

8.4.3. Factor antrópico (FA)

Los resultados del FA de los elementos mayores mostraron que los elementos Ti, Mg, Ca, Na y Fe tienen valores de < 1 FA indicando proveniencia de fuentes geogénicas, mientras que los elementos Si, Al, K y P sobrepasan valores > 1 , para todos los sitios analizados, lo que sugiere un enriquecimiento por fuentes antrópicas (ver Figura 26).

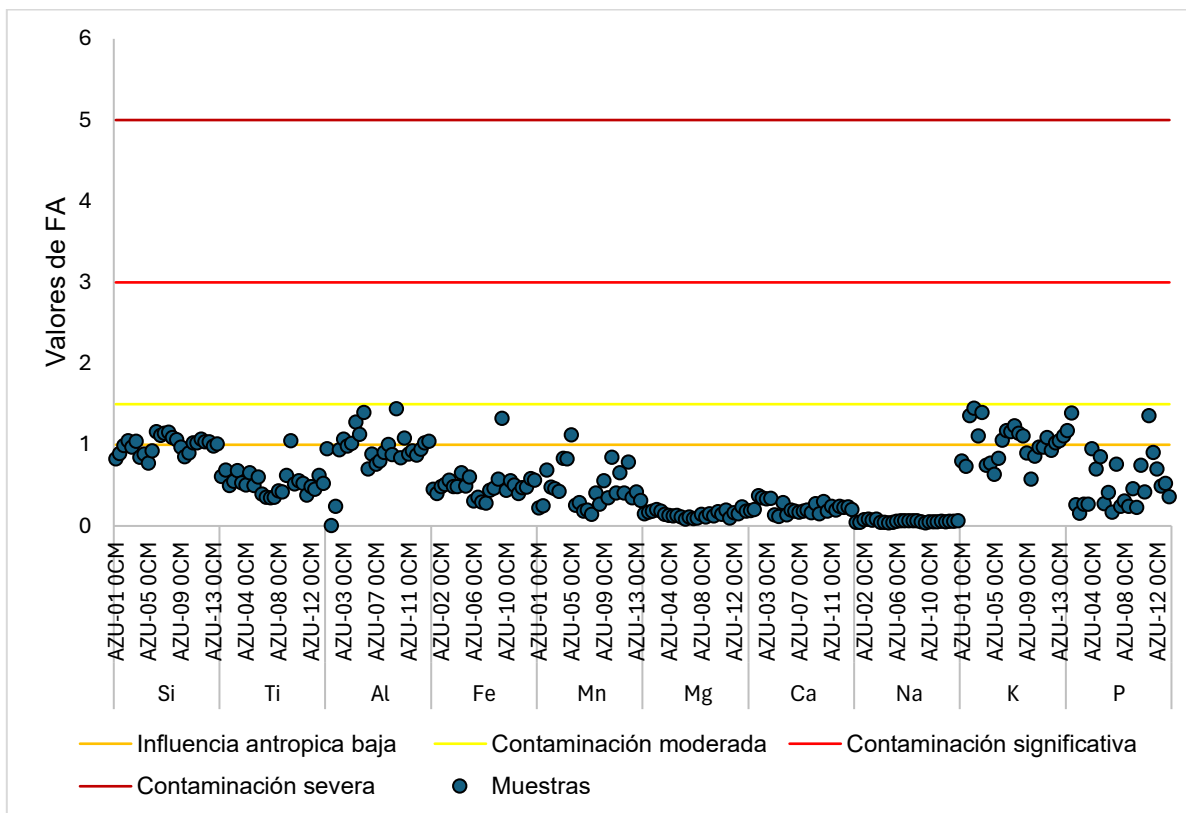


Figura 26. Valores del FA de los elementos mayoritarios a nivel superficie y a 50 cm de profundidad.

Fuente: elaboración propia.

Para el resto de elementos mayores y los elementos traza presentes en los perfiles, el análisis del FA mostró que los valores de Sr y Fe < 1 provienen de fuentes geogénicas, mientras que los valores de Rb, As, Zn, Mn, Ti, K, S y Ba sobrepasan el valor > 1 , es decir provienen de fuentes antrópicas (ver Figura 27) y se encontraron para todos los sitios, excepto AZU-04 y 11. Siendo el As con un valor

de 9.4 el más alto (> 5 FA contaminación severa), medido para el sitio AZU-01 (en superficie), seguido de Rb con un valor de 2.3, medido para el sitio AZU-03 (a profundidad), y el S con un valor de 1.9, medido para el sitio AZU-01 (en superficie), presentando ambos > 1.5 contaminación moderada, como se muestra en la figura 27.

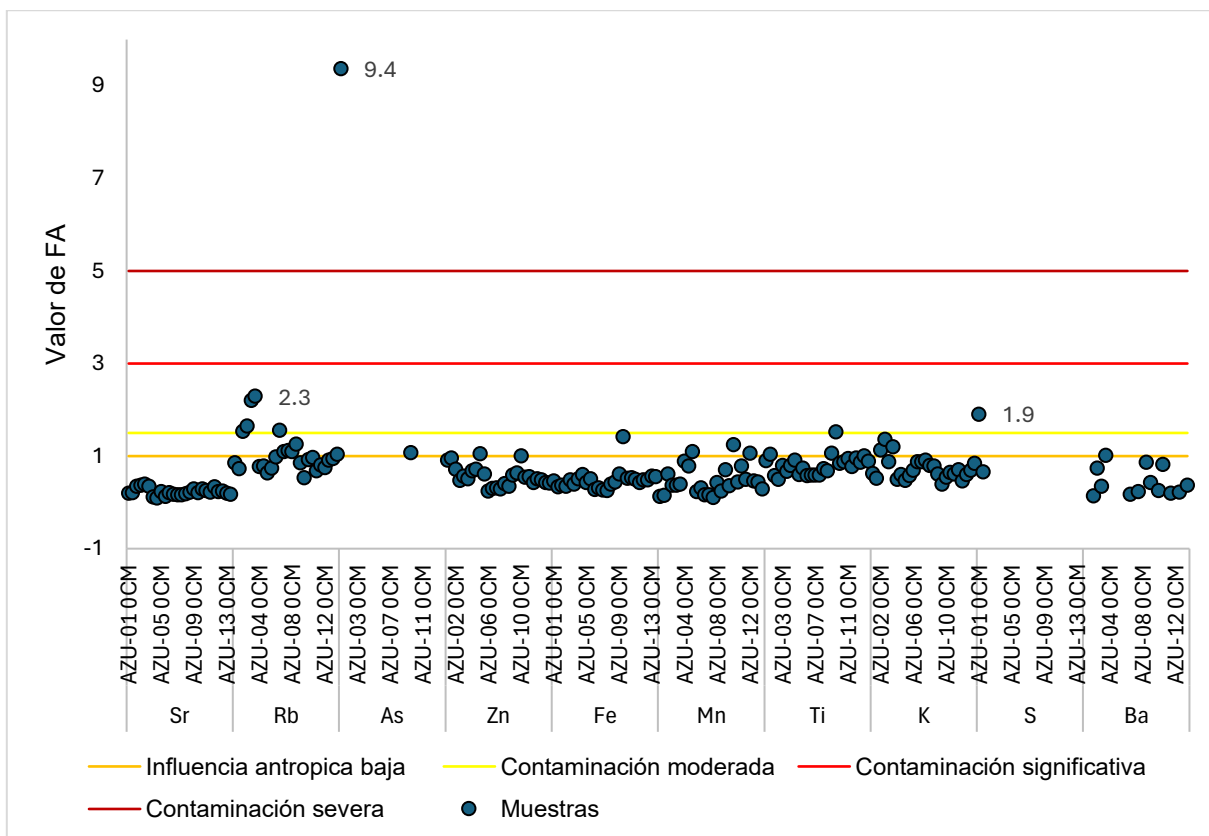


Figura 27. Valores del FA de los elementos traza a nivel superficie y a 50 cm de profundidad.

Fuente: elaboración propia.

9. DISCUSIÓN

9.1. Variabilidad y diversidad de suelos en el CGLA

Las propiedades de los suelos de la catena 1 (ver en Figura 28) se encuentran dentro de un intervalo cercano de valores, dónde sus valores de pH se mostraron ácidos para todos los perfiles, teniendo variaciones en las demás propiedades; la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es alta y muy alta en los horizontes superficiales y baja en los subsuperficiales, con texturas predominantes son franco arcillo arenosa y franco arcillosa.

Con excepción de los perfiles AZU-06, AZU-11 y AZU-12, principalmente en los horizontes superficiales. En el suelo bajo uso agrícola con condiciones de hidromorfía (perfil AZU-06), el pH es extremadamente ácido y existe un muy bajo porcentaje de materia orgánica. En el caso del suelo bajo uso agrícola de AZU-11, el pH es fuertemente ácido y con un muy bajo porcentaje de materia orgánica igualmente.

De igual forma el suelo bajo bosque mixto y con pendiente (AZU-12), el pH fuertemente ácido y con bajo porcentaje de materia orgánica. En el caso del suelo bajo bosque mixto o de oyamel (AZU-09, AZU-10, AZU-04 y AZU-05), el pH es ácido pero con porcentaje de materia orgánica de media a muy alta. Por otro lado el perfil AZU-01 aunque esta bajo uso de pastizal presenta propiedades similares a los anteriores.

Los suelos desarrollados en zonas altas y planicies se caracterizan principalmente por ser suelos geomorfológicamente estables, en cambio los suelos desarrollados en ambientes de pendiente o planicies fluviales serán menos estables al tener arrastre y/o aporte de sedimentos; en estos ambientes el pH se volverá más ácido y habrá disminución del porcentaje de materia orgánica.

Esta interpretación concuerda con los resultados del estudio realizado en suelos bajo bosques de la Cordillera Central en República Dominicana (May, 2015), dónde la geomorfología influye en la acidez de los suelos y la presencia de aluminio. Las geoformas con poca pendiente de partes altas serán más lavados y ácidos, mientras

que las de pendiente elevada o partes bajas habrá acumulación de sales, presentando un pH más elevado (Garavito Neira & Andreux, 1974), el cual se vio el mismo comportamiento para nuestros perfiles.

Los suelos de la catena 1, mostraron en general comportamientos similares en sus propiedades, influenciados principalmente por el uso de suelo y en menor medida las geoformas del paisaje. La geomorfología en este caso influye en la variabilidad del desarrollo del suelo y en sus propiedades fisicoquímicas.

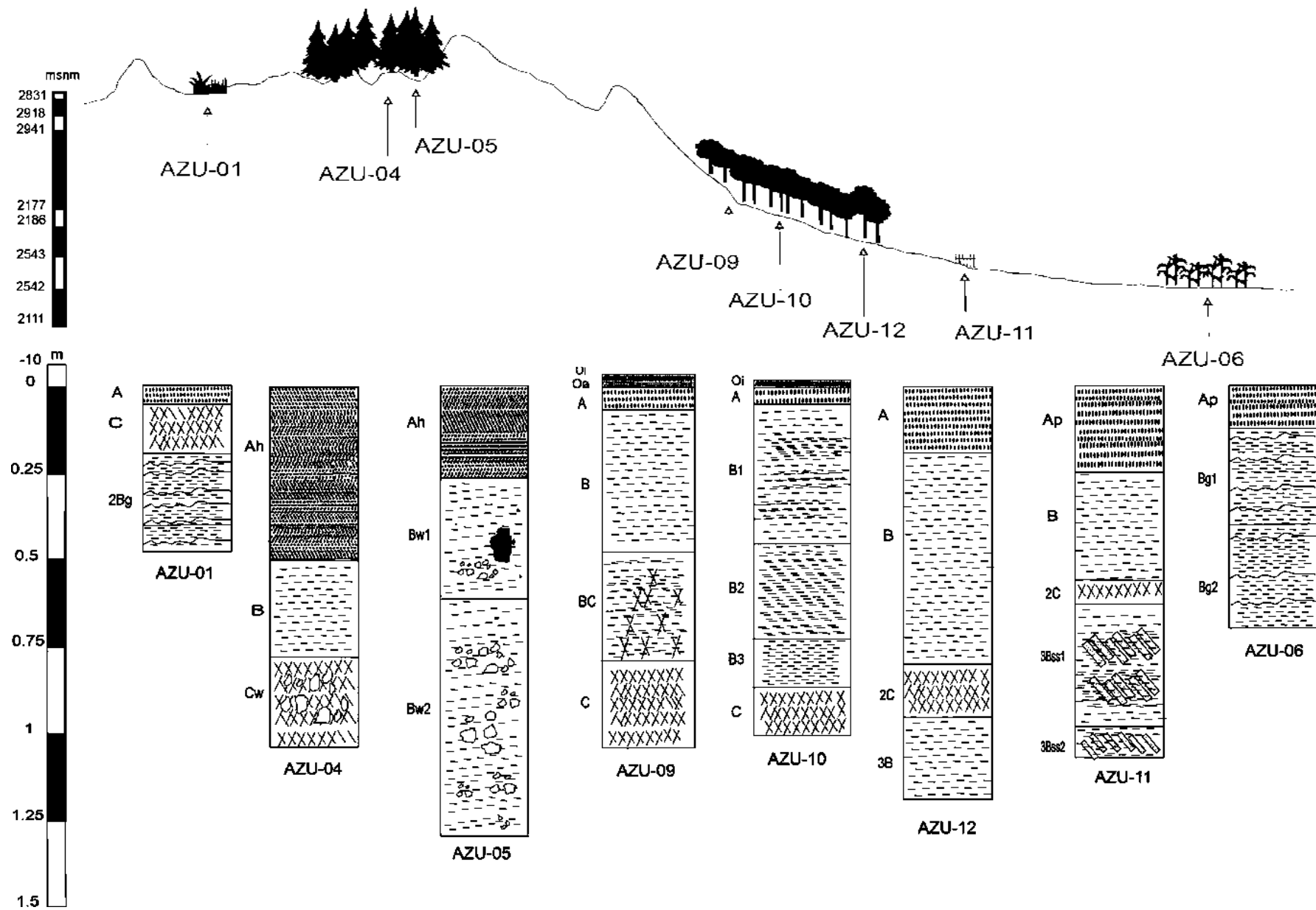


Figura 28. Perfiles de suelos representativos de la catena 1 en la zona de la cuenca de San Pedro Jácuar y San Isidro Alta Huerta.
Fuente: elaboración propia.

Las propiedades de los suelos de la catena 2 (ver en Figura 29) se encuentran con un intervalo cercano de valores, donde el valor de pH se mostró ácido para todos los perfiles y en este caso bajos porcentajes de materia orgánica para toda la catena en los horizontes superficiales y a 50 cm, capacidad de intercambio catiónico (CIC) alta en la mayoría de los horizontes superficiales y baja en los horizontes a 50 cm. Las texturas principales son franco arcillo arenosa y franco arenosa.

Los perfiles desarrollados bajo uso de suelo de bosque de pino (AZU-02, AZU-03, AZU-08 y AZU-13), presentaron bajos porcentajes de materia orgánica, a diferencia de los perfiles en la catena 1, que presentaron porcentajes altos de materia orgánica bajo el mismo uso de suelo de bosque. Por otro lado, el suelo del perfil AZU-07 es el único bajo uso agrícola en la catena e igual que los perfiles de la catena 2, presento valores bajos de porcentaje de materia orgánica.

En general todos los suelos presentaron valores de pH ácidos, y se ha observado que, con la disminución del pH del suelo, hay aumentos drásticos en la desorción de metales pesados y una disolución de Cd, Pb y Zn, aumentando su biodisponibilidad (Almonacid-Buenrostro, 2007; Badawy *et al.*, 2002; Speir *et al.*, 1984). Como consecuencia, la combinación del pH ácido con texturas arenosas y baja capacidad de intercambio catiónico favorece condiciones para una mayor movilidad de los EPC (FAO & GTIS, 2016; Speir *et al.*, 1984), lo cual podría incrementar su disponibilidad en el ambiente.

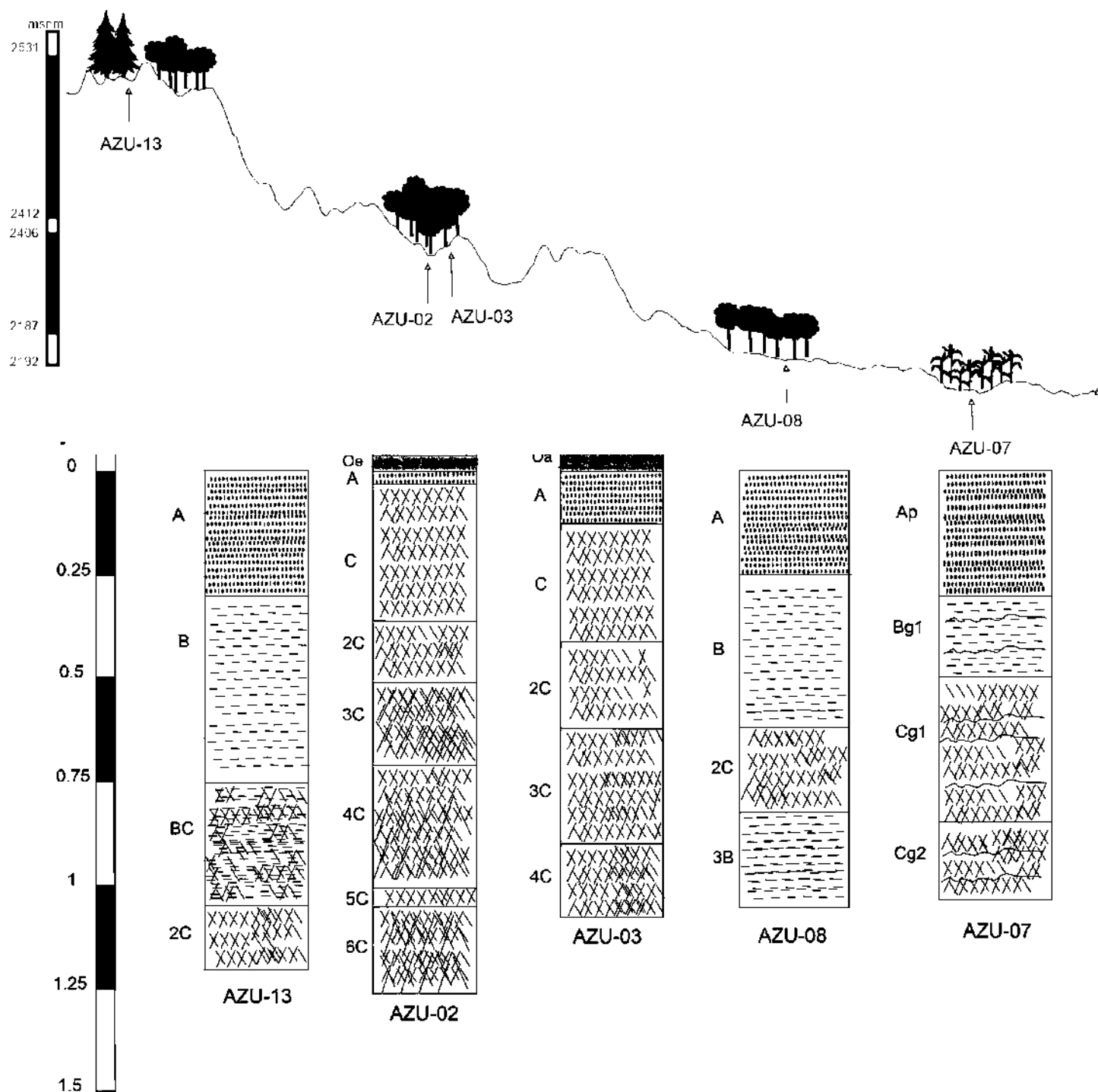


Figura 29. Perfiles de suelos representativos de la catena 2 en la zona de la cuenca de San Pedro Jácharo y San Isidro Alta Huerta.

Fuente: elaboración propia.

9.2. Movilidad y/o retención de EPC en los suelos.

Generalmente, los suelos ubicados en zonas bajas, como piedemonte o planicies aluviales, muestran una mayor concentración de elementos finos (limo y arcilla) y por tanto tienden a mostrar mayores concentraciones de elementos potencialmente contaminantes, esto se debe al transporte por escorrentía y/o procesos de erosión (Osorio-Sánchez *et al.*, 2024). A pesar de esto, los resultados en la zona de estudio indicaron lo contrario, ya que en estas posiciones geomorfológicas no se detectaron concentraciones elevadas de los metales pesados.

En cambio, los suelos en posiciones más altas del paisaje mostraron un comportamiento diferente, donde se encontraron concentraciones elevadas de algunos elementos traza, principalmente As. Por tanto, de acuerdo con la evaluación de los suelos en la zona de estudio, la acumulación de los EPC no depende únicamente de la posición dentro de la catena o de la geoforma del paisaje.

Además de las geoformas en el paisaje, el uso de suelo y manejo influye de manera directa en los procesos de retención y/o movilización de los EPC dentro del perfil en los suelos. En el caso de los suelos con uso de bosque de oyamel, donde la materia orgánica mostró los valores más elevados, se observó mayor retención de EPC, aunque de acuerdo con las gráficas los sitios con bosque de oyamel solo presentan presencia de Zn, Mn y Al, en cambio los demás suelos en zonas boscosas de San Pedro muestran presencia de Rb, K, Ba, Mn, Zn, Al, Ti, Fe y As (Wiśniewski & Märker, 2021).

En el caso específico del As, en el perfil AZU-01, localizado a una altitud mayor a 2500 msnm, en una planicie bajo uso de suelo de pastizal y junto a un balneario de aguas termales y dentro del CGLA, el horizonte a profundidad de 50 cm reportó concentraciones que excedieron los límites máximos permisibles para la salud establecidos por la norma mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007) y normas internacionales de CCME, (2007) de Canadá, la EPA EE. UU.-2015 USEPA, (2015) y la de Unión Europea-2022 Comisión Europea, (2022) (ver Figura 30).

Caso similar en el perfil AZU-09 donde la presencia del As solo supera el límite máximo permisible para la EPA EE. UU.-2015, aunque como se mencionó en resultados el perfil se encuentra a menor altitud 2412 msnm, bajo uso de suelo de bosque mixto y con una pendiente pronunciada y fuera del CGLA. Sin embargo, estas concentraciones sugieren un aporte externo antrópico, posiblemente asociado con la actividad geotérmica presente en la región, lo que coincide con reportes previos en zonas geotérmicas similares (Birkle & Merkel, 2000).

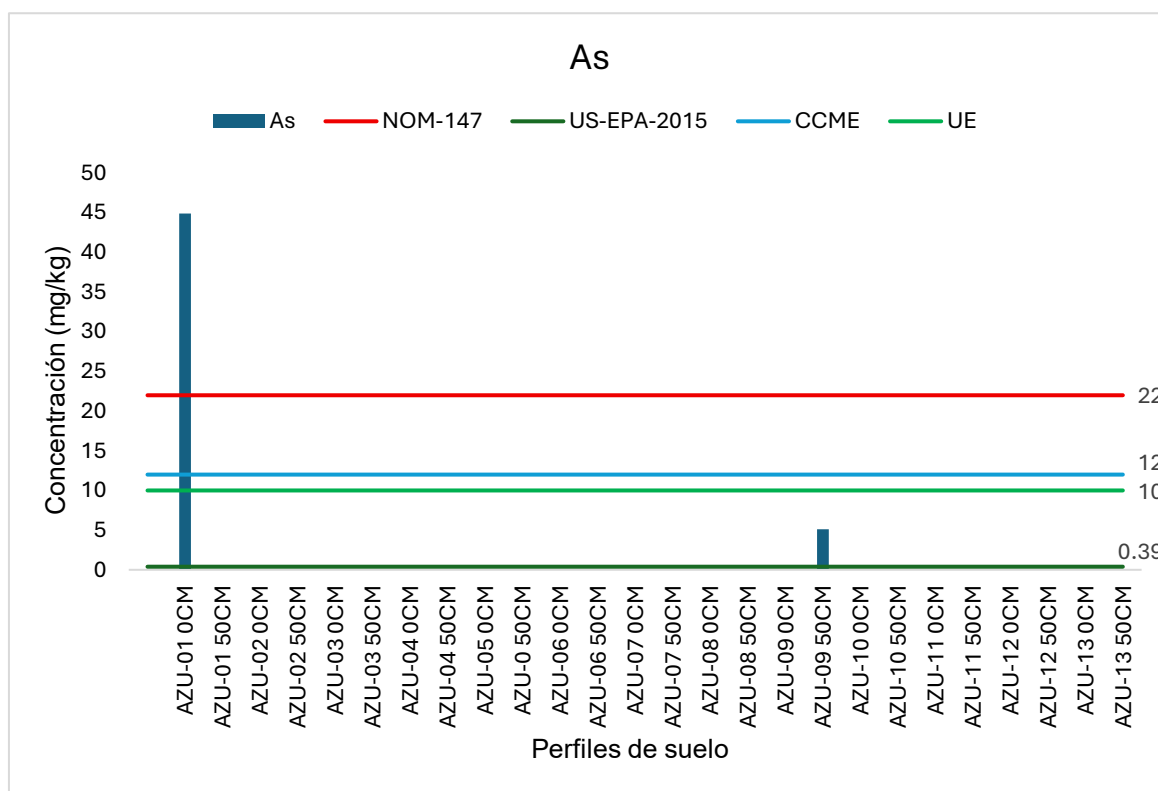


Figura 30. Gráfica de la concentración de As en muestras de suelo en temporada de estiaje y lluvias. *Nota los límites permisibles se encuentran en el anexo 2.

Fuente: elaboración propia.

La presencia y aumento en las concentraciones de As en suelos de zonas volcánicas ha sido vinculada con la actividad geotérmica, como en el estudio de caso de Pastrana-Corral *et al.* (2016), donde el As solo se encontró en suelos con mayor retención de los contaminantes, concordando nuevamente con estudios

previos donde las concentraciones más altas de metales pesados se dieron en zonas de mayor altitud y cercanía con campos geotérmicos.

Por otra parte, los suelos bajo uso de suelo agrícola o bajo intervención por cambio uso de suelo, mostraron propiedades que favorecen la movilización y por tanto se identificaron concentraciones que no exceden los límites máximos permisibles, pero que cuya movilidad implicaría un riesgo potencial, como en el caso de Mn, K y P elementos que son absorbidos por la vegetación, a diferencia de elementos como Zn, Rb o el As, que debido a su radio ionico o peso atomico, se quedan inmovilizados (Garavito Neira & Andreux, 1974), la movilidad observada sugiere la posibilidad de migración hacia aguas subterráneas, especialmente en la temporada de lluvias o la posibilidad de absorción por la vegetación (Cui *et al.*, 2021; Fernandez-Ochoa, Mullisaca Contreras, & Huanchi Mamani, 2022), procesos que dependen de factores ambientales no evaluados directamente en este estudio.

En el caso de elementos como Zn y Ba mostraron presencia en los suelos, pero sus concentraciones no superaron los limites maximos permisibles (ver Figura 31 y 32).

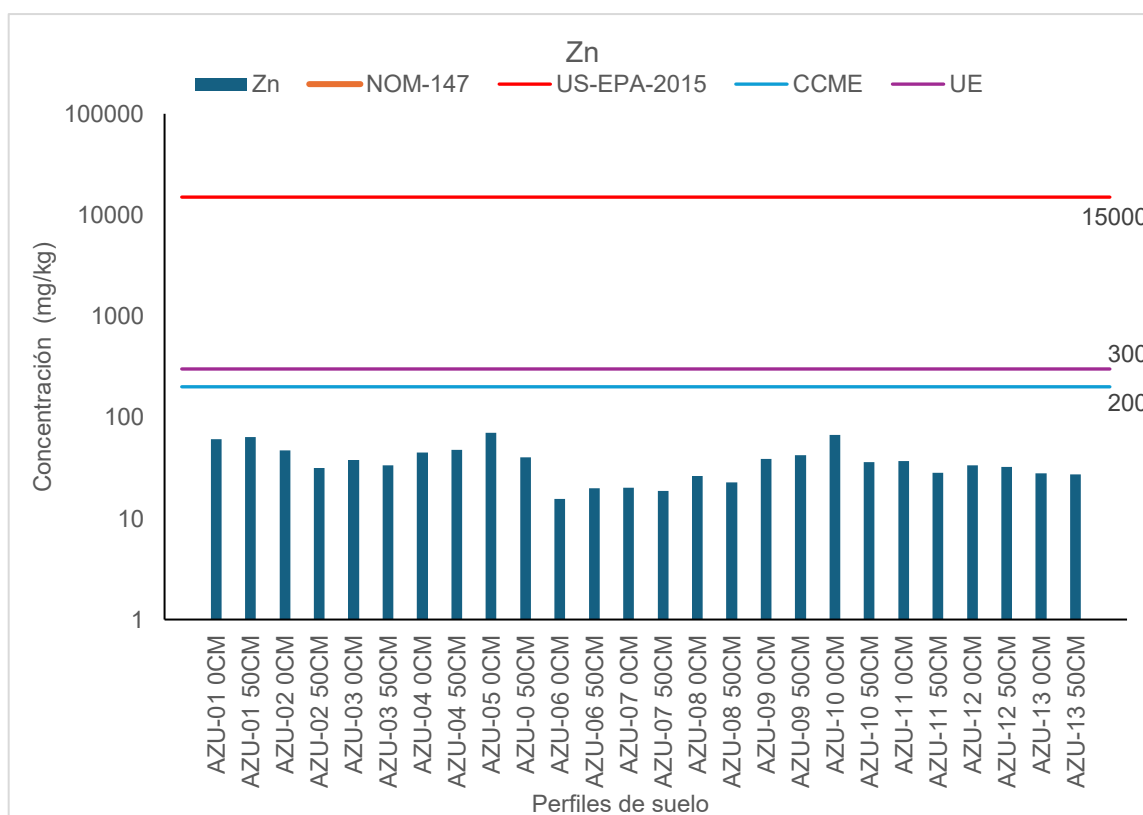


Figura 31. Gráfica de concentración de Zn en muestras de suelo en temporada de estiaje y lluvias. *Nota los límites permisibles se encuentran en el anexo 2. Fuente: elaboración propia.

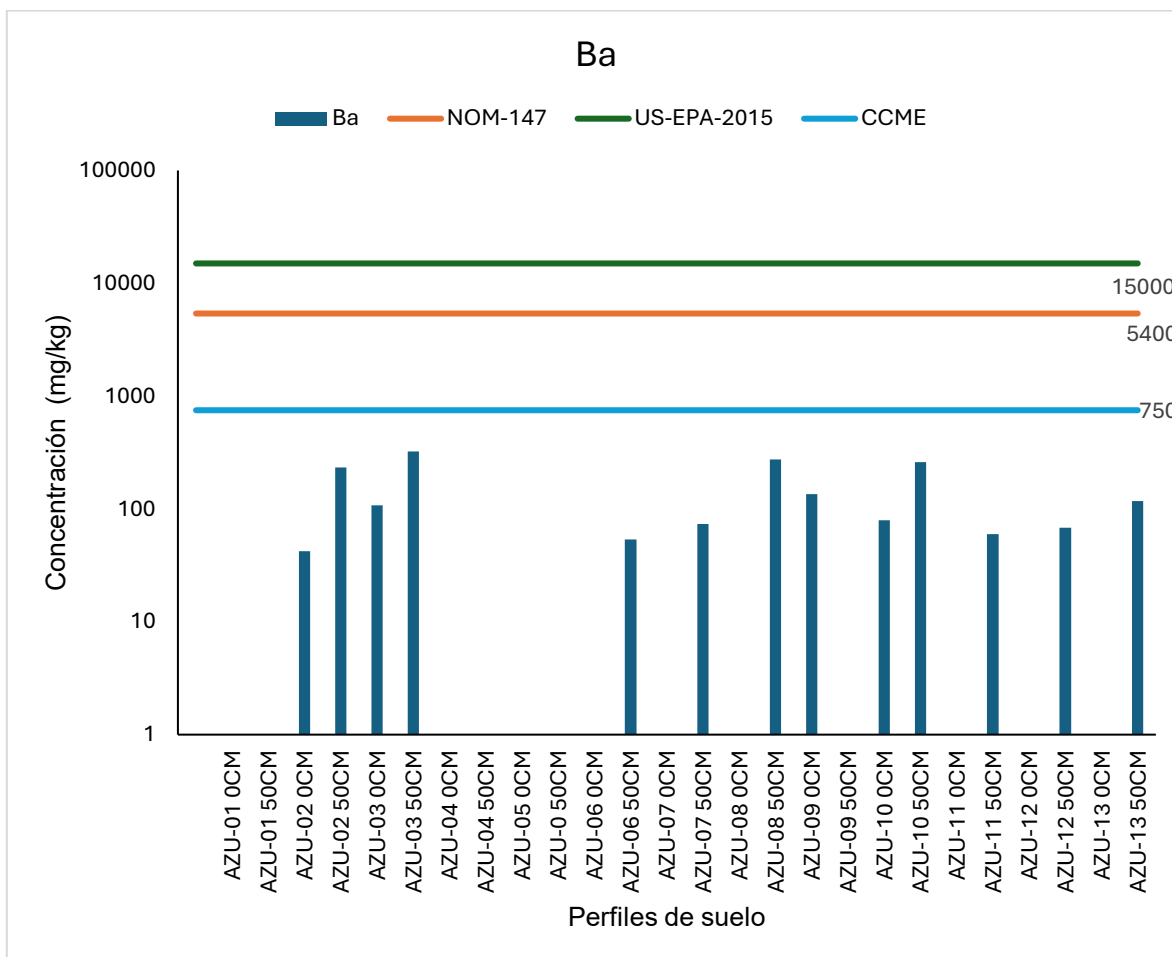


Figura 32. Grafica de concentración de Ba en muestras de suelo en temporada de estiaje y lluvias. *Nota los límites permisibles se encuentran en el anexo 2. Fuente: elaboración propia.

9.2.1. Índice de Igeo

Este índice evidenció que existe contaminación por As, particularmente para los sitios AZU-01 y 09, lo que infiere que la presencia de este elemento traza implica un riesgo para el ecosistema y la salud de los habitantes de zonas aledañas al Balneario y San Pedro Jácuaró. Los demás suelos presentaron contaminación para S (para el sitio AZU-01) seguido por Rb (en todos los sitios analizados a excepción del balneario, la localidad de Rubén Pérez y el bosque de la mesa de Guadalupe), si bien estos dos elementos no son considerados metales pesados o elementos traza, la geoacumulación que presentan implicaría un riesgo para el ecosistema, así como para la salud de los habitantes de San Pedro Jácuaró, El Comal, Rincón de Rubios y San Pedro Eréndira. En cambio, los suelos no presentaron valores por encima de 0 para ninguno de los demás EPC analizados, por tanto, no se considera que exista contaminación.

Por otra parte, las concentraciones de As ponen en consideración la necesidad de monitoreos periódicos con el fin de conocer la variabilidad temporal del elemento, además denotan la importancia de poner énfasis en la gestión del campo geotérmico, considerando que este elemento podría proceder de dichas actividades.

Teniendo en cuenta lo anterior, los resultados de Igeo son concordantes con lo descubierto por Pastrana-Corral (2016), para zonas cercanas a plantas geotérmicas, en donde las concentraciones de los elementos reportados fueron más altas que las encontradas en este estudio, esto debido a que las muestras de suelo se tomaron en lugares adyacentes a las fuentes de origen de la planta.

9.2.2. Factor de enriquecimiento FE

El elemento que mayor enriquecimiento presenta es el S, concordando con el índice Igeo que mostró para dicho elemento una alta contaminación, el FE demostró que en la mayoría de los puntos analizados existe enriquecimiento de tipo moderado a extremadamente, representando mayores riesgos sobre el ecosistema. Los valores

proporcionan indicios de que la actividad antrópica de la zona es la fuente del aumento en dichas concentraciones, generando riesgos para el ecosistema y la población.

De los estudios consultados en la bibliografía, hay que tomar en cuenta que no se han realizado estudios sobre índices de contaminación aplicados a suelos en el área de estudio, motivo por el cual se dificulta obtener mayores referencias teóricas de valores de concentraciones para metales pesados. Sin embargo, de acuerdo con Muyulema-Allaica *et al.* (2019) en estudios previos de suelos aplicando el FE, las actividades antrópicas demostraron ser la fuente principal en el aumento de las concentraciones de los metales pesados.

Adicionalmente, los elementos que presentan alto enriquecimiento siguieron este orden: As, K, Zn y Ti, encontrándose en las localidades del Balneario, San Pedro Jácuaro, El Comal y San Pedro Eréndira; por tanto, la contaminación detectada en los suelos indica nuevamente la presencia de factores antrópicos, puesto que los valores de FE sobrepasan 1.5, al igual que lo reportado en otros estudios como el de Castro-González *et al.* (2019).

Por lo anterior, se puede inferir que los suelos estudiados en San Pedro Jácuaro y el Balneario, están enriquecidos con metales pesados, particularmente S y As de origen antrópico. En consecuencia, se deben tomar medidas encaminadas al monitoreo de las concentraciones de los metales pesados y elementos traza. No todos los elementos cuentan con normativas que establezcan un límite máximo permisible, lo cual hace más evidente la necesidad de tomar precauciones y monitoreo con el fin de determinar su variabilidad.

9.2.3. Factor antrópico FA

En concordancia con los índices anteriores, el FA confirma que el aumento tanto en las concentraciones de As, como de S, Rb, K, Zn y Ti provienen de actividades humanas. Por tanto, el enriquecimiento detectado para estos EPC en los suelos sugiere la presencia de factores antrópicos, lo que puede asociarse con la actividad

industrial de la planta geotérmica, el cual se ve reflejado para los perfiles que están más cercanos al CGLA (AZU-01, AZU-02 y AZU-03)

Finalmente, se puede inferir que los suelos no están contaminados, pero si enriquecidos con As, S, Rb, K, Zn y Ti de origen antrópico. Se puede decir entonces que la determinación del FA es importante, porque ayuda a diferenciar entre los elementos procedentes de origen natural y los procedentes de actividades humanas; considerando lo anterior, es necesario realizar investigaciones que evalúen la calidad de agua subterránea en la zona, para comprobar su afectación y proponer alternativas de solución y remediación de suelos.

10. CONCLUSIÓN

El presente estudio generó información sobre los parámetros fisicoquímicos de los suelos representativos en la zona de Los Azufres, Michoacán, los cuales habían sido poco estudiados con relación al paisaje y su influencia en la movilidad/retención de diferentes EPC. Se observó que la materia orgánica ejerce gran influencia en la retención de los EPC, reportando mayor contenido de metales en suelos con alto contenido de materia orgánica (MO).

El contenido de As en el suelo demuestra una acumulación, sustentada con los valores de Igeo, que indica la existencia de contaminación para este elemento traza, la cual está vinculada al campo geotérmico Los Azufres, y por tanto a las actividades industriales de la planta geotérmica. Asimismo, el FE indica enriquecimiento de As, así como de S, Rb, K, Zn y Ti, elementos que están igualmente vinculados con actividades antrópicas de acuerdo con el FA.

De acuerdo con los índices Igeo, FE y FA y con las concentraciones de elementos, se concluye que los valores de As y S presentan el mayor enriquecimiento, posiblemente asociado a actividades antrópicas, incluyendo la operación de la planta geotérmica. Esto resalta la necesidad de que las autoridades encargadas en la región implementen programas de monitoreo y evaluación periódica, para determinar si pueden estar migrando los EPC, a través de la cadena trófica o a los cuerpos de agua subsuperficiales.

Asimismo, se deben establecer tratamientos para la remediación de suelos, encaminados a reducir el riesgo potencial asociado a la presencia de estos elementos en el suelo, especialmente considerando su movilidad y posibilidades de transferencia a otros compartimientos ambientales de San Pedro Jécuaro y San Isidro Alta Huerta.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, I. M., Helal, Aly A., El Aziz, N. A., Gamal, R., Shaker, N. O., & Helal, A. A. (2019). Influence of some organic ligands on the adsorption of lead by agricultural soil. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 2540–2547. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.03.012>
- Akoto, O., & Darko, G. (2008). Heavy Metals Pollution in Surface Soils in the Vicinity of Abundant Railway Servicing Workshop in Kumasi, Ghana. *Int. J. Environ. Res*, 2(4), 359–364. www.SID.ir
- Albanese, S., De Vivo, B., Lima, A., & Cicchella, D. (2007). Geochemical background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 93(1), 21–34. <https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2006.07.006>
- Albert, K., Sulla, C., Carlos, M. J., & Paniagua, L. (2021). Geoacumulación y los riesgos ecológicos de elementos ecotóxicos en los sedimentos marinos del puerto de Matarani, 2019. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Alloway, B. J. (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (B. J. Alloway, Ed.; Third). Springer. <http://www.springer.com/series/5929>
- Almonacid-Buenrostro, F. (2007). Determinación de metales pesados en muestras de suelo superficial de la zona que circunda a las instalaciones de la empresa Cromátos de México en Tultitlán, estado de México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arreguín Cortés, F. I., Chávez Guillén, R., & Soto Navarro, P. R. (2009). Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea en México. *Revista Tlaloc Asociación Mexicana de Hidráulica*, 45.
- Ayala, N., Muñoz, M., & Banchón, C. (2025). Impactos ambientales globales de los vertidos de aguas residuales y desechos derivados de la energía geotérmica

- en los ecosistemas naturales. *Horizon Nexus Journal*, 3(3), 33–51.
<https://doi.org/10.70881/hnj/v3/n3/83>
- Badawy, S. H., Helal, M. I. D., Chaudri, A. M., Lawlor, K., & McGrath, S. P. (2002). Soil Solid-Phase Controls Lead Activity in Soil Solution. *Journal of Environmental Quality*, 31(1), 162–167.
<https://doi.org/10.2134/JEQ2002.1620>;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:15372537;ISSUE:ISSUE:DOI
- Becerril, J. M., Barrutia, O., García Plazaola, J. I., Hernández, A., Olano, J. M., & Garbisu, C. (2007). Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 16(2), 50–55.
<http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=481>
- Birkle, P., & Merkel, B. (2000). Environmental impact by spill of geothermal fluids at the geothermal field of Los Azufres, Michoacan, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 124(3–4), 371–410.
<https://doi.org/10.1023/A:1005242824628>/METRICS
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils¹. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465.
<https://doi.org/10.2134/AGRONJ1962.00021962005400050028X>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2014). *The Nature and Properties of Soils*, Revised 14th edition. 1–1046. <https://books.google.co.id/books?id=3eWcjwEACAAJ>
- Bu, J., Sun, Z., Zhou, A., Xu, Y., Ma, R., Wei, W., & Liu, M. (2016). Heavy Metals in Surface Soils in the Upper Reaches of the Heihe River, Northeastern Tibetan Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/IJERPH13030247>
- Castro-González, N. P., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R., Tamariz-Flores, J. V., & Reyes-Cervantes, E. (2019). Heavy metals pollution level in wastewater and soils in the alto balsas sub-basin in tlaxcala and puebla, Mexico. *Revista*

- Internacional de Contaminación Ambiental, 35(2), 335–348.
<https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.06>
- CCME. (2007). Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health: summary tables. <https://ccme.ca/en/current-activities/canadian-environmental-quality-guidelines>
- Comisión Europea. (2022). DECISIÓN (UE) 2022/1244 DE LA COMISIÓN por la que se establecen los criterios de la etiqueta ecológica de la UE aplicables a los sustratos de cultivo y las enmiendas del suelo. Diario Oficial de la Unión Europea. <http://data.europa.eu/eli/dec/2022/1244/oj>
- Corona-Chávez, P., Cuevas Villanueva, R. A., Gómez Vasconcelos, G., González-Arqueros, M. L., Figueroa Soto, Á. G., & Ramos Arroyo, Y. R. (2022). Diagnóstico de la calidad del agua e impacto ambiental en la tenencia de San Pedro Jácuaró, Municipio de Ciudad Hidalgo.
- Cui, X., Geng, Y., Sun, R., Xie, M., Feng, X., Li, X., & Cui, Z. (2021). Distribution, speciation and ecological risk assessment of heavy metals in Jinan Iron & Steel Group soils from China. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126504. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126504>
- FAO. (2015). El suelo es un recurso no renovable.
- FAO. (2018). La contaminación de los suelos está contaminando nuestro futuro. <https://www.fao.org/newsroom/story/Polluting-our-soils-is-polluting-our-future/es>
- FAO, & GTIS. (2016). Estado mundial del Recurso Suelo: resumen técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo.
- Fernandes, L. L., & Nayak, G. N. (2016). Geochemical assessment and fractionation of trace metals in estuarine sedimentary sub-environments, in Mumbai, India. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 6, 14–23. <https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2016.06.003>

- Fernandez-Ochoa, B. H., Mullisaca Contreras, E., & Huanchi Mamani, L. E. (2022). Nivel de contaminación del suelo con arsénico y metales pesados en Tiquillaca (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 24(2), 131–138. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.416>
- Fernandez-Ochoa, B. H., Mullisaca Contreras, E., Huanchi Mamani, L. E., Fernandez Ochoa, B. H., Mullisaca Contreras, E., & Huanchi Mamani, L. E. (2022). Nivel de contaminación del suelo con arsénico y metales pesados en Tiquillaca (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(2), 131–138. <https://doi.org/10.18271/RIA.2022.416>
- Garavito Neira, F., & Andreux, F. (1974). *Propiedades químicas de los suelos: X*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- García, L. A. V. (2022). *Apuntes de Suelos contaminados* (Amelia Guadalupe Fiel Rivera, Ed.; 1st ed., Vol. 1). Nismet Díaz Ferro. <http://www.ingenieria.unam.mx/>
- González-Acevedo, Z. I. (2017). La sustentabilidad de la energía geotérmica y sus impactos ambientales. *Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital*, 9(3), 137–141.
- He, S., He, Z., Yang, X., Stoffella, P. J., & Baligar, V. C. (2015). Soil Biogeochemistry, Plant Physiology, and Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soils. *Advances in Agronomy*, 134, 135–225. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.005>
- Ilgen, A. G., Rychagov, S. N., & Trainor, T. P. (2011). Arsenic speciation and transport associated with the release of spent geothermal fluids in Mutnovsky field (Kamchatka, Russia). *Chemical Geology*, 288(3–4), 115–132. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMGEO.2011.07.010>
- Kemp, D. D. (1998). *The environment dictionary*. Routledge. <https://www.routledge.com/The-Environment-Dictionary/Kemp/p/book/9780415127530>

- Mataix Solera, J. (2000). Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, 2000.
- May, T. (2015). pH, aluminio y factores ambientales en suelos bajo bosques de la Cordillera Central, República Dominicana. *Revista Geográfica Venezolana*.
- Mendoza-Rangel, E., & Cuauhtémoc, H.-A. (2004). La protección ambiental en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia: Revista Mexicana de Geoenergía*, 17, 2–9.
- Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., González-Hernández, G., Romero, F., Lozano, R., & Beramendi-Orosco, L. E. (2009). Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3), 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.07.002>
- MÜLLER, G. (1986). Schadstoffe in Sedimenten-Sedimente als Schadstoffe. *Mitteilungen Der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, 79, 107–126.
- Muyulema-Allaica, J. C., Canga-Castillo, S. M., Pucha-Medina, P. M., & Espinosa-Ruíz, C. G. (2019). Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos de la reserva ecológica de Manglares Cayapas Mataje (REMACAM)-Ecuador. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 7(41). www.riiit.com.mx
- NOM-021-RECNAT-2000. (2002). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- Núñez-Hernández, S. (2019). Comportamiento isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de fluidos del campo geotérmico de Los Azufres Michoacán [Doctorado]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Osorio-Sánchez, J., Zafra-Mejía, C., & Suárez-López, J. (2024). Metodologías para evaluar la contaminación descargada sobre cuerpos hídricos: metales pesados

en sedimentos viales. Revista UIS Ingenierías, 23(3).
<https://doi.org/10.18273/REVUIN.V23N3-2024001>

Ossiel, J., & Ramos, H. (2019). Determinación de propiedades de suelos agrícolas a partir de mediciones eléctricas realizadas en campo y en laboratorio. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Panduro-Rivera, M. G., Hernández-Mena, L., López-López, A., Murillo-Tovar, M. A., Díaz-Torres, J. de J., & del Real-Olvera, J. (2014). Evaluación de la calidad del agua ante la enfermedad renal crónica en la Zona Oriente de Michoacán, México. Exploraciones, Intercambios y Relaciones Entre El Diseño y La Tecnología, 57–79.
<https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>

Pastrana-Corral, M. A., Wakida, F. T., García-Flores, E., Rodríguez-Mendivil, D. D., Quiñonez-Plaza, A., & Piñon-Colin, T. D. J. (2016). Soil mercury levels in the area surrounding the Cerro Prieto geothermal complex, MEXICO. Environmental Monitoring and Assessment, 188(8).
<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5474-1>

Pérez, A. D. S. (2018). Evaluación de contaminación de suelo por Metales pesados en Pachuca, Hidalgo. [Licenciatura en Biología]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería.

Quevedo, J., & Meneses, L. (2014). Determinación de factores de enriquecimiento e índices de geoacumulación de plomo, cadmio y níquel en suelos agrícolas del sector San Alfonso en Machachi. InfoANALÍTICA.

Robinson-Fuentes, V., Rivera-Heredia, M. E., & Corona-Chávez, P. (2023). Enfermedad renal crónica en la región oriente de Michoacán y su relación con las condiciones naturales, impacto ambiental y psicosocial.

Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., Pennock, D., & Fao. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta.

- Rubio, A. M. G. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales.
- Rudnick, R. L., & Gao, S. (2014). Composition of the Continental Crust. In *Treatise on Geochemistry: Second Edition* (Vol. 4, pp. 1–51). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Santacruz-Benitez, R. (2017). Distribución de riesgo epidemiológico ante la insuficiencia renal crónica en la tenencia de San Pedro Jácuaró, Ciudad Hidalgo, Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México.
- SEMARNAT. (2007). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación.
- Siebe, C., Jahn, R., & Stahr Karl. (2006). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. UNAM, Instituto de Geología.
- Soil Science Division Staff. (2017). Soil Survey Manual (C. Ditzler, K. Scheffe, & H. C. Monger, Eds.; USDA Handbook 18). U.S. Department of Agriculture, Government Printing Office.
- Soltani, M., Moradi Kashkooli, F., Souri, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K., & Nathwani, J. S. (2021). Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 140). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750>
- Speir, T. W., Ross, D. J., & Orchard, V. A. (1984). Spatial variability of biochemical properties in a taxonomically-uniform soil under grazed pasture. In *Soil Bid. Biochem* (Vol. 16, Number 2).
- Sposito, G. (1994). Chemical equilibria and kinetics in soils. 268.
- Sposito, G. (2016). The Chemistry of Soils. The Chemistry of Soils. <https://doi.org/10.1093/OSO/9780190630881.001.0001>

- Szefer, P., Kusak, A., Szefer, K., Glasby, G. P., Jankowska, H., Wolowicz, M., & Ali, A. A. (1998). Evaluation of the anthropogenic influx of metallic pollutants into Puck Bay, southern Baltic. *Elsevier Science*, 13, 293–304.
- Taghavi, M., Bakhshi, K., Zarei, A., Hoseinzadeh, E., & Gholizadeh, A. (2024). Soil pollution indices and health risk assessment of metal(loid)s in the agricultural soil of pistachio orchards. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59450-4>
- Tran, D. X., Pearson, D., Palmer, A., & Gray, D. (2020). Developing a landscape design approach for the sustainable land management of hill country farms in New Zealand. In *Land* (Vol. 9, Number 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/LAND9060185>
- USEPA. (2015). Regional Screening Levels (RSLs) - Generic Tables | US EPA. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>
- Volke Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J. A., & de la Rosa Pérez, D. A. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de Ecología, Ed.; 1st ed., Vol. 1).
- Wesseling, C., Weiss, I., Wesseling, C., & Weiss, I. (2017). Enfermedad renal crónica de etiología desconocida o de origen no tradicional: ¿una epidemia global? *Archivos de Prevención de Riesgos Laborales*, 20(4), 200–202. <https://doi.org/10.12961/APRL.2017.20.04.1>
- Wiśniewski, P., & Märker, M. (2021). Comparison of topsoil organic carbon stocks on slopes under soil-protecting forests in relation to the adjacent agricultural slopes. *Forests*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/f12040390>
- Zeng, F., Ali, S., Zhang, H., Ouyang, Y., Qiu, B., Wu, F., & Zhang, G. (2011). The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants. *Environmental Pollution*, 159(1), 84–91. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2010.09.019>

Zinck, J. A. (2015). The geopedologic approach. *Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*, 27–59.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-19159-1_4/TABLES/6

12. ANEXOS

Anexo 1. Valores de fondo.

Utilizados para la determinación de índice Igeo son los propuestos por Rudnick y Gao (2014) que se presentan a continuación.

Tabla 5. Valores de la corteza.

Elementos	Valores de fondo (mg/kg)
Si	311355
Ti	3837
Al	81497
Fe	35250
Mn	775
Mg	14959
Ca	25658
Na	24259
K	23244
P	655
Sr	320
Rb	84
As	4.8
Zn	67
S	621
Cd	0.09
Cu	28
Cr	92
Pb	12.6
Ni	47
Co	117.3
Hg	0.05
Ba	624

Fuente: Elaboración propia, a partir de información extraída de (Rudnick & Gao, 2014).

Anexo 2. Límites permisibles de metales.

Metal	NOM-147	CCME	EPA	UE
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
As	22	12	0.39	10
Cd	150	1.4	70	1
Pb	400	140	400	100
Hg	23	6.6	23	0.45
Cr	280	64	-	100
Ni	1600	50	1600	40
Zn	-	200	<15,000	300
Ba	-	750	15,000	-

*Nota -, indica que no tiene un límite establecido.

Fuente: Elaboración propia, a partir de información extraída de las normas NOM-147, Canadá CCME-2007, EPA EE. UU.-2015 y la Unión Europea-2022.

Anexo 3. Propiedades fisicoquímicas de los perfiles AZU-01 al AZU-06.

Perfiles	Horizontes	Profundidad (cm)	Fragmentos gruesos (%)	Tierra fina (%)	Color (húmedo)	Color (húmedo)	Humedad	Densidad aparente (g/cm ³)	pH KCl	pH H ₂ O	CE (dS/cm)	Carbono orgánico (%)	Materia orgánica %	CIC (cmol/kg)	Textura	% Arcilla	% Limo	% Arena
AZU-01	A	0-8	1.99	98.01	5YR 3/2	Marrón rojizo oscuro	62.85	0.67	4.2	4.8	0.41	8.1	16.3	42.0	Franco arcillosa	27.1	43.5	29.4
	C	8-21	16.32	83.68	10YR 3/3	Marrón oscuro	24.25	1.04	4.5	5.6	0.09	2.2	4.4	22.2	Franco arcilla arenosa	20.2	16.4	63.5
	2Bg	21-40	3.39	96.61	10YR 3/2	Marrón grisáceo muy oscuro	48.41	0.79	4.4	5.4	0.16	4.9	9.7	32.4	Franco limosa	22.7	54.2	23.1
AZU-02	A	0-5	7.67	92.33	10YR 2/2	Marrón muy oscuro	7.17	0.74	5.3	5.9	0.21	2.1	4.2	15.8	Franco arenosa	14.5	14.0	71.5
	C	5-37	1.67	98.33	10YR 5/3	Café	2.66	1.02	4.8	6.2	0.05	0.7	1.3	10.2	Arenosa franca	12.5	4.0	83.5
	2C	37-52	30.32	69.68	10YR 6/2	Gris café claro			4.9	6.8	0.04	0.7	1.5	14.2	Franco arenosa	14.5	2.0	83.5
	3C	52-72	21.46	78.54	10YR 5/3	Marrón	4.40	1.01	4.6	6.1	0.04	0.8	1.5	17.4	Franco arenosa	16.5	8.0	75.5
	4C	72-101	2.34	97.66	10YR 6/3	Marrón pálido	5.44	0.98	4.7	6.4	0.02	0.5	1.0	16.6	Franco arenosa	18.5	5.6	75.8
	5C	101-108	30.10	69.90	10YR 5/3	Marrón			5	6.8	0.02	0.5	0.9	20.6	Franco arenosa	16.5	4.0	79.5
	6C	108-126	2.51	97.49	10YR 6/3	Marrón pálido	7.28	1.10	4.9	6.5	0.04	0.4	0.8	17.4	Franco arenosa	18.5	10.0	71.5
AZU-03	A	0-15	11.55	88.45	10YR 4/2	Marrón grisáceo oscuro	12.67	0.77	3.6	4.6	0.05	1.9	3.7	20.6	Franco arcillo arenosa	22.5	18.0	59.5
	C	15-41	1.20	98.80	10YR 7/2	Gris claro	6.74	0.92	4.1	5.1	0.03	1.2	2.4	19.8	Franco arenosa	18.5	8.0	73.5
	2C	41-63	1.39	98.61	2.5Y 7/3	Amarillo pálido	7.88	0.95	4.5	5.7	0.02	0.7	1.5	4.7	Franco arenosa	14.5	10.0	75.5
	3C	63-90	2.53	97.47	2.5Y 7/2	Gris claro	5.64	0.99	4.8	6.2	0.01	1.0	2.0	43.6	Franco arenosa	14.5	6.0	79.5
	4C	>90	3.69	96.31	2.5Y 7/3	Amarillo pálido	1.91	1.05	4.9	6.5	0.01	0.2	0.4	16.6	Franco arenosa	18.5	6.0	75.5
AZU-04	Ah	0-50	7.20	92.80	10YR 2/1	Negro	45.82	0.63	4.2	4.8	0.06	7.5	14.9	29.3	Franco arcilloso	39.1	32.3	28.6
	B	50-78	9.19	90.81	7.5YR 4/4	Marrón Marrón amarillento claro	36.34	0.80	4.2	5.1	0.02	1.2	2.4	29.3	Arcillosa	46.5	16.0	37.5
	Cw	>78	7.25	92.75	10YR 6/4		15.31	1.19	3.9	5.1	0.02	0.0	0.1	19.8	Arcillosa	40.5	28.0	31.5
AZU-05	Ah	0-19/27	2.83	97.17	10YR 3/3	Marrón oscuro	42.93	0.74	5.2	5.5	0.36	8.8	17.6	47.2	Franco arcillosa	35.1	36.6	28.3
	Bw1	19/27-66	2.70	97.30	7.5YR 5/6	Marrón intenso Marrón amarillento oscuro	18.67	1.09	5.3	6.2	0.03	0.4	0.7	17.3	Franco arcilla arenosa	32.5	20.0	47.5
	Bw2	>66	3.33	96.67	10YR 4/6		11.02	1.36	4.9	5.9	0.02	0.4	0.9	14.2	Franco arcillosa	34.5	28.0	37.5
AZU-06	Ap	0-15	5.85	94.15	10YR 4/2	Marrón grisáceo oscuro	3.18	1.18	4.3	5.1	0.16	0.8	1.6	21.4	Franco arcilla arenosa	28.5	18.0	53.5
	Bg1	15-40	3.58	96.42	7.5YR 4/2	Marrón	6.96	1.64	4.3	5.3	0.1	0.5	1.0	16.6	Franco arcilla arenosa	28.5	14.0	57.5
	Bg2	>40	8.16	91.84	10YR 5/2	Marrón grisáceo	11.71	1.44	5.7	6.6	0.1	0.2	0.3	10.3	Franco arcilla arenosa	22.5	14.0	63.5

Anexo 4. Propiedades fisicoquímicas de los perfiles AZU-07 al AZU-13.

Perfiles	Horizontes	Profundidad (cm)	Fragmentos gruesos (%)	Tierra fina (%)	Color (húmedo)	Color (húmedo)	Humedad	Densidad aparente (g/cm3)	pH kcl	pH h20	CE (ds/cm)	Carbono orgánico (%)	Materia orgánica %	CIC (cmol/kg)	Textura	% Arcilla	% Limo	% Arena
AZU-07	Ap	0-30	2.83	97.17	7.5YR 3/3	marrón oscuro	2.51	1.16	3.7	4.3	0.17	1.3	2.5	29.3	Franco arcilla arenosa	20.5	14.0	65.5
	Bg	30-50	3.30	96.70	7.5YR 3/4	marrón oscuro	14.57	1.11	3.5	4	0.06	0.9	1.8	21.4	Franco arcilla arenosa	24.5	12.0	63.5
	Cgl	50-85	3.55	96.45	10YR 5/4	marrón amarillento	5.08	1.31	3.6	4.5	0.04	0.2	0.3	13.4	Franco arcilla arenosa	20.5	14.0	65.5
	C2	>85	6.37	93.63	10YR 6/4	marrón amarillento claro	12.10	1.17	3.8	4.8	0.04	0.4	0.8	10.3	Franco arcilla arenosa	27.8	10.0	62.2
AZU-08	A	0-25	2.90	97.10	7.5 YR 2.5/2	marrón muy oscuro	2.61	0.99	4.2	5.2	0.02	0.7	1.4	22.2	Franco arcilla arenosa	23.8	16.0	60.2
	B	25-63	1.68	98.32	10YR 4/6	marrón amarillento oscuro	9.03	1.07	4.7	5.9	0.02	0.6	1.2	13.4	Franco arcilla arenosa	31.8	14.0	54.2
	2C	63-70/83	9.41	90.59	10 YR 3/4	oscuro	7.52	1.26	4.8	6.4	0.02	0.6	1.1	11.1	Franco arcilla arenosa	31.8	20.0	48.2
	3B	70/83-110	10.26	89.74	7.5 YR 3/3	marrón oscuro	12.37	1.49	4.3	5.7	0.03	1.0	2.0	11.1	Arcillosa	49.8	22.0	28.2
AZU-09	A	0-10	11.78	88.22	10 YR 2/2	marrón muy oscuro	4.28	0.83	5.0	6	0.09	4.5	9.1	22.8	Franco arcillo arenosa	29.1	15.7	55.2
	B	10-35/47	15.47	84.53	10 YR 3/3	marrón oscuro	5.56	0.90	4.1	5.6	0.02	1.3	2.7	18.2	Franco arcillo arenosa	31.8	16.0	52.2
	BC	35/47-79	7.74	92.26	7.5 YR 3/4	marrón oscuro	11.04	0.88	4.1	5.5	0.03	0.3	0.6	12.6	Franco arcillosa	35.8	28.0	36.2
	C	79-104	12.39	87.61	7.5 YR 4/3	marrón	17.44	0.87	3.8	5.5	0.03	0.3	0.6	13.5	Arcillosa	41.8	36.0	22.2
AZU-10	A	0-7	7.18	92.82	7.5 YR 3/2	marrón oscuro	7.06	0.96	4.8	5.7	0.12	8.9	17.7	28.5	Franco arcilloso	33.1	28.6	38.4
	B1	7-45	2.02	97.98	7.5 YR 3/3	marrón oscuro	5.29	1.01	4.8	6	0.03	0.5	1.1	16.6	Franco arcillo arenosa	27.8	24.0	48.2
	B2	45-63	1.13	98.87	10 YR 4/6	marrón amarillento oscuro	13.07	0.99	4.4	6.1	0.02	0.2	0.5	19.0	Franco arcillosa	33.8	24.0	42.2
	B3	63-82	3.58	96.42	10 YR 4/4	marrón amarillento oscuro	9.94	1.08	4.6	5.8	0.08	0.0	0.1	14.9	Franco arcillosa	29.8	26.0	44.2
	C	82-100	1.74	98.26	7.5 YR 5/6	marrón fuerte	9.79	1.15	4.4	6	0.02	0.1	0.2	7.9	Franco arcilla arenosa	25.8	16.0	58.2
AZU-11	Ap	0-24	18.55	81.45	10 YR 3/3	marrón oscuro	5.89	0.96	5	5.7	0.25	2.0	4.0	12.6	Franco arcilla arenosa	21.8	26.0	52.2
	B	24-40/56	1.79	98.21	10 YR 5/6	marrón amarillento	18.59	0.73	5.6	6.3	0.13	0.5	1.0	14.2	Franca	21.8	30.0	48.2
	2C	40/56-63	1.44	98.56	10 YR 4/6	marrón amarillento oscuro	13.91	0.81	5.5	6.3	0.07	0.5	0.9	8.7	Franco arcilla arenosa	21.8	10.4	67.8
	3Bssl	63-98	14.64	85.36	7.5 YR 2.5/2	marrón muy oscuro	18.52	1.33	5.6	6.6	0.1	0.6	1.2	13.4	Arcillosa	59.8	16.4	23.9
	3Bss2	98-118	0.48	99.52	2.5 YR 3/3	marrón oliva oscuro	21.89	1.57	5.7	6.6	0.09	0.7	1.5	11.8	Arcillosa	59.8	18.4	21.9
AZU-12	A	0-20	2.85	97.15	7.5 YR 2.5/3	marrón muy oscuro	8.22	0.75	5	5.9	0.03	2.5	5.0	22.2	Franco arcillo arenosa	27.1	26.3	46.6
	B	20-74/80	2.97	97.03	10 YR 4/6	marrón amarillento oscuro	13.48	0.85	5	6.1	0.03	1.1	2.2	16.7	Franco arcilla arenosa	20.2	22.0	57.8
	2C	74/80-89/95	1.38	98.62	7.5 YR 5/6	marrón fuerte	10.58	0.73	5.1	6.6	0.02	1.0	1.9	7.1	Franco arcilla arenosa	20.2	22.0	57.8
	3B	89/95-121	1.13	98.87	7.5 YR 3/4	marrón oscuro	18.53	0.82	5.1	6.6	0.03	1.0	1.9	14.2	Arcillosa	44.2	18.0	37.8
AZU-13	A	0-30	7.08	92.92	10 YR 3/2	marrón grisáceo muy oscuro	4.56	0.83	5.8	6.7	0.02	2.1	4.2	22.9	Franco arcillo arenosa	20.2	22.0	57.8
	B	30-75	15.98	84.02	10 YR 4/6	marrón amarillento oscuro	11.06	0.75	4.7	5.7	0.01	0.9	1.7	10.2	Franco arcillo arenosa	20.2	22.0	57.8
	BC	75-108	2.10	97.90	10 YR 6/8	amarillo café	19.50	0.64	4.8	5.5	0.01	0.9	1.9	13.5	Franca	18.2	34.0	47.8
	2C	108-121	3.10	96.90	2.5 Y 5/4	marrón oliva claro	10.92	0.78	4.8	6	0.01	0.6	1.2	9.5	Franca	18.2	36.0	45.8

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio	
Título del trabajo	"Evaluación de la retención/movilización de elementos potencialmente contaminantes en los suelos de la zona del Campo Geotérmico Los Azufres"	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Tzeltzin Sanchez Magaña	1210427j@umich.mx
Director	María Lourdes González Arqueros	lourdes.gonzalez@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Boris Chaco Tchamabe	mae.geociencias.planificacion.territorio@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Tzeltzin Sánchez Magaña 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán 12 de Enero 2024

Tzeltzin Sánchez Magaña

Evaluación de la retenciónmovilización de elementos potencialmente contaminantes en los suelos de la zona del Ca...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:546168458

Fecha de entrega

14 ene 2026, 9:52 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

14 ene 2026, 1:20 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Evaluación de la retenciónmovilización de elementos potencialmente contaminantes en los suel....pdf

Tamaño del archivo

4.6 MB

77 páginas

15.196 palabras

80.084 caracteres

12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
304 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
116 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.