



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**“Evidencias de dispersión de jales mineros sobre
un transecto en suelos de la región de Zimapán
Hidalgo.”**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA

Biol. Diana Valeria Zúñiga Vázquez

TUTOR

Dra. María Aurora Armienta Hernández
(Instituto de Geofísica, UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dra. Lucy Natividad Mora Palomino (Instituto de Geología, UNAM)
Dra. Isabel Pérez Martínez (Instituto de Geofísica, UNAM)
Dr. Lorenzo Vázquez Selem (Instituto de Geografía, UNAM)
Dr. Carles Canet Miquel (Instituto de Geofísica, UNAM)

Ciudad Universitaria, CDMX

Mayo, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

"Take your broken heart, make it into art"
Carrie Fisher

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Aurora Armienta. Por su apoyo incondicional, sus consejos y toda la paciencia que se necesitó para culminar este segundo logro académico. Gracias por ser una excelente tutora y ejemplo a seguir.

A Alejandra Aguayo, Olivia Cruz, Nora Cenicerros y Lucas Rodríguez. Por su gran trabajo, apoyo y tiempo que me han compartido.

A mis compañeros del Laboratorio de Química Analítica, Alexia Garduño, Azucena Dotor, María de Jesús Guadarrama, Queilenin Ramos, Antonio Sosa, Esther Ruíz, Oswaldo Sánchez, Israel García y Maribel Manzo.

A Joel Estrada y Miguel Rosales por su apoyo en campo.

A la Maestra Patricia Girón y el Laboratorio de Difracción de rayos X por el apoyo brindado en los análisis requeridos.

Al Dr. René Alcalá y al M. en C. Arturo Atilano del Laboratorio de Física de Suelos por el apoyo brindado en los análisis de textura.

Al comité académico y jurado. Dra. Silke Cram, Dra. Lucy Mora, Dra. Isabel Pérez, Dr. Lorenzo Vázquez y Dr. Carles Canet.

A la Dra. Nuria Segovia por el apoyo otorgado a través de la colaboración como ayudante de investigador SNI III.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra por el alto nivel educativo y la libertad académica.

A CONACyT por la beca otorgada para realizar los estudios de maestría.

DEDICATORIAS

A mis padres, Lulú y Enrique, siempre a ustedes, codo a codo, mano a mano.
Contra viento y marea. Son la luz que me guía en la oscuridad. Gracias por el tiempo, la paciencia y el amor. Ni 100 vidas me alcanzarían para pagarles todo lo que me han dado. Los amo.

Kike, Montse y Sonia. Son mi cabeza, mi corazón, mi conciencia, mis compañeros y mis mejores amigos, lo que se define como "imprescindible".
Solos no sabemos nada, juntos lo entendemos todo.

A mis coachs y amigos de AR/Triboo. Por que corrieron detrás de mi cuando tenia que huir, a mi lado cuando no podía mas y delante de mi para enseñarme que los límites no estaban donde pensaba.

Daniel, Yari, Juls y Alex, aún a miles de kilómetros siempre se hacen cercanos.

Anahí, Raquel y Vero, sin su amistad, amor y paciencia no lo hubiera logrado.
Gracias por sostenerme y volverse la mejor motivación para jamás dejar de correr.

Tony, mi hilo rojo de la amistad, no necesito decir más, ya lo sabes todo.

A mis pumitas, Juan Pablo, Irvin, Ricardo, Armando, Claus, Ro, Shei, Pam, Jordi, Leo, Edgar, Jon, Manuel y todos los intermitentes, hacen del futbol un pretexto para crear recuerdos y experiencias increíbles... GOYA UNIVERSIDAD!

Amigos con mención honorífica, por llegar a mi vida pisando bien fuerte...
Vianey, Darío, Leslie, Luka, Shardey, Daniela, Donají, Aldahir, Irlanda, Denisse, Andrea, Chris, Karla, Oscar, Iván, José Alberto, Erick, Miguel y Manuel.
Sin importar el tiempo o la lejanía siempre serán una extensión de mi corazón.

A mi familia Zúñiga-Vázquez, siempre la frente en alto, nunca olvidando de donde vengo, para no olvidar a donde voy, soy muy afortunada de tenerlos.

A los tantos personajes que han compartido un momento de su vida conmigo.
Un café, un kilometro, una comida, un instante. Gracias por existir.

A ustedes, mi "jiu" y Adrián. A ustedes mas que a nadie. Su ausencia me rompió, pero su recuerdo me fortalece. Siempre en mi pensamiento, en cada paso, en cada lagrima, en cada éxito y cada risa. Con todo mi amor, donde sea que estén.

Índice

1	INTRODUCCIÓN	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	GENERAL	16
2.2	PARTICULARES	16
3	HIPÓTESIS	17
4	ANTECEDENTES	18
5	JUSTIFICACIÓN	19
6	MARCO TEÓRICO	20
6.1	PANORAMA MINERO EN MÉXICO	20
6.2	MINERÍA Y MEDIO AMBIENTE	22
6.3	DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINEROS (JALES) Y SU DISPERSIÓN	25
6.4	IMPACTO DE LA MINERA EN EL SUELO	29
6.5	ARSÉNICO	32
6.6	CADMIO Y ZINC	34
6.7	PLOMO	36
6.8	HIERRO	36
6.9	AZUFRE	39
7	ZONA DE ESTUDIO	41
7.1	MUNICIPIO DE ZIMAPÁN, HGO (INEGI, 2009).	41
7.2	FISIOGRAFÍA REGIONAL	42
7.3	MINERALOGÍA DE LA ZONA	43
7.4	EDAFOLOGÍA	44
8	METODOLOGÍA	46
8.1	SELECCIÓN, DESCRIPCIÓN DEL SITIO Y MUESTREO	46
8.2	PREPARACIÓN DE MUESTRAS	48
8.3	COLOR	49
8.4	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (TEXTURA)	50
8.5	MATERIA ORGÁNICA	51
8.6	ALCALINIDAD EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO (OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- MG/L) Y CARBONATOS (MG/KG)	52
8.7	PH/CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	53
8.8	DENSIDAD REAL	53
8.9	DENSIDAD APARENTE	53
8.10	ESPACIO POROSO	54
8.11	DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN TOTAL DE METALES PESADOS (Cd, Pb, Fe, Zn) Y ARSÉNICO (As)	55
8.12	AZUFRE POR CALCINACIÓN	55

9	RESULTADOS	57
9.1	PERFIL ZIM 1	59
9.2	PERFIL ZIM 2	62
9.3	PERFIL ZIM 3	66
9.4	PERFIL ZIM 4	69
9.5	PERFIL ZIM 5	72
9.6	PERFIL ZIM 6	75
9.7	PERFIL ZIM 7	78
10	ANÁLISIS DE RESULTADOS	82
10.1	DENSIDAD REAL Y DENSIDAD APARENTE	82
10.2	ESPACIO POROSO Y CONTENIDO SUPERFICIAL DE ARCILLAS	83
10.3	CONDUCTIVIDAD (MS/CM) Y PH	84
10.4	ALCALINIDAD EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO Y CARBONATOS	85
10.5	AZUFRE, CADMIO, PLOMO, HIERRO, ZINC Y ARSÉNICO (MG/KG)	86
10.6	MATERIA ORGÁNICA	88
10.7	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON	89
10.8	MINERALES POR PERFILES Y HORIZONTES	91
12	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	97
13	CONCLUSIONES	100
14	RECOMENDACIONES	102
	BIBLIOGRAFÍA	103
15	ANEXOS	110
15.1	DESCRIPCIÓN DE HORIZONTES	110
15.1.1	PERFIL ZIM 1	110
15.1.2	PERFIL ZIM 2	111
15.1.3	PERFIL ZIM 3	113
15.1.4	PERFIL ZIM 4	114
15.1.5	PERFIL ZIM 5	116
15.1.6	PERFIL ZIM 6	117
15.1.7	PERFIL ZIM 7	119
15.2	ÍNDICE DE RECUPERACIÓN	121
15.3	DATOS NUMÉRICOS OBTENIDOS	122
15.4	DIAGRAMAS DE FLUJO PARA ELABORACIÓN DE TÉCNICAS	125
15.4.1	DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINAR TEXTURA POR EL MÉTODO DE LA PIPETA	125
15.4.2	DIAGRAMA DE FLUJO PARA REALIZAR MATERIA ORGÁNICA	125
15.4.3	DIAGRAMA DE FLUJO PARA REALIZAR ALCALINIDAD	126
15.4.4	DIAGRAMA DE FLUJO PARA CONTENIDO TOTAL DE CARBONATOS	126
15.4.5	DIAGRAMA DE FLUJO PARA REALIZAR ANÁLISIS DE PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	127
15.4.6	DIAGRAMA DE FLUJO PARA DETERMINAR DENSIDAD REAL	127
15.4.7	DIAGRAMA DE FLUJO PARA HACER DENSIDAD APARENTE	128
15.4.8	DIAGRAMA DE FLUJO PARA REALIZAR DIGESTIÓN EN HORNO DE MICROONDAS	128
15.5	DIFRACTOGRAMAS	129
15.5.1	ZIM 1	129

15.5.2	ZIM 2	132
15.5.3	ZIM 3	141
15.5.4	ZIM 4	144
15.5.5	ZIM 5	150
15.5.6	ZIM 6	155
15.5.7	ZIM 7	159
15.6	DESCRIPCIÓN BREVE DE MINERALES ENCONTRADOS	165

INDICE DE FIGURAS

PÁGINA

Figura 1. Modelo de funcionamiento del ciclo minero.	20
Figura 2. Diagrama de producción minera en México.	21
Figura 3. Dispersión de los contaminantes desde un “almacén” hacia el medio ambiente.	27
Figura 4. Imagen ilustrativa del tamaño de partícula.	27
Figura 5. Transporte y movilidad de partículas por acción del viento.	28
Figura 6. Movilización natural de Elementos Potencialmente Tóxicos por acción de agua y del viento.	28
Figura 7. Descripción general de un perfil de suelo.	30
Figura 8. Diagrama E _n -pH para especies acuosas de As en un sistema As-O ₂ -H ₂ O a 25°C y 1 bar de presión.	32
Figura 9. Porcentaje total soluble de Zinc en función del pH en tres suelos con diferente textura.	35
Figura 10. 2016 Digital Globe. Google Earth INEGI. Visualización de las principales zonas de deposición de jales en Zimapán Hidalgo.	42
Figura 11. Fragmento tomado de la Carta Geológica 14Q-e(7) “Hoja Zimapán” 1 : 100,000. Elaborada por Miguel Carrillo-Martínez. Instituto de Geología, donde el cuadro resaltado ubica de manera aproximada la zona de muestreo.	43
Figura 12. Mapa ilustrativo de la edafología de Zimapán, Hgo. Elaborado con cartas del INEGI (Tecozautla F-14-C-68- <i>Hidalgo</i> y San Joaquín F-14-C-58- <i>Querertaro</i>), 1974 (clasificación de la FAO).	45
Figura 13. Mapa de suelos dominantes en la región de Zimapán, Hgo. (INEGI, 2009) y localización de puntos de muestreo, debajo, la imagen ilustrativa del muestreo (las rocas significan paso de río temporal y los números inferiores la distancia de un punto a otro).	47
Figura 14. Código Munsell: Matiz, brillo y croma. Colores claros en la parte superior, oscuros en la inferior, pálidos a la izquierda y vivos a la derecha. En (Porta, López-Ácevedo, & Poch, 2014) Por C. Roquero.	49
Figura 15. Relación de los constituyentes de tierra fina por tamaño, definiendo las clases texturales.	50
Figura 16. Diagrama de flujo analítico del manual LECO S-144DR.	56
Figura 17. Modificación de figura 14 ubicando los puntos de muestreo para introducir a los resultados.	58
Figura 18. Fotografía del perfil de suelo Zim 1 con escala.	59
Figura 19. Diagramas que muestran el cambio de características como densidad real (DR), densidad aparente (DA), espacio poroso, porcentaje de arcillas, parámetros físico químicos (pH, conductividad), así como alcalinidad carbonatos y porcentaje de materia orgánica (MO); a diferente profundidad del perfil Zim 1.	60
Figura 20. Diagramas de contenido de (A) azufre (calcinación), (B, C, D, E) metales pesados y (F) arsénico a profundidad en Zim 1.	61
Figura 21. Fotografía del perfil de suelo Zim 2 con escala.	62
Figura 22. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad en el perfil Zim 2.	64

Figura 23. Diagramas de contenido de (A)azufre (calcinación), (B,C,D,E)metales pesados y (F)arsénico (digestión en horno de microondas) a profundidad en Zim 2.	65
Figura 24. Fotografía del perfil de suelo Zim 3 con escala.	66
Figura 25. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad del perfil Zim 3.	67
Figura 26. Diagramas de contenido de azufre, arsénico y metales pesados (cadmio, zinc, hierro y plomo) a profundidad en Zim 3.	68
Figura 27. Fotografía del perfil de suelo Zim 4 con escala.	69
Figura 28. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad del perfil Zim 4.	70
Figura 29. Diagramas de contenido de azufre, arsénico y metales pesados (cadmio, zinc, hierro y plomo) a profundidad en Zim 4.	71
Figura 30. Fotografía del perfil de suelo Zim 5 con escala.	72
Figura 31. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad del perfil Zim5.	73
Figura 32. Diagramas de contenido de azufre, arsénico y metales pesados (cadmio, zinc, hierro y plomo) a profundidad en Zim 5.	74
Figura 33. Fotografía del perfil de suelo Zim 6 con escala.	75
Figura 34. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad del perfil Zim6.	76
Figura 35. Diagramas de contenido de azufre, arsénico y metales pesados (cadmio, zinc, hierro y plomo) a profundidad en Zim 6.	77
Figura 36. Fotografía del perfil de suelo Zim 6 con escala.	78
Figura 37. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad del perfil Zim7.	80
Figura 38. Diagramas de contenido de azufre, arsénico y metales pesados (cadmio, zinc, hierro y plomo) a profundidad en Zim 7.	81
Figura 39. Diagramas de relación profundidad/densidad real y profundidad/espacio poroso entre los puntos de muestreo.	82
Figura 40. Diagramas de relación profundidad/densidad aparente y profundidad/%arcillas entre los puntos de muestreo.	83
Figura 41. Diagramas de relación profundidad/conductividad y profundidad/pH entre los puntos de muestreo.	84
Figura 42. Diagramas de relación profundidad/CaCO ₃ , profundidad/HCO ₃ ⁻ , profundidad/CO ₃ ²⁻ y profundidad/carbonatos ^{mg/kg} entre los puntos de muestreo.	85
Figura 43. Diagramas de relación profundidad/cadmio, profundidad/zinc, profundidad/Hierro, profundidad/plomo, profundidad/azufre y profundidad/arsénico entre los puntos de muestreo.	87
Figura 44. Diagramas de relación profundidad/materia orgánica entre los puntos de muestreo.	88

INDICE DE TABLAS	<u>PÁGINA</u>
Tabla 1. Interrelaciones de la actividad minera con el ambiente.	22
Tabla 2. Problemáticas primarias entre la industria minera y el medio ambiente.	24
Tabla 3. Órdenes de magnitud de los contenidos de metales en la litósfera y en los suelos.	26
Tabla 4. Sumario de especies de plantas estudiadas en sitios contaminados (Hooda, 2010).	33
Tabla 5. Concentraciones de Cd y Zn en suelos agrícolas en Reino Unido y Estados Unidos.	34
Tabla 6. Promedio de concentraciones de plomo en rocas de diferente tipo.	36
Tabla 7. Formas de hierro en el suelo.	37
Tabla 8. Resumen de las formas en que se encuentra el azufre en el suelo.	39
Tabla 9. Valores promedio de materia orgánica en suelos.	51
Tabla 10. Relación de alcalinidad y cálculo de concentraciones.	52
Tabla 11. Relación de valores de la densidad aparente relacionados con el espacio poroso y la parte sólida de diferentes tipos de suelos.	54
Tabla 12. Nomenclatura de horizontes.	57
Tabla 13. Donde pH (potencial hidrógeno), mS (conductividad), DR (densidad real), DA (densidad aparente), EP (espacio poroso), CC (CaCO ₃), BC (HCO ₃ ⁻), MO (materia orgánica), Ca (CO ₃ ²⁻), CCs (carbonato de calcio en mg/kg), AR (arcillas), As (arsénico), Cd (cadmio), Pb (plomo), Fe (hierro), Zn (zinc) y Dis (distancia entre el punto de muestreo y los depósitos de jales).	90
Tabla 14. Minerales presentes en cada perfil.	91
Tabla 15. Minerales presentes en cada horizonte de cada perfil, clasificados como (S) seguros, (P) probables y (PP) poco probables.	94

INDICE DE CUADROS	<u>PÁGINA</u>
Cuadro 1. Factores que influyen en la toxicidad de los metales en solución.	25
Cuadro 2. Caminos químicos para la formación y transformación de óxidos de hierro en el suelo.	38
Cuadro 3. Formas y transformaciones de azufre en el sistema suelo-planta.	40
Cuadro 4. Diagrama de flujo del procedimiento a seguir para un levantamiento de suelos.	46
Cuadro 5. Diagrama para identificar el tipo de muestra que se usó para cada análisis por su tamaño de partícula.	48
Cuadro 6. Fórmula para calcular el espacio poroso del suelo.	54

RESUMEN

En el proceso de extracción y purificación de minerales se obtienen residuos llamados “jales” que al estar expuestos a las condiciones ambientales y por sus características específicas pueden contaminar el medio ambiente circundante por medio de la dispersión eólica y pluvial, aunado a sus procesos de oxidación que dan origen a soluciones con bajos pH y altos contenidos de elementos potencialmente tóxicos como metales y metaloides (drenaje ácido de mina). Zimapán, Hgo. es una localidad en México, donde la extracción minera existe desde mediados de siglo pasado y ha llevado a la acumulación de grandes volúmenes de jales, por lo que su dispersión ha afectado de manera importante la estabilidad y calidad del medio ambiente. Por la intensa actividad minera y la liberación de drenaje ácido de mina (DAM) proveniente de los jales, es posible que los suelos, hayan disminuido en su capacidad de amortiguamiento y modificado sus características edáficas. Este trabajo plantea hacer un análisis de diversas propiedades físicas y químicas del suelo en sitios con diferencias fisiográficas, de uso de suelo, vegetación, pendiente, etc., a lo largo de un transecto, con el objetivo de obtener evidencias de la dispersión y depositación de los jales en el suelo. El punto de partida del transecto fue la zona de convergencia de los mayores depósitos de jales, ubicado en la orilla de la zona urbana de Zimapán, sobre el cual se seleccionaron 7 puntos de muestreo donde se hicieron calicatas que después se dividieron por horizontes, para así, realizar la descripción de sus características intrínsecas y tomar muestras simples. Los análisis que se realizaron fueron textura (horizontes superficiales), materia orgánica, alcalinidad en la solución del suelo, espacio poroso, carbonatos, pH, conductividad eléctrica, densidad real, densidad aparente, contenido de azufre por calcinación y absorbancia en el infrarrojo, contenido de As, Cd, Pb, Fe y Zn total, así como un análisis mineralógico por difracción de rayos X. Al comparar los resultados obtenidos de los 7 perfiles a través de métodos gráficos y estadísticos se determinó que los análisis de densidad real y espacio poroso son buenos indicadores de dispersión y acumulación de jales ya que sus valores se elevan significativamente en las zonas cercanas a los depósitos, que la conductividad también disminuye en superficie y que el pH no parece un parámetro relevante (todos tienen tendencia alcalina) pero que estadísticamente está relacionado inversamente con las concentraciones de Cd y Zn; la disminución en los valores de alcalinidad y el contenido de carbonatos en la solución del suelo es derivado de su función como amortiguadores debido a las reacciones ácido-base que se generan al depositarse un medio ácido en los horizontes superficiales del suelo (a excepción de Zim6, donde la materia orgánica puede estar jugando un papel importante en procesos de quelatación y/o buffer y Zim5 donde el pH es muy alto y el contenido de carbonatos es mayor a todos los demás perfiles). El análisis de elementos potencialmente tóxicos es la mayor evidencia de depositación de jales en suelos donde se encontraron valores muy altos a nivel superficial, en contraste con los encontrados a mayor profundidad en cada uno de los perfiles, donde el margen de diferencia entre los horizontes superficiales y el resto del perfil se incrementa en función de la cercanía a los depósitos.

1 INTRODUCCIÓN

En la extracción de minerales (principalmente los sulfurados) se generan residuos conocidos como jales, que contienen una alta cantidad de elementos potencialmente tóxicos (EPT) que con el paso del tiempo y al estar expuestos a condiciones ambientales, se oxidan (sulfuros metálicos) y pueden derivar en la generación de soluciones con bajos valores de pH y altas concentraciones de EPT, conocidas como drenaje ácido de mina (Guitierrez-Ruiz et.al., 2007). Estas condiciones favorecen la movilidad de contaminantes en el área circundante y aumentar el riesgo de contaminar de manera importante el suelo, el agua y la atmósfera. Estos residuos mineros pueden dispersarse por medios físicos (eólico y pluvial) y aumentar su movilidad química de tal forma que al interactuar con otras fases del suelo den origen a una mineralogía secundaria gracias a procesos como la precipitación (Nordstrom & Alpers, 1999); pero la reactividad de los minerales presentes en cada jal dependerá del tipo de yacimiento explotado, los parámetros fisicoquímicos y los factores climáticos. Además de lo anterior, estudios de extracción secuencial han mostrado que la composición mineral es un factor determinante para la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos tanto en suelos (Li & Thornton, 2001) como en los jales a través del tiempo (Kossoff et.al., 2014).

Es por eso que en este trabajo se abordan los cambios en las características del suelo como consecuencia de su exposición a la dispersión y depósito de los jales mineros, para poder identificar si las diversas variables analizadas pueden o no servir de evidencia de la degradación de suelo (pérdida de utilidad actual o potencial, con lo que a medida que la degradación progresa) y ser capaz de realizar cada vez menos funciones y servicios de los que se podrían esperar del mismo, disminuyendo la resistencia a los cambios en la concentración de iones (capacidad de amortiguamiento) (Porta, López-Ácevedo, & Poch, 2014).

En el distrito Minero de Zimapán, las presas de jales San Miguel, Santa María y El Monte contienen residuos generados de un yacimiento tipo skarn Zn-Pb-Ag-(Cu),

que se han acumulado por más de 50 años (Moreno Tovar, Barbanson, & Coreño Alonso , 2009) y han estado en contacto directo con el suelo, afectando de manera importante la estabilidad y calidad ambiental del mismo (Jiménez Arévalo, 2008); en este caso la dispersión eólica puede convertirse en un problema importante de salud en los alrededores de las zonas de acumulación de los residuos, dado que no existe una dirección de viento preferencial en la zona debido a las cadenas montañosas que rodean al valle por la parte norte (Sierra Madre Oriental), sur (Eje Neo-Volcánico) y cerros aislados al interior del valle (Randell, 2008).

De ahí nace la importancia de un análisis a detalle, viendo al suelo como un objeto de estudio complejo, donde los elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Pb, Fe y Zn) no sean la única variable que nos ayude a identificar la problemática con la contaminación de suelos a causa de jales mineros, si no abordarlo desde un punto de vista edafológico y geoquímico, para poder obtener información importante que nos abra el panorama a estudios con este enfoque en otras localidades con diferentes tipos de suelo.

2 OBJETIVOS

2.1 General

Analizar diferentes variables (características físicas, químicas y mineralógicas) figurándolas como evidencias de dispersión y depositación de jales mineros en suelos, a partir de un transecto que tenga como punto de partida la zona de deposición de los mismos, para poder determinar cuál (o cuáles) serían los mejores indicadores de dicha dispersión.

2.2 Particulares

- Realizar una descripción detallada de los perfiles de suelos (características intrínsecas) dividiéndolos en horizontes.
- Caracterización física y química de los suelos: color (Munsell), pH y conductividad eléctrica, densidad real, densidad aparente y espacio poroso.
- Determinar la concentración de elementos potencialmente tóxicos (EPT) totales (As, Cd, Pb, Fe y Zn) por medio de la digestión en horno de microondas con agua regia y análisis por espectrofotometría de absorción atómica.
- Determinar la mineralogía en cada uno de los perfiles a través del análisis por difracción de rayos X.
- Determinar la alcalinidad en la solución del suelo.
- Determinar la concentración de azufre.
- Determinar la textura en horizontes superficiales, así como las concentraciones de materia orgánica y carbonatos.
- Correlación de Pearson entre cada una de las variables.

3 HIPÓTESIS

La depositación de jales mineros en el suelo, resultado de la exposición a fenómenos de dispersión, tanto gravitacional por el arrastre de los ríos temporales como por la suspensión próxima y lejana ocasionada por el viento, se verá reflejada en el cambio de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, ya sea solo en superficie o a lo largo del perfil, según las características intrínsecas de cada sitio, así como su posición en el paisaje.

Se espera poder establecer la relación entre cada una de las variables para poder determinar cual o cuales podrían usarse como evidencias de la dispersión y depositación de las partículas provenientes de los jales y poder llegar a la conclusión sobre cual es el impacto ambiental que se está generando con este fenómeno, no solo para los elementos potencialmente tóxicos, si no también a las propiedades del suelo.

4 ANTECEDENTES

Zimapán Hidalgo se ha convertido en un sitio de gran preocupación ambiental y de importancia para diversos estudios por los altos contenidos de elementos potencialmente tóxicos en el área, tanto por la contaminación antrópica (principalmente la minería) como por la geología regional (Rodríguez, Ramos, & Armienta, 2004), afectando la calidad del agua subterránea (Armienta et al., 1997) y la concentración de EPT's en el suelo (Reyes Cruz et al. , 2008) así como la movilidad de los mismos (afectada por los cambios de pH debido a la edad de los jales que están en contacto directo) (Armienta et al., 2015). Esto ha desencadenado que la población tenga que invertir en tratar el agua extraída de pozos profundos para consumo humano (Flores et al., 2009), y no solo eso, sino también se vean desfavorecidos en el área agrícola, ya que esa misma agua es empleada para riego y ha presentado alta cantidad de arsénico (entre otros EPT) (Prieto García et al., 2006) afectando el suelo, el desarrollo agrícola y aumentando la concentración de contaminantes en cultivos, por ejemplo, en el maíz (Ramos Villegas & Hernández Viveros, 2014), habas y cebada cervecera (Prieto García et al., 2007) que se siembran en la zona. En cuanto a la edafología, la información es muy escasa y antigua, sin embargo hay estudios en los cuales se ha caracterizado el suelo con un enfoque geoquímico donde se relaciona el cambio en las características del suelo (mineralogía, pH, texturas y contenido de elementos potencialmente tóxicos) con la contaminación minera (Jiménez Arévalo, 2008).

5 JUSTIFICACIÓN

Existen propiedades físicas, químicas y mineralógicas en los suelos que determinan la movilidad y solubilidad de los elementos tóxicos (García & Dorronsonoro , 2002), relacionadas directamente con su origen (natural o antrópico) y tiempo de residencia en otros ambientes (aire, agua) (Bautista Zúñiga, 1999), donde la interacción entre los elementos potencialmente tóxicos y los componentes del suelo como las arcillas, oxihidróxidos, materia orgánica, carbonatos, etc., determinan los procesos dentro del sistema (adsorción, sustitución, quelación, precipitación, oxidación, reducción, etc.), causando contaminación y degradación física, biológica y química del mismo (Ruda de Schenquer et al., 2004). La alteración de los suelos se puede manifestar con clases texturales desequilibradas¹, ausencia o baja presencia de estructura edáfica, propiedades químicas anómalas², disminución o desequilibrio en el contenido de nutrientes, ruptura de ciclos biogeoquímicos, dificultad de enraizamiento, baja capacidad de intercambio catiónico y de retención o filtración de agua, así como presencia de compuestos tóxicos (Puga, Sosa et al., 2006)(N. Campillo et al., 2000).

Los residuos mineros o “jales” contienen una alta cantidad de elementos potencialmente tóxicos (metales pesados, arsénico, etc.) que pueden generar drenaje ácido de mina con un pH ácido (en algunos casos cercano a 2) (Zúñiga Vázquez, 2014), que en contacto directo con el suelo y expuestos a los procesos ambientales produce lixiviación de elementos y iones, acidificación e incluso cementación, “esterilizando” grandes cantidades de terreno y vulnerando la calidad ambiental de la zona afectada, de ahí nace la importancia del estudio del suelo en Zimapán, donde la presencia de la minería es de relevancia histórica y las consecuencias de estar en contacto directo con jales mineros son relevantes en estudios de este tipo, así como en muchas zonas del país.

¹ La minería produce una selección de las partículas por tamaño, quedando materiales homométricos (granos de tamaño similar).

² Números extremos en parámetros principales.

6 MARCO TEÓRICO

6.1 Panorama minero en México

La minería es una actividad de importancia global, ya que el uso de minerales es imprescindible para cualquier proceso industrial, por lo que con el aumento de la población, así como el desarrollo de diferentes tecnologías han hecho que la demanda aumente y con ello el uso de técnicas cada vez más complejas para la extracción de los mismos (Figura 1).

Desde el México prehispánico, la riqueza minera ha sido pilar en la economía nacional (hasta la actualidad, en conjunto con el petróleo) ubicándose en el cuarto lugar en generación de divisas a nivel mundial en el periodo de 2011 a 2014 (Dolbear, 2014) detrás de Canadá, Australia, Estados

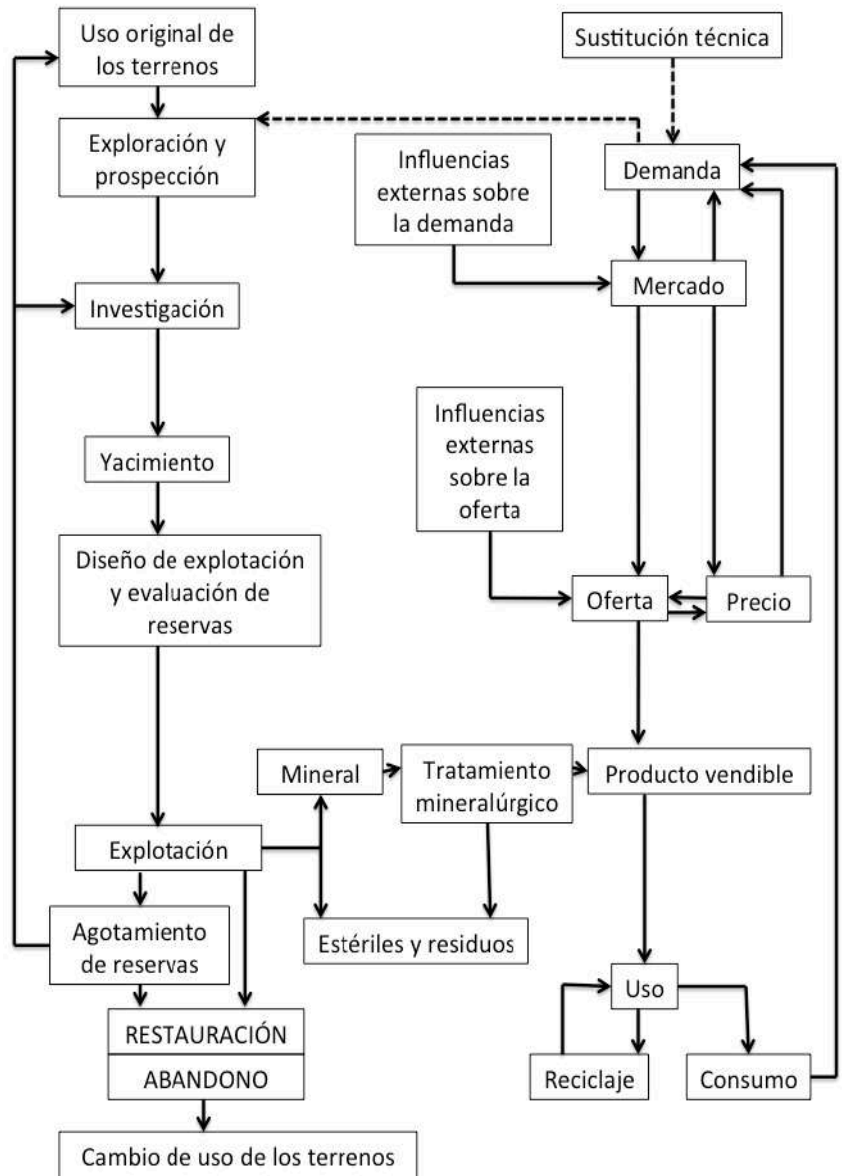


Figura 1. Modelo de funcionamiento del ciclo minero (Instituto Geológico y Minero de España , 2004).

Unidos y Chile. México se ha colocado como líder mundial en la producción de plata (Guadarrama-Yáñez, 2014), lo que ha convertido a nuestro país en un punto importante para la extracción de diversos minerales (Figura 2).

El valor de la producción minera en el año 2016 fue de 543.000 millones de pesos, 221.000 procedentes de los minerales metálicos y 80.000 de la producción de metales preciosos según el Servicio Geológico Mexicano (Aleida Azamar , 2017) resultado de las diferentes reformas legales y fiscales que se han hecho (ley minera de 1992, sus consecuentes -1996, 2007, 2013, 2014-, TLC y la ley de inversión extranjera directa).

Por lo que se han flexibilizado las exigencias gubernamentales y convertido al país en una zona que necesita mucha atención en el área ambiental y social, dado que la ley que rige a la industria minera es muy laxa y no hace diferencia entre exploración y explotación, sobreponiendo su importancia a cualquier tipo de uso de suelo (Ramírez , 2013), lo que ha desencadenado 35

focos rojos en todos el país (principalmente en los estados de San Luis Potosí, Oaxaca, Michoacán y Guerrero) debido a que la población no es consultada y a veces es obligada a malbaratar parte de sus terrenos (Ramírez , 2013).

También se han provocado daños ambientales irreversibles por la poca estabilidad y seguridad en todo el proceso que conlleva la extracción de

algún mineral, entre las que se destacan la deforestación anual de 500 mil hectáreas de bosques y selvas, la contaminación de ríos y suelos así como el daño irreparable a las especies endémicas de diversas zonas (Fuentes Nava, 2017).



Figura 2. Diagrama de producción minera en México (CAMIMEX, 2013).

6.2 Minería y medio ambiente

El medio ambiente se define como un conjunto de factores (físicos, químicos, biológicos y sociales) que tiene un efecto en los seres vivos y sus actividades, es parte de un todo pero no tiene límites definidos, por lo que la minería lo afecta de manera importante y significativa desde la etapa de prospección hasta la de fundición (Tabla 1) sumado a que es una de las actividades humanas que libera mayor cantidad de elementos potencialmente tóxicos (EPTs).

Tabla 1. Interrelaciones de la actividad minera con el ambiente (Volke Sepúlveda, Velasco Trejo, & de la Rosa Pérez, 2005).

ETAPA	DESCRIPCIÓN	IMPACTO AL AMBIENTE
<i>Prospección</i>	Estudios de gravimetría, geología superficial, densidad, etc.	Procedimientos que no generan impactos ambientales significativos
<i>Exploración</i>	Barrenación, obras y perforaciones, construcción de caminos, instalación de campamentos.	Dstrucción de la vegetación.
<i>Explotación y beneficio</i>	Descapote: Eliminación de suelo y vegetación. Construcción y obras diversas (tiros, socavones, patios de depósito). Alto consumo de agua. Acumulación de material sin valor en terreros. Transporte del material con valor hacia molinos. Extracción y concentración del mineral por trituración y molienda. Tratamientos previos a una fusión primaria o electrodeposición.	Dstrucción de capa de suelo y vegetación. Afectación a cuerpos de agua. Generación de terreros inestables. Generación de jales o colas. Ecurrimientos y arrastres de residuos. Oxidación de minerales insolubles y formación de sustancias solubles con alto contenido de metales (DAM). Descarga de lixiviados que contienen iones metálicos y reactivos tóxicos.
<i>Fundición y refinación</i>	Obtención de metales y sus aleaciones con el uso de hornos industriales. Eliminación de impurezas en los metales para alcanzar una alta ley de contenido.	Generación de aguas residuales y residuos peligrosos.

En la Tabla 2 se pueden resumir las principales problemáticas que giran en torno a la minería y el medio ambiente reportadas por varios autores, donde se explica su origen y en algunos de los puntos se hacen recomendaciones, esto para poder visualizar el alcance que tiene la industria y su impacto en diversas áreas.

Un ejemplo de esto es el que se da en Estados Unidos, donde la extracción y procesamiento de materias primas consume el 25% de toda la energía eléctrica generada, por lo que se tienen que emplear una serie de pasos para darle un aprovechamiento eficiente (Instituto Geológico y Minero de España , 2004) para así disminuir el impacto ambiental y social:

1. Legislación ambiental (parte 1): aplicación de las leyes ambientales y de seguridad para así tratar de disminuir el impacto ambiental producido.
2. Aprovechamiento integral de las materias primas y Reciclado de materiales de desecho: Lo que se considera un residuo durante el procesamiento y concentración de las menas puede ser empleado en otras áreas como en la de construcción.
3. Utilización eficiente de la energía: Usar la tecnología a nuestro favor para la producción masiva de nuevos materiales.
4. Explotación racional de los yacimientos: El mejor conocimiento geológico de los yacimientos y un buen diseño de explotación genera mejores rendimientos.
5. Planificación del abastecimiento de minerales: Elaboración de planes de abastecimiento a partir de las proyecciones de crecimiento de la población y su demanda, de la mano de alternancia de fuentes.
6. Legislación ambiental (parte 2): aplicación de medidas correctoras sobre las alteraciones, así como la recuperación de terrenos.

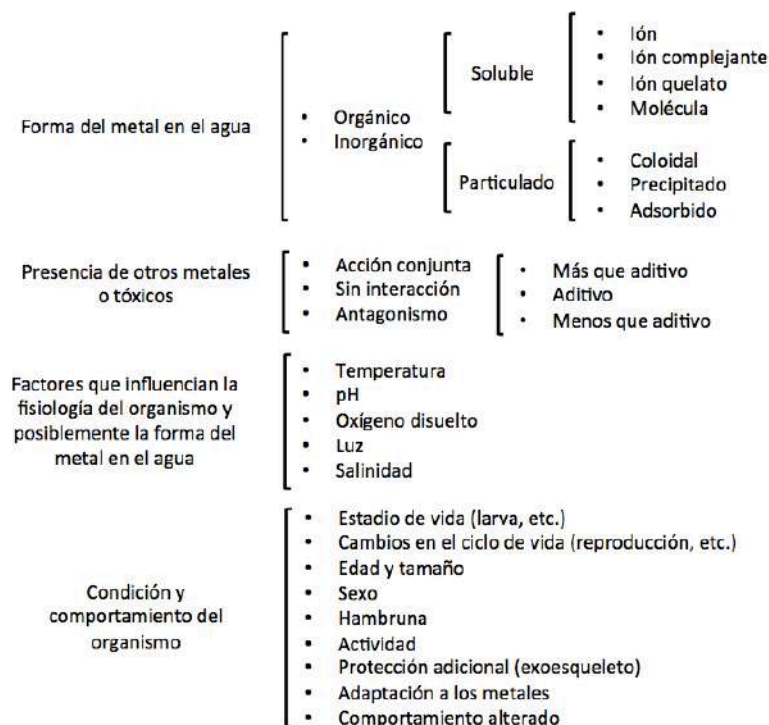
Toda esta problemática se resume a entender que la minería es una industria indispensable en el desarrollo social, tecnológico y económico del mundo, teniendo claro que su práctica es severamente agresiva para el medio ambiente y que cualquier atenuante o reparación del daño debe ser una obligación para las empresas beneficiadas y el gobierno que otorga los permisos y licitaciones.

Tabla 2. Problemáticas primarias entre la industria minera y el medio ambiente. Información de (MMSD, 2002) y (Lillo, Universidad Complutense de Madrid, 2006).

PROBLEMÁTICA	CAUSA	ORIGEN Y/O RECOMENDACIONES
<u>Grandes volúmenes de desecho</u> Que se producen según las características geológicas del yacimiento	Recubrimiento	Parte removida del suelo para tener acceso al recurso mineral.
	Roca de desecho	Roca sin valor económico.
	Relaves	Residuo acuoso de mineral molido después de la extracción de minerales de interés.
	Jales	Roca que queda en una instalación de lixiviación después de la recuperación de minerales.
	Eliminación de desechos en mar y ríos	Afectando la producción en zonas marinas y contaminando fuentes de agua potable de manera directa por infiltración.
<u>Impactos atmosféricos</u>	Emisiones sólidas	Emitido en las actividades extractivas, procesos de carga y transporte, remoción eólica de material fino en escombreras y balsas abandonadas.
	Gases	Gases emitidos por combustión de la maquinaria, proceso de extracción, combustión con carbón (CO _x , NO _x , SO _x) y pirometalurgia (SO ₂).
	Aerosoles	Producidos principalmente durante procesos de hidrometalurgia que implican el riego por aspersión de pilas de mineral con compuestos altamente tóxicos (sulfúrico o cianuro comúnmente).
	Ruido y ondas aéreas	Maquinaria y explosiones.
<u>Drenaje ácido de mina (DAM)</u> Problema con mayor impacto ambiental	pH ácidos y altas concentraciones de EPT	Tratamientos que van desde la neutralización de la acidez, plantas de asentamiento hasta un "pantano artificial".
	Fallas en instalaciones de almacenamiento	Accidentes, ya sea en la transportación de residuos peligrosos o en las zonas de almacenamiento.
<u>Planificación del cierre de minas</u> El plan de cierre debe considerar objetivos e impactos desde el inicio del proyecto	Prevención de la contaminación	Existe la obligación de entregar el recinto en condiciones específicas, por lo que a lo largo del proceso se deben seguir ciertas normatividades.
	Cambio de expectativas	Crear acuerdos que definan el riesgo, resultados esperados, costos y tiempo.
	Continuidad	Sin importar si una mina cambia de "administrador", se debe mantener un programa sobre lo que pasará al final de las actividades .
	Seguridad financiera	Asegurar disponibilidad de fondos para actividades de cierre sin importar la rentabilidad.
	Participación pública	Participación de autoridades de principio a fin.

6.3 Depósitos de residuos mineros (jales) y su dispersión

La explotación de minas trae consigo problemas significativos en su entorno (sociales, ambientales, geológicos e incluso puede afectar la estabilidad estructural de algún área) a veces de manera irreparable, sumado a esto, el proceso de beneficio del mineral que genera grandes cantidades de residuos mineros donde pueden liberarse diferentes elementos potencialmente tóxicos (como el Zn, Cd, Pb, Fe y As), por estar expuestos a las condiciones ambientales y contaminar los sistemas a su alrededor. En los depósitos generados por yacimientos de sulfuros metálicos se puede producirse el drenaje ácido de mina (DAM) que es 200 a 300 veces más ácido que la “lluvia ácida” y tiene un alto contenido de EPTs, número que también depende de la composición mineralógica del jal, así como del tiempo expuesto a condiciones ambientales, ya que en jales con una alta concentración de minerales como calcita o dolomita las reacciones de neutralización de la acidez duran algún tiempo antes de que comiencen los procesos de lixiviación de metales (Mendoza-Amézquita et al., 2006) entre otras características (Cuadro 1).



Cuadro 1. Factores que influyen la toxicidad de los metales en solución (Connel & Miller, 1984)

La meteorización libera los elementos químicos contenidos en el material geológico para después formar parte del suelo (en concentraciones variables), donde los factores de formación y los procesos edafogénicos determinan su disponibilidad. Por lo general, los suelos presentan bajas cantidades de EPTs (Tabla 3), pero en algunos lugares se llegan a presentar “anomalías geoquímicas naturales” por el tipo de material parental (composición de la roca de procedencia). Comúnmente las concentraciones de ordenes de magnitud muy elevado solo pueden ser explicadas por la actividad humana.

Los depósitos de jales ricos en EPTs tiene una granulometría muy fina, que al ser abandonado sin medidas de contención se dispersan con facilidad a su alrededor por medio del viento y el agua, donde se desconoce si el ambiente en donde se depositan tiene la capacidad de amortiguarlos.

Tabla 3. Órdenes de magnitud de los contenido de metales en la litósfera y en los suelos. Modificado de (Porta Casanellas , López-Acevedo Reguerin, & Poch Claret, 2014).

Metal	Contenido en la litósfera mg kg⁻¹	Intervalo común en el suelo mg kg⁻¹	Contenidos medios en el suelo mg kg⁻¹
As	5	1 - 5	5
Cd	0.2	0.01 – 0.07	0.06
Pb	16	2 - 20	10
Zn	10 - 300	10 – 30	50

La contaminación en suelos se produce a la par de la contaminación de otros sistemas (como el atmosférico y el hídrico) más aún cuando la fuente es la misma (jales mineros). Los contaminantes se distribuyen al medio ambiente de diferentes maneras y en un ciclo complejo y poco predecible (Figura 3), ya que las características específicas de cada ambiente determinan los posibles medios de dispersión, de los cuales se tomarán 2 como los principales en la zona de estudio: en primer lugar el viento que contamina la superficie de la zona circundante (relativamente un área cercana a la fuente de contaminación) y que depende por completo de la dirección y velocidad de los vientos predominantes en la zona, así como de las barreras naturales (orografía, zonas arbóreas, etc.), y en segundo lugar la escorrentía/infiltración que depende de algunas características de la zona donde se encuentre la fuente de contaminación

como su cercanía con cuerpos de agua, la precipitación, permeabilidad del suelo y al igual que la dispersión por viento, la orografía (FAO, 2000).

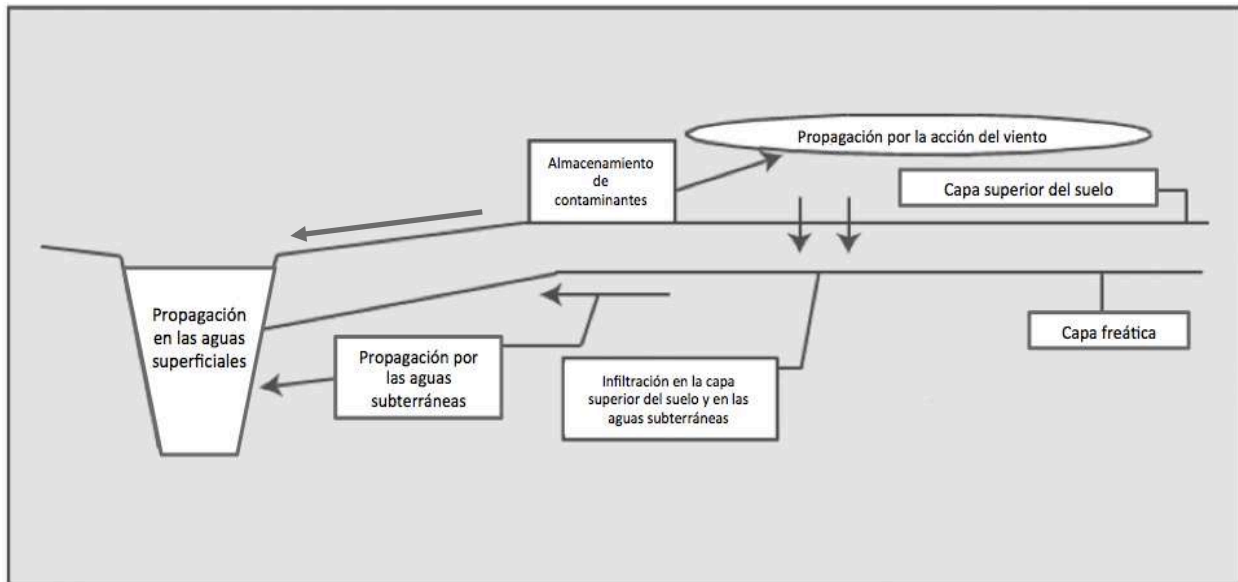


Figura 3. Dispersión de los contaminantes desde un “almacén” hacia el medio ambiente, modificado de (FAO, 2000).

El “polvo fino” que se genera por otras actividades mineras (Figura 4) (Dean Carter Binational Center , 2003) aumenta significativamente su rango de dispersión (transporte eólico) (Figura 5) en climas calientes y secos (por ejemplo en Zimapán), por otro lado cuando el agente causante de la dispersión de los contaminantes es el agua, existen diferentes procesos de migración en forma soluble o lavado y por material particulado (Figura 6), como es el ascendente (incluso precipita), descendente (pueden perderse en el perfil e incluso alcanzar la capa freática si existe), lateral (zonas más altas hacia zonas más bajas), disuelto por aguas de escorrentía (superficial) y arrastre.

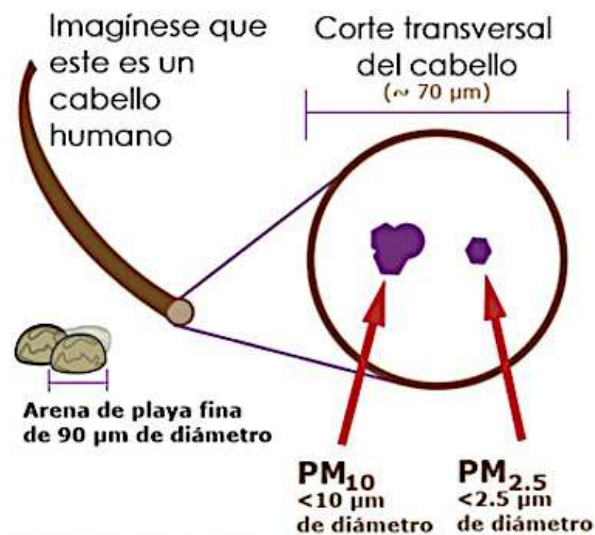


Figura 4. Imagen ilustrativa del tamaño de partícula (The University of Arizona, 1999).

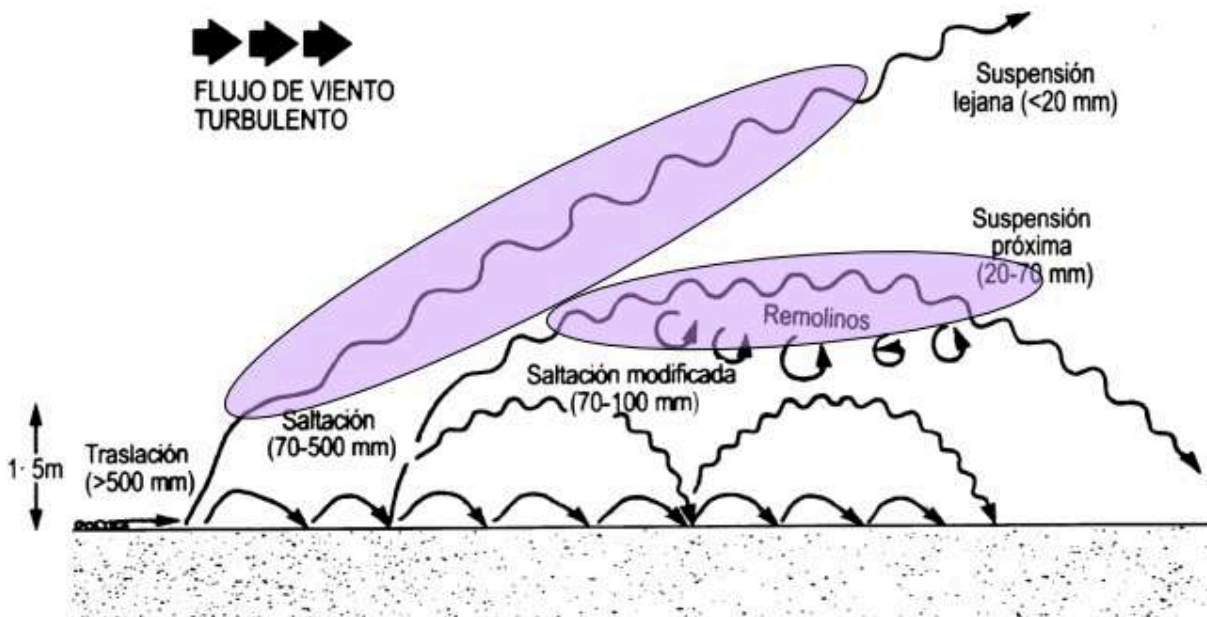


Figura 5. Transporte y movilidad de partículas por acción del viento (Fernández, 2014).

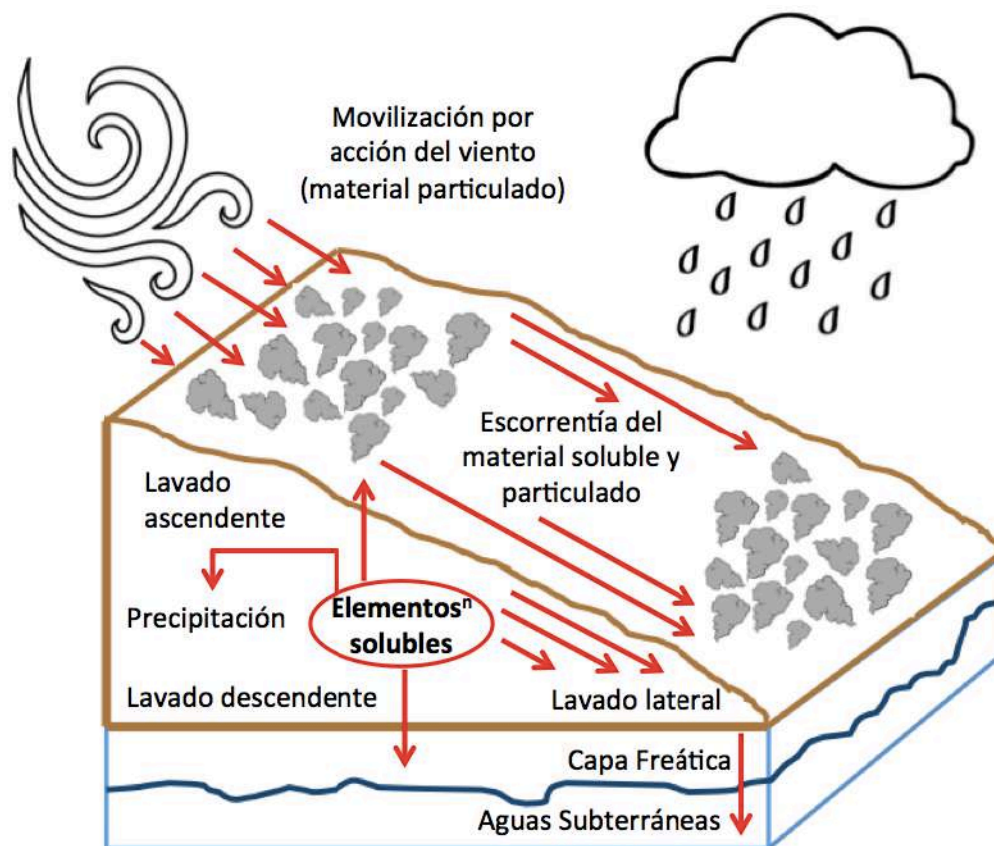


Figura 6. Movilización natural de Elementos Potencialmente Tóxicos por acción de agua y del viento. Modificado de Solano (2005).

6.4 Impacto de la minera en el suelo

El suelo es un cuerpo dinámico que cambia sus propiedades según los factores que lo formaron (material parental, clima, organismos, relieve y tiempo) (Dokuchaev, 1899) y se considera un sistema abierto por presentar intercambios de materia y energía con el medio a través de procesos de adición (material orgánico o sedimentos), pérdida (erosión y lavado), translocación (movimiento ascendente o descendente de material en el perfil) y transformación (reacciones) (Bautista Zúñiga, 1999), que le otorgan las características específicas para cada tipo de suelo. Está formado por los tres estados de la materia; la fase sólida que se divide en orgánica (organismos y el resultado de los procesos biológicos) e inorgánica (fracción mineral), la fase líquida (iones y gases disueltos), y la fase gaseosa (formada por O_2 , CO_2 , CH_4 , N_2 entre otros) que determinarán el tipo de microorganismos existentes (aerobios o anaerobios). Éste se desarrolla a partir de una mezcla de minerales y restos orgánicos bajo la influencia del clima y el medio biológico (procesos formadores de suelo) donde la aceleración de la gravedad influye para que existan diferencias verticales identificables por alguna característica evidente dando origen a horizontes (Donorroso, 2018) (Figura 7).

De manera general los horizontes del suelo se pueden clasificar como: horizonte A, más cercano a la superficie del terreno, donde hay mayor influencia de los organismos y acumulación de materia orgánica en diferente nivel de transformación; horizonte B, por debajo del horizonte A, donde las raíces de las plantas llegan y se acumulan los materiales solubles lixiviados (no siempre) y horizonte C, formado por rocas parcialmente descompuestas o de otro material de origen identificable (Cepeda Dovala, 2009).

La parte sólida mineral del suelo está formada por (Thompson, 1988):

- a) Minerales primarios derivados de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que no han sido afectadas en sus propiedades químicas.
- b) Minerales secundarios que son producto del intemperismo de los minerales primarios.

Los minerales secundarios junto con la materia orgánica son la fracción más activa, en donde se llevan a cabo los procesos sorción, quelatación, amortiguamiento, etc. del

suelo, donde la presencia de un contaminante (ya sea un elemento o compuesto) y su acumulación en el suelo, afectará negativamente sus funciones y a otros sistemas asociados (aire, agua y organismos) de manera puntual o difusa.

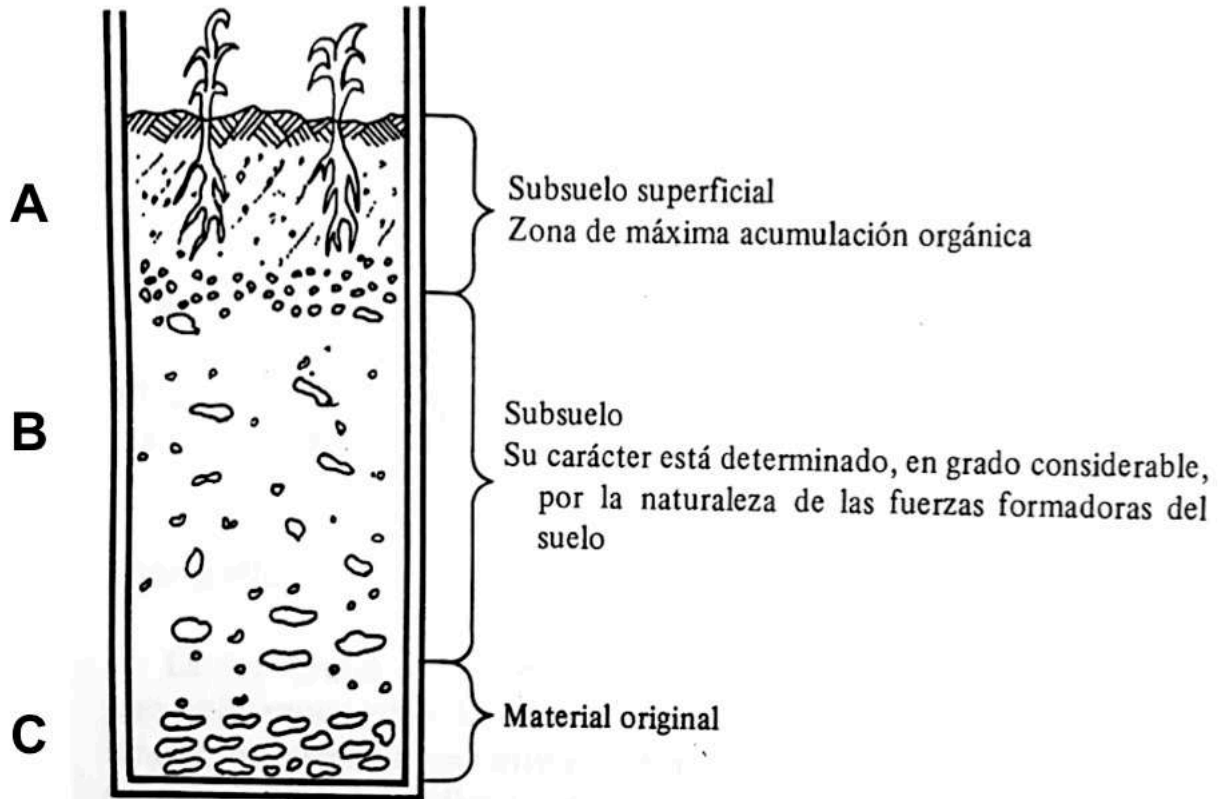


Figura 7. Descripción general de un perfil de suelo (Cepeda Dovala, 2009).

El suelo es muy vulnerable ante las actividades humanas, ya sea por la adición excesiva de sustancias (fertilizantes en su mayoría) o por estar expuestos a diferentes fuentes (residuos industriales, prácticas agrícolas inadecuadas, mala utilización para tratar residuos animales y humanos, actividades de fundición y minería, residuos urbanos, etc.).

En este trabajo el estudio de la contaminación de suelos se enfocará hacia los impactos derivados de la minería, que de forma general se pueden desglosar como (Lillo, Impactos de la minería , 2010):

- Modificación de propiedades físicas: Variaciones en el régimen hídrico (alteraciones en el nivel freático) variaciones texturales, cambios estructurales, pérdida física de suelo por extracción o erosión inducida, acumulación de vertidos y construcción de infraestructura. Alteración y/o mezcla de horizontes.

- Modificación de propiedades químicas: Contaminación por metales pesados, metaloides e hidrocarburos, adición de sales a suelo (comúnmente sulfatos), acidificación por acumulación y oxidación de sulfuros y drenaje ácido.

Los contaminantes inorgánicos pueden ser metales pesados (densidad real superior a $5000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), no metales, especies halogenadas, deposiciones ácidas, asbestos y radionúclidos. Para entender su comportamiento (movilidad, transporte, biodisponibilidad y toxicidad) se tienen que tomar en cuenta diferentes aspectos, tanto del elemento como del suelo:

1. Procesos de sorción/desorción, relacionados directamente con la bio/geo disponibilidad.
2. Las condiciones del medio (pH, Eh, temperatura, humedad del suelo, etc.).
3. La interacción con otros elementos químicos.
4. Los organismos con los que interaccionen.
5. Naturaleza de la contaminación (origen y forma de deposición).
6. Condiciones medioambientales.
7. Cambios en la composición iónica del suelo.
8. Características ambientales del suelo (materia orgánica, textura del suelo, densidad real, aparente, espacio poroso, carbonatos, etc.).

El grado en que el suelo puede amortiguar a los elementos potencialmente tóxicos se conoce como concentración/valor umbral o carga crítica contaminante que es la cantidad (peso) de una determinada sustancia que puede estar presente en cada kilogramo de suelo sin dañar al ambiente (Saucedo Plata , 2014); se calcula en base a normatividades (a partir de un valor de fondo y concentración umbral) pero en zonas con alta cantidad de EPT (tanto de manera natural como antropogénica) esto resulta muy complicado, por lo que los efectos derivados de la contaminación se manifiestan cuando el daño puede estar ya muy avanzado y haber causado efectos negativos en agua, aire, salud humana y salud animal (como inhibir el crecimiento de las plantas y convertir el suelo en un foco de redistribución de elementos tóxicos a través de la cadena trófica o de la interacción con cuerpos de agua (Porta Casanellas , López-Acevedo Reguerin, & Poch Claret, 2014)).

6.5 Arsénico

Este elemento se encuentra en el medio ambiente tanto de manera natural (por el desgaste mineral del material geológico de la zona) como antropogénico, debido a su uso en la industria (curtir piel animal), minería, medicina y agricultura (insecticidas, herbicidas, fungicidas, etc.). Es un metaloide calcófilo (Hooda, 2010) que está presente en dos estados de oxidación (determinados por el pH y condiciones redox [Figura 8.]):

1. El Arsenito (*As III*) o ácido arsenioso ($As(OH)_3$) que está presente en ambientes reductores y se considera más tóxico que el *As V* por su preferencia a reaccionar con grupos sulfhidrilos que se encuentran en las enzimas de los mamíferos (Fortescue, Stahl, & Webb, 1988) además de estar comúnmente en forma de óxido arsenioso (As_2O_3) que es muy lábil y de fácil absorción (pulmones, intestinos, proteínas, coenzimas) (Coker, Dunn, & Hall, 1991).
2. El Arseniato (*As V*) o ácido arsénico (*por ejemplo* $HAsO_4^{2-}$) que está presente en ambientes oxidantes.

Existen 245 minerales que incluyen al As en su estructura, muchos de ellos asociados con depósitos aluviales, coluviales y volcánicos (Gomez, Gomez, & Palacios, 2000).

Las rocas sedimentarias arcillosas ($<1-900 \text{ mg As kg}^{-1}$) tienen valores significativamente más altos que las ígneas ($<1-15 \text{ mg As kg}^{-1}$), areniscas y calizas ($<1-20 \text{ mg As kg}^{-1}$); las rocas fosfatadas ($<1-200 \text{ mg As kg}^{-1}$) también presentan un valor alto debido a su asociación directa con el arsénico (Alloway, 1990).

La retención del As depende mucho de las propiedades fisicoquímicas del suelo, especialmente de la abundancia de aluminio, hierro, arcillas y calcio, así como el pH (mayor sorción en altos

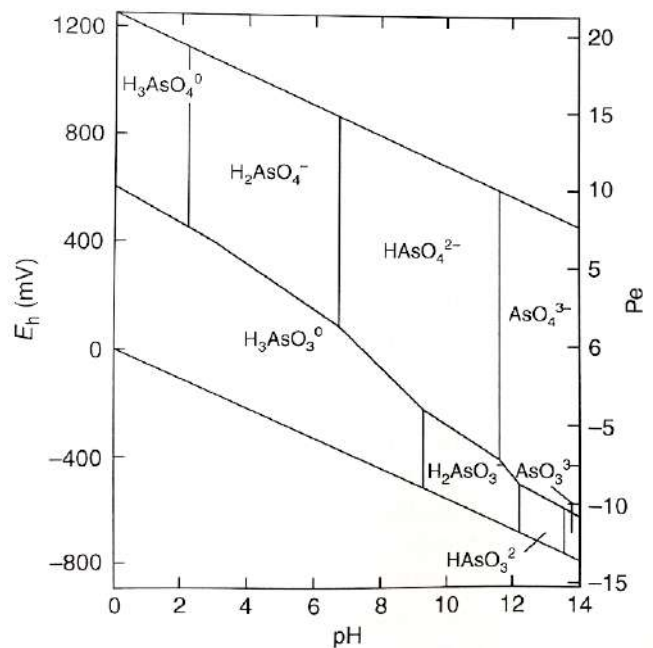


Figura 8. Diagrama E_h -pH para especies acuosas de As en un sistema As-O₂-H₂O a 25°C y 1 bar de presión (Smedley & Kinniburgh, 2002).

contenidos de hierro, aluminio y pH>7 (Manning & Goldberg, 1997)), de manera general, el promedio de As en suelos no contaminados es de aproximadamente 5 mg As kg⁻¹ y de 20 mg As kg⁻¹ en suelos volcánicos; en suelos contaminados es de al redor de 2500 mg As kg⁻¹ y en suelos usados para la agricultura (promedio de 12 estados de E.U.A.) es de 165 mg As kg⁻¹ (Hooda, 2010), en los cuales el As se encuentra muy disponible y móvil para el medio ambiente, por lo que se han realizado diversos estudios donde se busca como una opción para la remediación la utilización de plantas resistentes a condiciones altamente contaminadas (Tabla 4).

Tabla 4. Sumario de especies de plantas estudiadas en sitios contaminados (Hooda, 2010).

Sitio de estudio	Contenido de As en suelo (mg kg⁻¹)	Especies de plantas	Contenido de As en tejidos vegetales
Minas abandonadas en Portugal	76	<i>Digitalis purpurea</i> <i>Calluna vulgaris</i> <i>Chamaespartinum tridentatum</i> <i>Cistus ladanifer</i> <i>Erica unbellate</i> <i>Quercus ilex subsp. ballote</i>	30 0.62 0.54 2.77 0.64 3.6
Suelos contaminados en el sur de Inglaterra	8500 - 26,500	<i>Agrostis canina</i> <i>Agrostis tenuis</i>	6,640 -
Suelos contaminados en el centro de Florida	18.1 – 1,603	<i>Pteris vittata</i>	3,280 – 4,980
Sitios afectados por la minería en Tailandia	21 – 16,000	<i>Pityrogramma calomelanos</i> <i>Pteris vittata</i> <i>Mimosa pudica</i> <i>Melastoma malabrathricum</i> <i>Bauhinia glauca Wall.</i>	>8,350 24 – 76 18 – 37 15 – 32 -
Zona minera de extracción de oro en Nueva Zelanda	2000 – 40,000	<i>Leptospermum scoparium</i> <i>Ulex europaeus</i> <i>Fuchsia excorticata</i> <i>Griselinia littoralis</i> <i>Juncus spp.</i> <i>Pohlia wahlenbergii</i>	<10 <10 <10 <10 <100 >30,000
Minas abandonadas	51.9 – 21,200	<i>Pinus sylvestris</i> <i>Juncus inflexus L.</i> <i>Buxus semperviren</i> <i>Dryopteris filix-max</i>	0.012 – 0.585 0.013 – 0.569 0.02 – 0.5 <0.19

6.6 Cadmio y Zinc

El cadmio y el zinc son considerados co-contaminantes por tener estructura iónica similar, propiedades en suelos y plantas muy parecidas, además de ser “nutrientes” competitivos, comúnmente están en proporciones de [Cd]1 a 200[Zn] (Hooda, 2010).

El cadmio no es un elemento común en la naturaleza (número 67 en abundancia con concentraciones de 0.2 mg¹⁻ rocas ígneas, 0.04-0.02 mg¹⁻ rocas metamórficas, 0.007-980 mg¹⁻ rocas sedimentarias, pero es altamente tóxico para plantas y animales y fue hasta el reciente siglo que el Cd empezó a aumentar sus concentraciones en el medio ambiente a causa de la extracción de Zn de minas y sus usos como en el recubrimiento de acero, en varias aleaciones, pigmentos, estabilizador de plásticos, celdas fotovoltaicas, etc. (Alloway, 1990). Por otro lado el Zn es un elemento esencial para el desarrollo animal (incluyendo humanos) y vegetal (plantas superiores) y su abundancia en suelos de manera natural depende por completo del material parental (40 mg¹⁻ en granito, 100 mg¹⁻ en basaltos, 80-120 mg¹⁻ en sedimentos arcillosos y de 10-30 mg¹⁻ en arenas, limas y dolomitas (Kabata-Pendias & Pendias , 1984)).

Con el uso de pesticidas y fertilizantes la cantidad de Zn en los suelos aumentó considerablemente (Tabla 5) al igual que el incremento en las zonas de descarga de aguas residuales (biosólidos), pero la fuente más importante de ambos se encuentra en la minería y las emisiones de fundidoras.

Tabla 5. Concentraciones de Cd y Zn en suelos agrícolas en reino Unido y Estados Unidos (Hooda, 2010).

Cd (mg kg⁻¹)		Zn (mg kg⁻¹)	
Media	Rango	Media	Rango
0.70	<0.2 - 40.9	82	5 – 3648
0.20	<0.005 – 2.0	53	1.5 - 264
0.20	<0.1 – 5.2	56	8 - 377

Es importante identificar las formas de los metales en el suelo (especialmente en la solución), para el cadmio el ion libre Cd²⁺ es más adsorbible en las superficies de las partículas del suelo al igual que el Zn²⁺ que se dividen en diferentes fracciones:

a) Iones libres y complejos organometálicos en la solución del suelo.

1. *Grupo soluble en agua:* La fracción presente en la solución del suelo.

2. *Grupos intercambiables*: Iones unidos a partículas del suelo por cargas eléctricas.
3. *Grupos adsorbidos, quelatados o complejados*: metales unidos por partículas orgánicas.
4. *Grupos de minerales arcillosos secundarios y óxidos metálicos insolubles*.
5. *Grupos de minerales primarios*.

b) Adsorbidos e intercambiables en la fracción coloidal del suelo, compuesto por partículas de arcilla, compuestos húmicos, hidróxidos de hierro y aluminio.

c) Minerales secundarios y complejos insolubles en la fase sólida del suelo.

La forma en que se encuentra el Cd y el Zn en el suelo dependerá de diferentes parámetros como la concentración, otros iones presentes, los sitios de adsorción en el suelo, la concentración de los ligandos, pH (Figura 9) y potencial redox del suelo.

Se han realizado estudios sobre la remoción de zinc, en donde se ha experimentado con plantas de la familia *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana* L. y *Arabidopsis halleri* (Grotz, Fox, Connolly, Guerinot, & Eide, 1998)) como forma de remediación. Sin embargo para el cadmio se proponen otras alternativas como remoción de la capa superior del suelo (es impráctica y muy cara), reducir su contenido agregando ácidos o quelatos (puede contaminar el agua subterránea), mantener su pH cercano a 7 para reducir la biodisponibilidad, añadir materia orgánica o buscar sembrar especies tolerantes o acumuladoras.

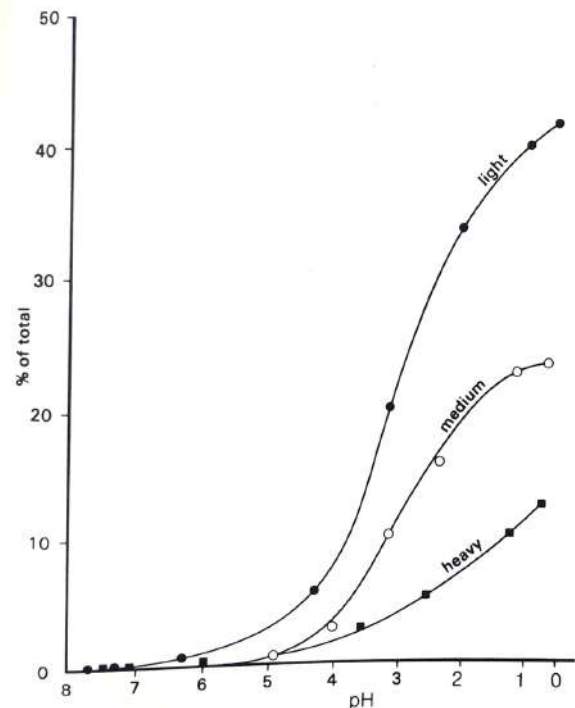


Figura 9. Porcentaje total soluble de Zinc en función del pH en tres suelos con diferente textura (Alloway, 1990).

6.7 Plomo

El plomo (Pb) es un elemento traza en rocas y suelos que tiene dos estados de oxidación estables (Pb II, Pb IV), el Pb^{2+} que domina al hablar de química ambiental, raramente se combina con otros elementos y se puede encontrar en forma de sulfuro (galena $[PbS]$), carbonato de plomo (cerusita $[PbCO_3]$), sulfato de plomo (anglesita $[PbSO_4]$) y clorofosfato de plomo (piromorfita $[Pb_5(PO_4)Cl]$).

La concentración promedio en la corteza terrestre es de 16 mg kg^{-1} , varía según el tipo de rocas (Tabla 6) y es aportado al ambiente de manera natural por emisiones volcánicas, polvo producto de la erosión, brisa marina, material biogénico e incendios forestales; la principal fuente de contaminación antrópica son los aditivos con plomo de los combustibles fósiles.

Tabla 6. Promedio de concentraciones de plomo en rocas de diferente tipo, adaptada de (Baker & Cooper, 1995).

TIPO DE ROCA	PROMEDIO Pb (mg kg^{-1})
Ultramáfica	1.0
Basáltica	6.0
Granítica	18
Pizarras y arcillas	20
Pizarras negras	30
Calizas	9.0
Areniscas	12

El plomo en el suelo tiende a acumularse en horizontes no contaminados o con alto contenido de materia orgánica (Hooda, 2010) y aunque no es muy soluble, influencia la actividad microbiana en procesos de mineralización tanto de nitrógeno como de CO_2 (Alloway, 1990). Este elemento constituye un riesgo importante a la “salud” del suelo y el ecosistema, sin hablar del riesgo que existe de ser consumido por el ser humano (problemas metabólicos, renales, hematológicos e incluso esqueléticos)(Warren, Delavault, & Fletcher, 1971).

6.8 Hierro

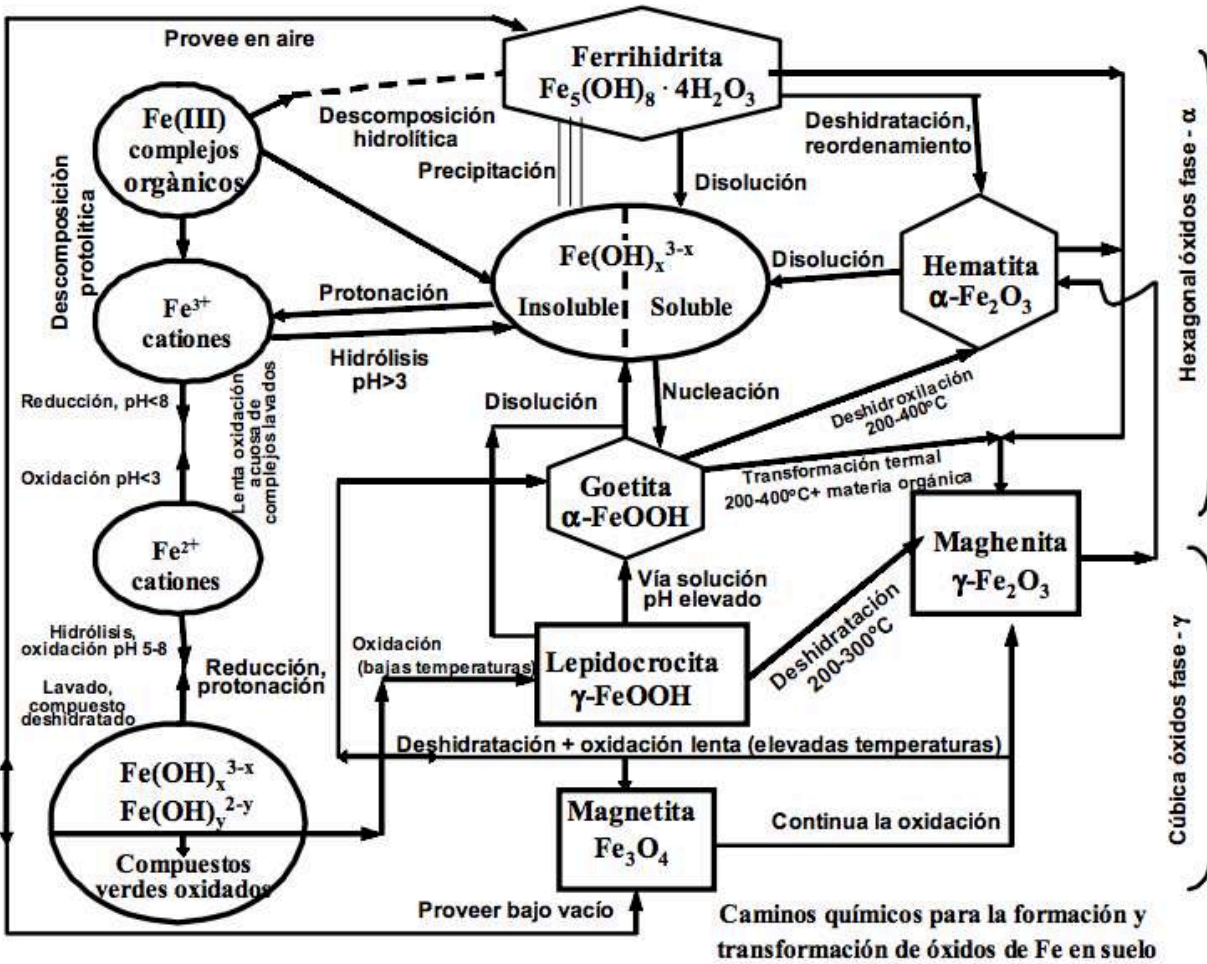
El hierro (Fe) es el elemento más abundante en el suelo (5% de la corteza terrestre), su concentración está definida por la cantidad y tipo de arcilla en el suelo, así como de la materia orgánica (quelatos) (Tabla 7). Se encuentra asociado principalmente a las hematitas (Fe_2O_3) y sideritas ($FeCO_3$), es un elemento esencial para la vida, en las

plantas se absorbe como ión ferroso y a pesar de no ser considerado un macronutriente es esencial para la formación de clorofila e interviene en procesos enzimáticos respiratorios (Thompson & Troeh, 2002). El color es un indicador de la forma química en que se encuentra el hierro (Fe) en el suelo; un color rojizo indica la presencia de óxidos (airado, altamente meteorizado), amarillo (óxido de hierro hidratado altamente meteorizado, pero solo en suelos tropicales), gris verdoso (procesos de reducción de hierro). En suelos “sanos” se encuentra en forma férrica y asociado con partículas minerales u otros componentes edáficos. Su solubilidad depende del pH (mayor pH menor solubilidad) ya que a valores altos puede precipitar por su asociación con iones OH^- .

Tabla 7. Formas de hierro en el suelo (Acevedo-Sandoval, Ortiz-Hernández, Cruz-Sánchez, & Cruz-Chávez, 2004).

	Compuestos de hierro	
Silíceo	Hierro en las composiciones de silicatos de aluminio	
No silicio libre	Hierro en los compuestos de óxidos e hidróxidos de hierro en distintos grados de cristalización a) Amorfo b) Cristalizado c) De intercambio d) Soluble en agua	Goetita, lepidocrocita magnetita, ferrihidrita. Primordialmente en formas de hierro bivalente, en forma iónica (primordialmente en Fe^{2+}) en forma coloidal (protegido por algunas sustancias orgánicas o por sílice coloidal) en forma de complejos y de compuestos intracomplejos.

En el cuadro 2 se muestra un esquema de algunos parámetros fisicoquímicos que influyen en la dirección de la mineralización del hierro y los caminos químicos (experimentales).



Cuadro 2. Caminos químicos para la formación y transformación de óxidos de hierro en el suelo (Taylor, 1990).

En cuanto a la toxicidad, depende de diferentes factores como las condiciones del suelo, el material parental y el manejo de cultivos (si es que lo hay), así como la fertilización y riego. Aunque está en concentraciones muy altas, la toxicidad se considera casi “sin importancia” debido a su poca movilidad. Sin embargo, hay diferentes factores que pueden favorecerla, los “síntomas” de toxicidad por hierro más comunes se presentan en las hojas de las plantas (necrosis, manchas color “café”), disminución de biomasa radicular, enanismo e incluso desarrollo de colores pardos a púrpura en otras especies.

6.9 Azufre

El contenido de azufre (S) en suelos varía según su origen, en suelos inorgánicos el contenido es entre 0.02-0.2% mientras que los orgánicos pueden presentar hasta 1% (Fassbender, 1975), pero si está influenciado por actividad volcánica, este número puede llegar hasta el 20%; se encuentra ligado a minerales como el sulfato de calcio (yeso), sulfuro de hierro, pirita y esfalerita.

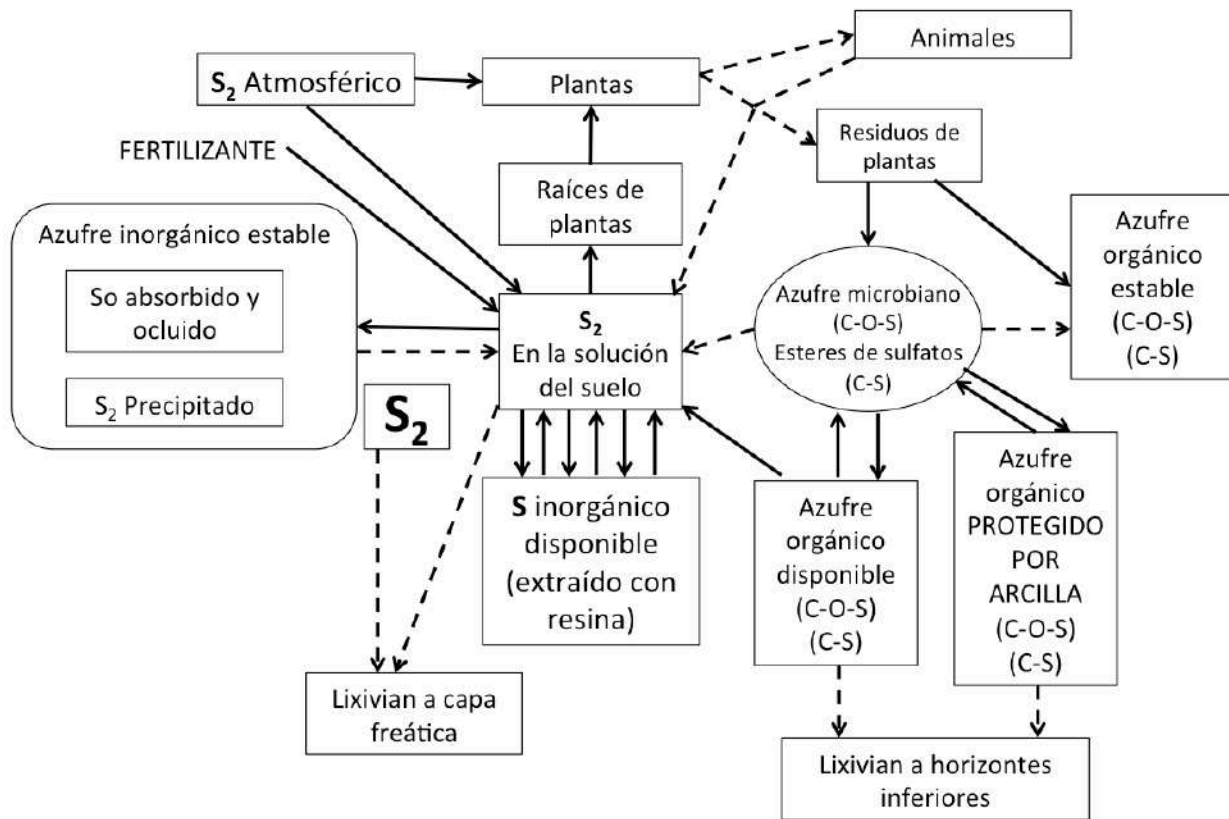
Tabla 8. Resumen de las formas en que se encuentra el azufre en el suelo (Kass, 1998).

Azufre en formas sulfatadas (SO₄²⁻)	Descripción
Sulfato adsorbido por superficies arcillosas	Si predominan arcillas caoliníticas (1:1) y arcillas óxido (óxidos de hierro y de aluminio con diferentes grados de hidratación), la adsorción es mayor (retención temporal).
Sulfato soluble	El más disponible para las plantas, afectado por condiciones ambientales, meteorización a la velocidad de la materia orgánica.
Sulfato ligado a formas orgánicas	Azufre orgánico estable.
Sulfato ligado a microorganismos del suelo	Puede ser disponible o protegido temporalmente por arcillas (capacidad de retener aniones).
Sulfato adsorbido y ocluido	Por coloides del suelo y las formas sulfatadas que precipitan.

Puede estar en formas orgánicas e inorgánicas, las formas solubles inorgánicas son sulfatos solubles, adsorbidos en la periferia de las partículas del suelo y en algunos precipitados de compuestos sulfatados (Tabla 8), la solubilidad está ligada (en su mayoría) por sustancias orgánicas (azufre orgánico). El azufre es muy móvil en el suelo, por lo que algunas veces se lava con facilidad, sin embargo su afinidad con los coloides (óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio) hace que se retenga y pueda estar disponible a mediano plazo (Cuadro 3).

Se presenta en dos formas de asimilación, como ion SO₄²⁻ y en regiones agrícolas próximas a zonas industriales como gas SO₂; es constituyente indispensable en las proteínas, vitaminas, enzimas y lípidos, así como también en la formación de la clorofila.

El exceso de azufre en el suelo se ve reflejado en el crecimiento lento, hojas pequeñas y manchas oscuras en las plantas que se desarrollan sobre el, pero no se le ha considerado un elemento tóxico. Sin embargo, si llegara a cambiar el pH del suelo (tener tendencia a la acidez) puede llegar a competir con otros elementos (el nitrógeno por ejemplo), aunque hasta el momento su exceso y el impacto en sus características intrínsecas no va más allá de lo agrícola.



Cuadro 3. Formas y transformaciones de azufre en el sistema suelo planta (Kass, 1998).

7 ZONA DE ESTUDIO

7.1 Municipio de Zimapán, Hgo (INEGI, 2009).

El municipio se encuentra entre los paralelos 20°34' y 20°50' de latitud norte; los meridianos 99°11' y 99°33' de longitud oeste, y tiene una altitud de entre 900 y 2,900 msnm. Ocupa el 4.18% de la superficie del estado y cuenta con 159 localidades (Figura 10). La región de Zimapán, constituye un valle con lomeríos, que contrasta con el relieve que la rodea y es considerada una discontinuidad dentro de la provincia del Eje Neovolcánico.

Se encuentra en las provincias de la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico, dentro de la subprovincia del Carso Huasteco y Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo; por lo que el sistema de topofomas son las sierras.

La temperatura se encuentra entre los 12 y 20° C en promedio a lo largo del año, con un rango de precipitación de 400-1,100 mm anuales. Los climas son variables:

- Semiseco templado (31.5%).
- Templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad (30.5%).
- Semiseco semiárido (20%).
- Templado subhúmedo con lluvias en verano de menos humedad (10%).
- Semiárido subhúmedo con lluvias en verano de menos humedad (8%).

La geología dominante es del periodo Cretácico (54%), seguida del Neógeno (36%) y con pequeñas formaciones del Cuaternario (4%), Paleógenos (1.5%), Jurásico (2%) y Terciario (1%). En cuanto a rocas se presentan:

- *Sedimentarias*: calizas (36%), caliza-lutita (18%), conglomerado (4.5%), arenisca-conglomerado (3%) y lutita-arenisca (2%).
- *Ígnea extrusiva*: Riolita-toba ácida (16%), toba ácida (7%), andesita-toba intermedia (6%), basalto (3%) y andesita (1%).
- *Ígnea intrusiva*: Granodiorita-monzonita (1%).
- El 2.5% faltante se considera aluvión.

Pertenece a la región hidrológica del Pánuco en la cuenca del Río Moctezuma que se divide en las subcuencas del Río Moctezuma, el Tula y el río Amajac, donde están los ríos perennes Moctezuma, los Álamos y Tula; y los intermitentes Caravante,

Chepinque, Cuaxithi, De Xodhe, El Fresno, El Salitre, Mezquite, Muerto, Ojo de Agua, San Juan, San Pablo, Taxtho y Troncal. También se contempla a la Presa Hidroeléctrica Zimapán como un cuerpo de agua perenne.

La zona urbana se encuentra sobre suelo aluvial del Cuaternario, con rocas ígneas extrusivas del Neógeno y sedimentarias del Paleógeno, donde originalmente había Calcisoles, Leptosoles y Phaeozems (INEGI, 2009), además de Regosoles y Rendzina (INEGI, 1972).



Figura 10. 2016 Digital Globe. Google Earth INEGI. Visualización de las principales zonas de deposición de jales en Zimapán Hidalgo.

7.2 Fisiografía regional

Zimapán se ubica dentro de 3 provincias, principalmente la Sierra Madre Oriental (40%) y el Eje Neovolcánico (40%); en la parte centro oriental y septentrional del municipio se

encuentran las formaciones “El macizo” (3,260 m.s.n.m) “El Espolón” / “El Ángel” / “Sierras San Antonio-San Nicolás” / “El Grifo-Quita sueños” y “El Volantín” que se alinean en dirección NNW-SSE y dan origen a un valle angosto que formó el río Moctezuma (confluencia del río San Juan con el río Tula) y a valles profundos donde se observan cortes de las formaciones carbonatadas. “El Macizo” y “El Espolón-El Ángel” corresponden a la cabalgadura denominada “El Doctor” donde al occidente se inclina al oeste y en la parte oriental hay un cantil abrupto limitado en la parte inferior por la cabalgadura “El Doctor”, que al este se caracteriza por sierras alargadas y depresiones topográficas que constituyen los pliegues de la cuenca de Zimapán. La mitad de la región de Zimapán está formada por anchos valles, bordeados por cerros casi siempre de origen volcánico y mesas frecuentemente basálticas (Instituto de Geología UNAM, 2000) (Figura 11).

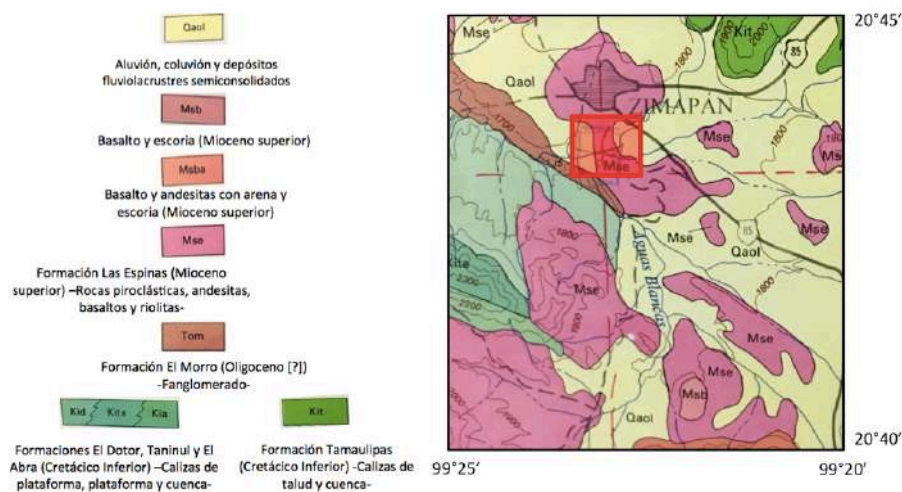


Figura 11. Fragmento tomado de la Carta Geológica 14Q-e(7) “Hoja Zimapán” 1 : 100,000. Elaborada por Miguel Carrillo-Martínez. Instituto de Geología, donde el cuadro resaltado ubica de manera aproximada la zona de muestreo.

7.3 Mineralogía de la zona

La mineralogía primaria reportada de los yacimientos en Zimapán está constituida por galena (PbS), esfalerita (ZnS), pirita (FeS₂), calcopirita (CuFeS₂), arsenopirita (AsFeS), pirrotita (Fe_{1-x}S), bornita (Cu₅FeS₄), estibina (Sb₂S₃), boulangerita (Pb₅Sb₄S₁₁), wollastonita (CaSiO₃), andradita [Ca₃Fe₂(SiO₄)₃], diopsida [CaMg(SiO₃)₂], idocrasa (Ca₆[Al(OH,F)]Al₂(SiO₃)₂), piroxeno-manganeso [(FeMn)SiO₃], salita [CaFe(SiO₃)₂], magnetita (Fe₃O₄), scheelita (CaWO₄), (Fe_{1-x}S), galenobismutina (PbS.Bi₂S₃), cuarzo

(SiO₂), calcita (CaCO₃), sulfosales de plomo y plata, meneghinita (Pb₁₃CuSb₇S₂₄), jamesonita (Pb₄FeSb₆S₁₄), freibergita [(Ag,Cu,Fe)₁₂(Sb,As)₄S₁₃], pirargirita (Ag₃SbS₃), proustita (Ag₃AsS₃) y bindheimita [Pb₂Sb₂O₆(O,OH)] de carácter supergénico (Moreno Tovar, Barbanson, & Coreño Alonso , 2009 en: Villaseñor, Gómez, Medina, Condliffe, & Lozano, 1987).

En cuanto a la mineralogía secundaria se ha encontrado jarosita [KFe₃(SO₄)₂(OH)₆], plumbojarosita [(Pb_{0.5}Fe₃(SO₄)₂(OH)₆], yeso (SO₄Ca.2H₂O), anglesita (PbSO₄), makovikyta (Ag_{1.5}Bi_{5.5}S₉) (Zúñiga Vázquez, 2014), sulfatos (SO₄²⁻), goetita [α FeO(OH)] y cesurita (PbCO₃) (Moreno Tovar, Barbanson, & Coreño Alonso , 2009).

7.4 Edafología

De acuerdo con los tipos de suelos en la zona de estudio, a continuación se da una breve descripción de estos basada en diferentes clasificaciones (INEGI, 1974; INEGI, 2009):

- *Leptosoles*: suelos poco profundos ya que existe una capa continua cementada dentro de los primeros 30 cm desde la superficie, es decir capa petrocálcica, petrogípsica, petroférrica o duripán (horizontes pedogenéticos en la WRB), también comprenden suelos con alto contenido de fragmentos gruesos y poca humedad disponible (WRB, 1999).
- *Regosoles*: suelos minerales poco desarrollados o tan recientes que no tienen ningún signo de pedogénesis (regolito, pedolito) por ser material depositado “recientemente”, comúnmente tienen buen drenaje, texturas medias, perfil no diferenciado y carentes de horizontes diagnóstico (UNAM, Instituto de ecología A.C., 2003).
- *Phaeozem*: suelos intermedios entre climas secos y zonas templadas/húmedas, se caracterizan por presentar un horizonte superficial oscuro rico en materia orgánica, ser húmedos (no hay acumulación de carbonatos o sales) y bien estructurados (Encyclopaedia Britannica, 2015).
- *Luvissoles*: suelos con un horizonte diagnóstico B árgico (saturación de bases del 50% o más), son suelos evolucionados y desarrollados a partir de material poco o nada consolidado (arcillas, sedimentos detríticos, etc.) (WRB, 1999).

- *Calcisoles*: suelos que pueden tener un horizonte cálcico y/o un horizonte petrocálcico y/o concentraciones de caliza pulverulenta blanda dentro de una profundidad de 125 cm (FAO-Unesco , 1990).
- *Rendzina*: suelos someros de climas semiáridos, tropicales o templados con una capa superficial abundante en materia orgánica sobre roca caliza o materiales ricos en cal y arcillosos (Fenton , 2006).

En cuanto a la edafología general del municipio (Figura 12), está relacionada de manera directa con la litología y el relieve, en la zona donde aflora el conglomerado los suelos abundantes son los Leptosoles (43%), al norte de la región los Regosoles (25%), en la zona del valle los Phaeozem (17.53%), seguido de Luvisoles (11%) y Calcisoles (2%) de acuerdo con clasificación usada en el 2009, para la de los mapas del INEGI (1974). Sin embargo, para el INEGI en 2009, las Rendzinas abarcaban mayor parte, y se le relaciona con su dominante vegetación de matorral (39%), bosque (36%), pastizal (6%) y selva (1%).

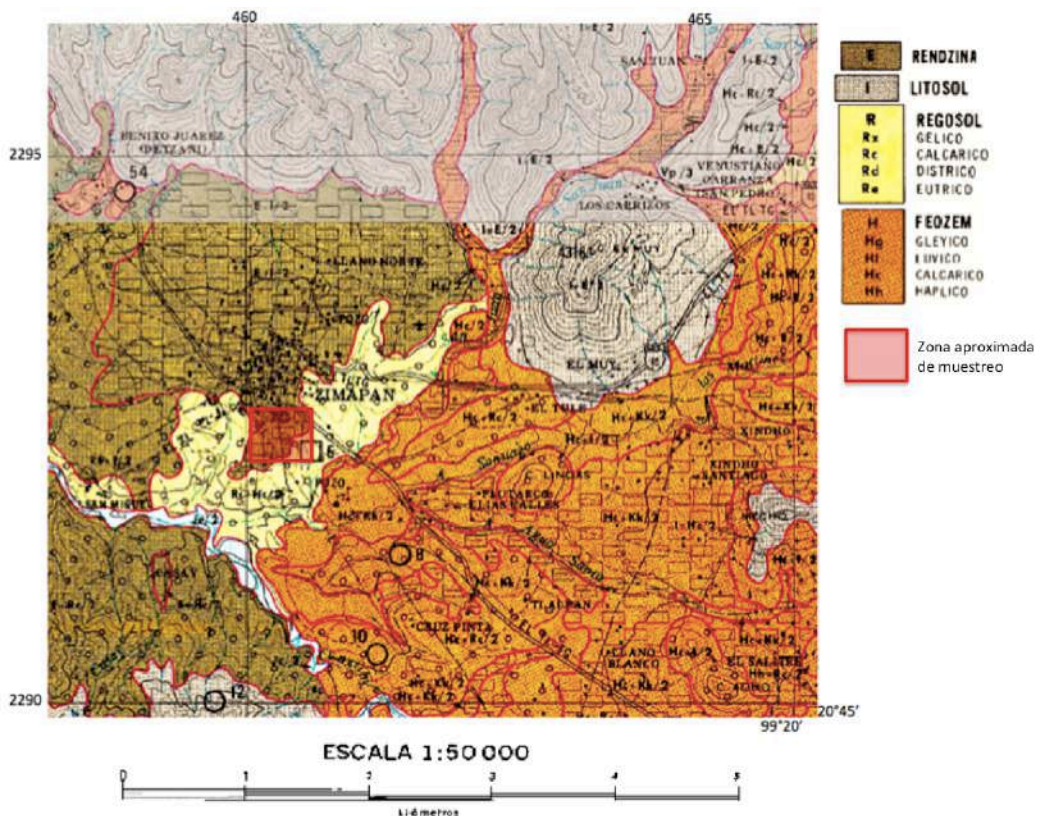
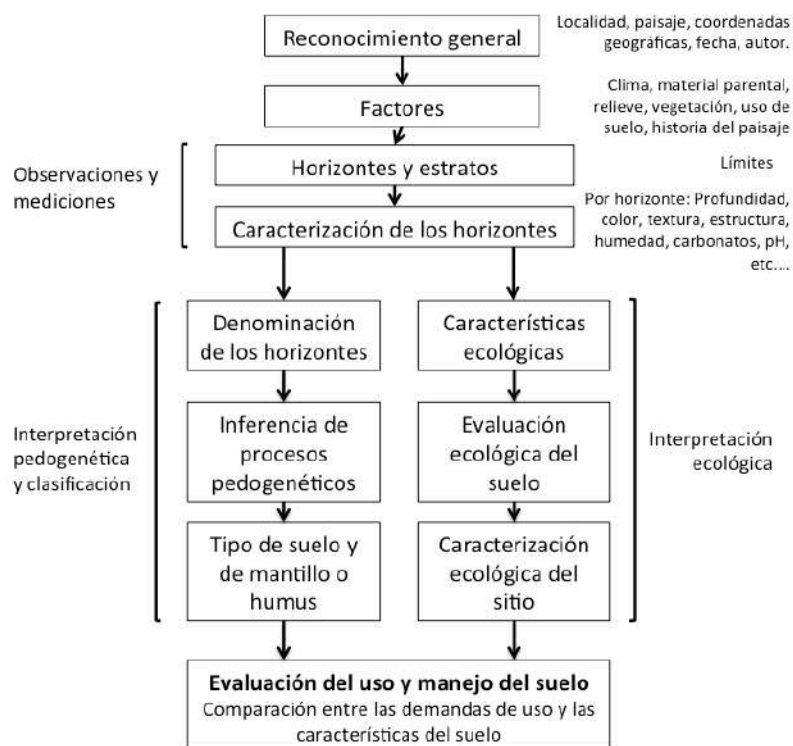


Figura 12. Mapa ilustrativo de la edafología de Zimapán, Hgo. Elaborado con cartas del INEGI (Tecoautla F-14-C-68-Hidalgo y San Joaquín F-14-C-58-Querretaro), 1974 (clasificación de la FAO).

8 METODOLOGÍA

8.1 Selección, descripción del sitio y muestreo

Se estudió la bibliografía para plantear un posible panorama de lo que podíamos encontrar y así marcar puntos de muestreo específicos, sin embargo, en los últimos años el desarrollo minero generó una alta cantidad de residuos (jales) lo que complicó poder seguir el plan elaborado (difícil acceso a áreas, así como zonas sepultadas por los jales, crecimiento urbano), por lo que se siguió una línea recta (transecto) desde la zona de convergencia de los jales principales (Figura 13). Se usaron los cambios en el terreno (vegetación, color en superficie, posición en el paisaje) para poder encontrar tipos de suelo con características intrínsecas diversas, buscando encontrar efectos diferentes y así poder hacer una comparación de los resultados obtenidos entre ellos. Se realizó y describió una calicata por punto siguiendo un diagrama de flujo (Cuadro 4). Las muestras fueron simples y por horizonte.



Cuadro 4. Diagrama de flujo del procedimiento a seguir para un levantamiento de suelos (Siebe, Jahn, & Stahr, 2006).

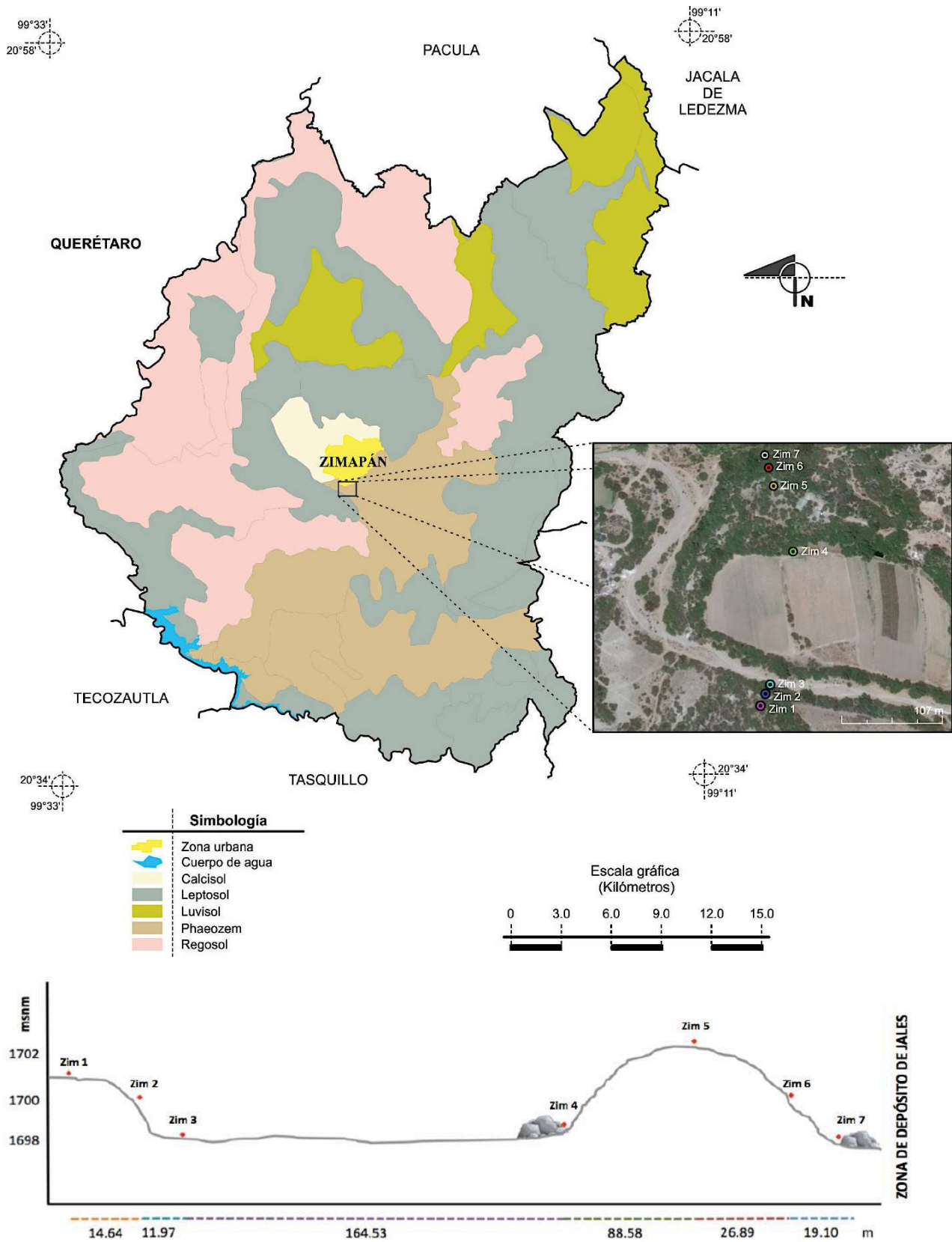
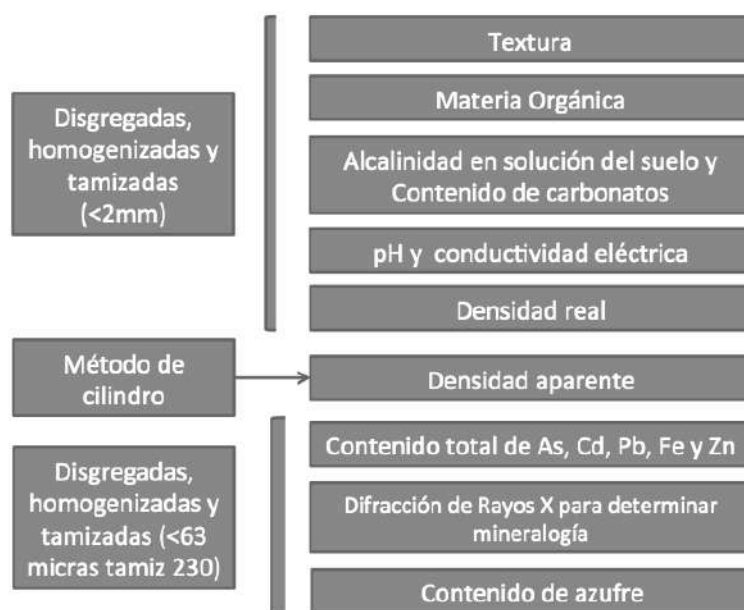


Figura 13. Mapa de suelos dominantes en la región de Zimapán, Hgo. (INEGI, 2009) y localización de puntos de muestreo, debajo, la imagen ilustrativa del muestreo (las rocas significan paso de río temporal y los números inferiores la distancia de un punto a otro).

8.2 Preparación de muestras

La preparación de las muestras se basó en la *NOM-021-RECNAT-2000* donde se consideran una serie de pasos importantes: traslado, recepción, registro, secado, molienda, tamizado, homogeneizado y almacenamiento.

- *Identificación de campo*: nombre, procedencia, fecha de muestreo, número de muestra, profundidad de colecta, pendiente del terreno, manejo del terreno, etc.
- *Traslado*: una vez obtenida la muestra se debe mezclar y disgregar las partículas del suelo a un tamaño más pequeño, previamente marcadas.
- *Recepción y registro*: Se deben registrar con la identificación de campo y una lista de determinaciones requeridas incluyendo métodos.
- *Secado*: Se realiza para facilitar el manejo de la muestra, homogeneizarla y disminuir cambios indeseables; se realizó a temperatura ambiente.
- *Molienda*: dependió del tamaño de partícula que queremos obtener, ya sea con un mazo, un molino o a mano.
- *Homogenizado*: solo agitando la muestra o usar un cuarteador.
- *Tamizado y pesado*: según sean los requerimientos para cada método (Cuadro 5).



Cuadro 5. Diagrama para identificar el tipo de muestra que se usó para cada análisis por su tamaño de partícula.

8.3 Color

El análisis de color en suelo se realiza con el apoyo de la tabla Munsell (Figura 14) a partir de letras y números usando tres parámetros, matiz, brillo y croma. El matiz habla de la longitud de onda dominante en la radiación reflejada por letras mayúsculas (R,YR,Y,GY,G,BG,B,PB,P) y cada página representa un nivel de matiz (parte superior de la página); y el brillo (intervalo de 1 oscuro a 8 claro) que es la proporción de radiación reflejada respecto a la radiación incidente. Ambas son en función del contenido de humedad para poder determinar un color (un valor 0 equivale a color negro y 10 al blanco). Y al final está el croma que expresa la pureza, intensidad o saturación del color (Porta , López-Acevedo, & Poch, 2014).

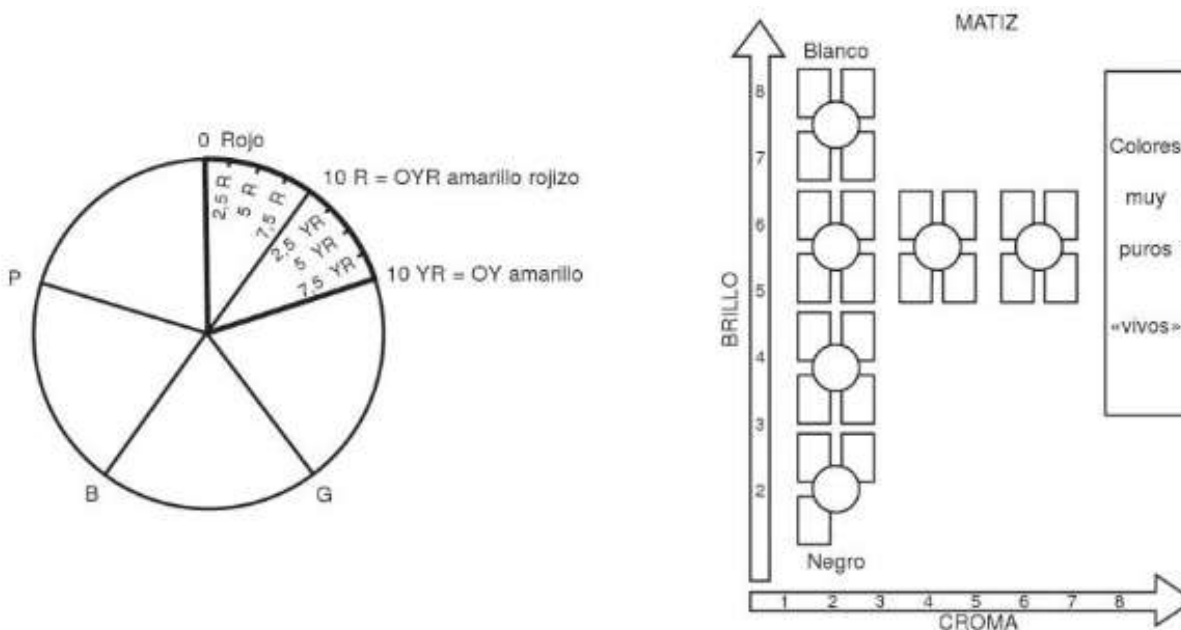


Figura 14. Código Munsell: Matiz, brillo y croma. Colores claros en la parte superior, oscuros en la inferior, pálidos a la izquierda y vivos a la derecha. En (Porta, López-Ácevedo, & Poch, 2014) Por C. Roquero.

8.4 Análisis granulométrico (textura)

La parte sólida del suelo está compuesta por partículas minerales de diferentes tamaños, se divide en fragmentos rocosos o gravas (>2 mm) o tierra formada por arenas limos y arcillas (<2 mm), que a su vez se clasifican según su tamaño. Estas partículas definen el tipo de textura de un suelo según el porcentaje de cada una, con la ayuda del triángulo de texturas (Figura 15) se puede identificar la del suelo en cuestión.

En este trabajo se utilizó el método de la pipeta (más exacto en la determinación granulométrica), para determinar los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes en la fracción mineral del suelo, donde se elimina cualquier partícula cementante para asegurar la dispersión de partículas (Flores Delgadillo & Alcalá Martínez, 2010).

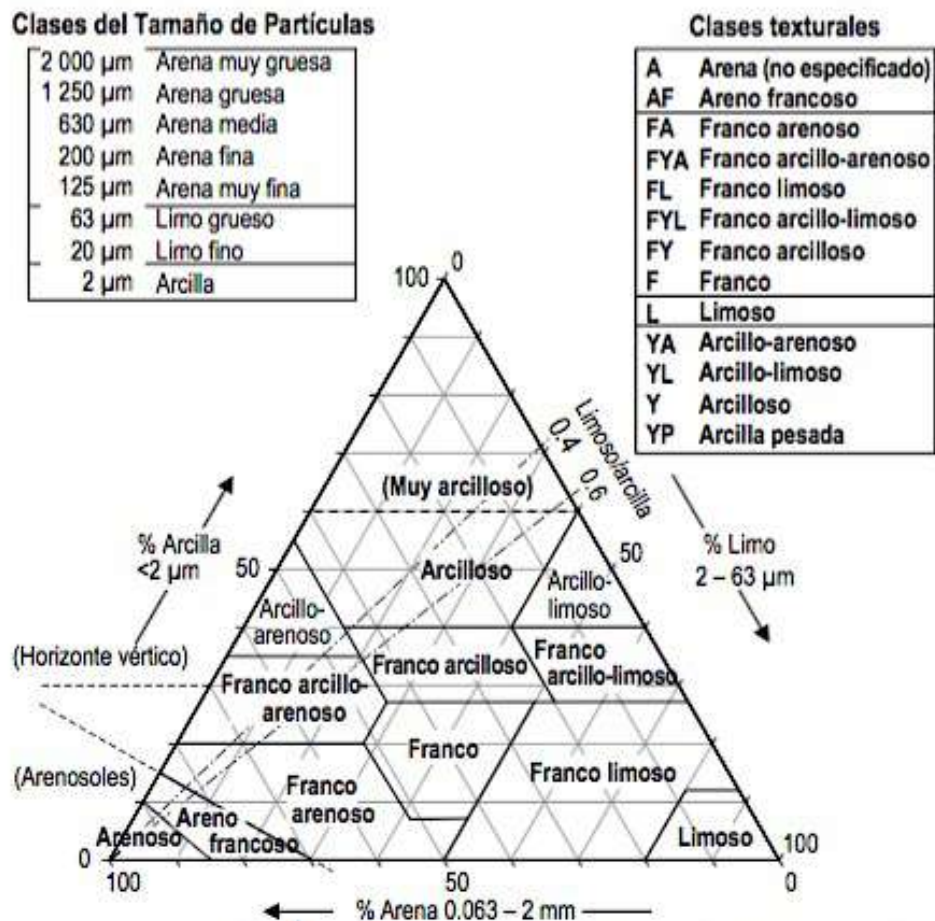
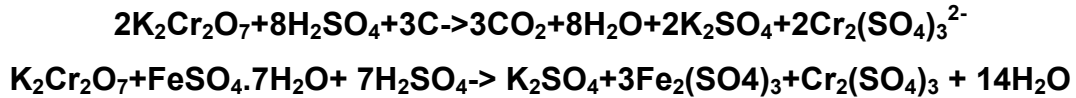


Figura 15. Relación de los constituyentes de tierra fina por tamaño, definiendo las clases texturales, modificado de FAO (1990).

8.5 Materia orgánica

Se usa el método de Walkley y Black (1947), adaptado y modificado por Jackson (1958), que es una digestión vía húmeda en la cual la materia orgánica del suelo se digiere a través de una oxidación del carbono por un exceso de dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado (Hidalgo, 2001), de acuerdo con las reacciones:



Los valores de carbono encontrado están formados por los restos vegetales y animales depositados de manera reciente en el suelo (Tabla 9), la fracción húmica tanto en proceso de mineralización como de humificación, así como las formas inertes del $\text{C}_{\text{elemental}}$ como carbón o grafito, considerando que la materia orgánica del suelo contiene en promedio 58% de carbono (Fassbender, 1975).

Tabla 9. Valores promedio de materia orgánica en suelos (NOM.021-SEMARNAT-2000).

Clase	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
<i>Muy bajo</i>	<4.0	<0.5
<i>Bajo</i>	4.1 - 6.0	0.6 – 1.5
<i>Medio</i>	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
<i>Alto</i>	11.0 – 16.0	3.6 – 6.0
<i>Muy alto</i>	>16.1	>6.0

8.6 Alcalinidad en la solución del suelo (OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- mg/L) y carbonatos (mg/kg)

La calcita es un mineral fácilmente meteorizable y muy común en suelos de regiones áridas y semiáridas (dominante en Zimapán, Hgo.), que contiene cantidades

significativas de dióxido de carbono. Este CO_2 penetra en el agua y genera (en primera instancia) ácido carbónico (H_2CO_3) que forma parte de las reacciones de equilibrio ácido-base en las que se encuentran presentes las diferentes formas carbonatadas donde el ion carbonato (CO_3^{2-}) es el que domina como una base moderadamente fuerte y el

ácido carbónico (H_2CO_3) como un ácido débil. Esta solución que ocurre en condiciones de suelos no saturados por agua y es de gran importancia para la nutrición vegetal se utilizó para medir la alcalinidad en la solución del suelo, que casi siempre está en equilibrio de electrolitos y con una serie de cationes, aniones y moléculas inorgánicas u organometálicas, que varían de acuerdo con las condiciones ambientales y el material parental del suelo (Fassbender, 1994). En este caso la alcalinidad está relacionada con el contenido de carbonatos (mg/Kg) que se pueden encontrar como carbonatos secundarios (concreciones, eflorescencias, etc), cristales de carbonatos secundarios o aragonita (Hodgson, 1987) y a pesar de ser material muy soluble, no siempre se encuentra disponible, a diferencia de los presentes en la alcalinidad en la solución del suelo. En campo se determina la presencia de carbonato cálcico por la efervescencia con HCl al 10% o a partir de determinadas morfologías (nódulos, acumulación masiva, horizonte cementado, etc.). En laboratorio se calcula por medio de una titulación, donde se usa una relación para determinar si son hidróxidos, carbonatos o bicarbonatos (Tabla 10).

Tabla 10. Relación de alcalinidad y calculo de concentraciones (Armienta , Zamora, & Juárez, Manual para el análisis químico de aguas naturales, en el campo y en el laboratorio, 1987).

Resultados de la valoración	Alcalinidad como mg/L de CaCO_3		
	Hidróxidos	Carbonatos	Bicarbonatos
1) $F = 0$	0	0	T
2) $F < \frac{1}{2} T$	0	2F	$T - 2F$
3) $F = \frac{1}{2} T$	0	2F	0
4) $F > \frac{1}{2} T$	$2F - T$	$2(T - F)$	0
5) $F = T$	T	0	0

Resultados de la valoración	Concentraciones en mg/L		
	OH^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-
1) $F = 0$	0	0	$T \times 1.22$
2) $F < \frac{1}{2} T$	0	$F \times 1.2$	$(T - 2F) 1.22$
3) $F = \frac{1}{2} T$	0	$F \times 1.2$	0
4) $F > \frac{1}{2} T$	$(2F - T) 0.34$	$2(T - F) 0.6$	0
5) $F = T$	$T \times 0.34$	0	0

F = Alcalinidad a la fenolftaleína
T = Alcalinidad total

8.7 pH/Conductividad eléctrica

El método 9045D (EPA, 2004) es un proceso para medir pH en muestras de suelos, desechos sólidos, lodos y líquidos no acuosos (<20% agua en el volumen total de la muestra) a partir de una solución de suelo 1:1 (20 mL de agua por 20 g de suelo), y ya que es una medida estrechamente relacionada con el Eh y la conductividad eléctrica, se miden en la misma solución³.

Comúnmente en los suelos, los metales son poco móviles y tienen a acumularse en la parte biológica más activa para estar al alcance de otros organismos, ya que muchos de éstos sirven de nutrientes, sin embargo cuando éste tiende a la acidez la movilidad de éstos aumenta y afecta a especies químicas como hidróxidos o carbonatos, cuando tiende a la alcalinidad puede formar complejos e incluso precipitados.

Por otro lado la conductividad eléctrica (flujo de electricidad a través de un conductor por un transporte de electrones) es influenciada por la cantidad de sales en la solución del suelo, que muchas veces son otorgadas por factores externos, como el riego con aguas tratadas, uso de cal, fertilizantes, zonas con periodos de inundación, etc.

8.8 Densidad real

Es la relación entre el peso de un suelo y el volumen de las partículas que las forman sin tomar en cuenta el espacio poroso, los valores más comunes oscilan entre 1.65 g/cm³ (suelos con alto contenido orgánico) hasta 2.90 g/cm³ (suelos alto contenido de minerales pesados). Se empleó el método del picnómetro en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

8.9 Densidad aparente

La densidad aparente es definida como el peso por unidad de volumen de suelo seco, tomando en cuenta el espacio poroso. Generalmente se expresa en g/cm³ (o unidades equivalentes). La densidad aparente de un suelo promedio está entre 1.2 y 1.3 g/cm³. Suelos con alto contenido de materia orgánica y/o carbonato de calcio tienen densidades aparentes bajas, ya que favorecen la formación de agregados (Casanova

³ Potenciómetro OAKTON (pH, conductividad,)

Olivo , 2005). Según las características de los horizontes (grosor, estabilidad, etc.) se usó el método del cilindro o de la probeta (Rojas, 2012).

8.10 Espacio poroso

El suelo está estructurado en agregados que tienen diferentes formas, tamaños y estabilidad, que al unirse entre sí dejan espacios de diferentes tamaños (poros) (Tabla 11), pueden ser macroporos (>1 mm) donde comúnmente circula el aire y microporos (<1 mm) que funcionan como capilares que ayudan a mantener el agua dentro del suelo. Este espacio poroso se calcula con una fórmula que incluye tanto la densidad real como la densidad aparente (Cuadro 6).

Tabla 11. Relación de valores de la densidad aparente relacionados con el espacio poroso y la parte sólida de diferentes tipos de suelos (Arias Jiménez, 2007).

Espacio Sólidos	Densidad aparente (g/cm ³)	% espacio poroso	% sólidos del suelo
Orgánico	0.1	75	25
Arcilla	1.1	58	42
Franco	1.4	47	53
Arena	1.8	40	60
Compacto	2.0	30	70

$$\% n = \left(1 - \frac{D. Aparente}{D. de la partícula} \right) 100$$

$$D_a = \frac{M}{V_t}$$

$$D_r = \frac{M}{V}$$

D = densidad
 D_a = densidad aparente
 D_r = densidad de partícula
 n = es porosidad expresada en porcentaje

M = masa del sólido
 V_t = volumen total que ocupa el suelo
 V = volumen del sólido

Cuadro 6. Fórmula para calcular el espacio poroso del suelo en (Arias Jiménez, 2007).

8.11 Determinación de la concentración total de metales pesados (Cd, Pb, Fe, Zn) y arsénico (As)

La digestión se realizó con agua regia (proporción HNO₃ 1:3 HCl) ya que el ácido clorhídrico puede disolver minerales, carbonatos y algunos metales más activos y si está muy concentrado incluso puede actuar como un reductor suave que disuelve óxidos, por otro lado el ácido nítrico es un fuerte oxidante que ataca metales que están por debajo del hidrógeno (como el mercurio, la plata, el cobre y el antimonio) (Welcher et. al., 1955). Esta mezcla es altamente corrosiva y de manejo complicado (inestable) que al recibir energía térmica (horno de microondas⁴) alcanzará altas temperaturas y logrará una mejor descomposición de las muestras en poco tiempo (Villegas et. al, 2006). Se utilizó como base el método 3051A de la EPA (2007), ya que plantea diversos escenarios según el tipo de muestra, modificándolo al añadirle el peróxido de hidrógeno como pre tratamiento, debido a que son suelos y se pueden comportar de manera muy reactiva. Al final Cd, Pb, Fe y Zn se leyeron por flama y As por un sistema de flujo acoplado⁵, ambos en el equipo de absorción atómica⁶.

8.12 Azufre por calcinación

El método de calcinación es un proceso de descomposición térmica (o cambio de estado en la constitución física o química del objeto de estudio) del suelo, donde se combina con oxígeno para después ser expuesto simultáneamente al aire y calor (fuerte y prolongado) para cambiar por completo su forma y su naturaleza (muy usado en mineralogía) y calcular su absorbancia en el infrarrojo para que el equipo⁷ (Figura 16) pueda determinar la concentración.

El análisis de azufre consiste en primero elaborar una curva estándar por peso, con valores de 0.08, 0.1, 0.15 y 0.2 gramos (Material de referencia “Leco”⁸) para

⁴ Horno de microondas Mars Xpress 1600 Whats, 90% de poder, 20 min de rampa para llegar a 180°C, 15 minutos duración y enfriamiento.

⁵ FIAS-AA.

⁶ Espectrómetro de absorción atómica Aanalyst 200 (Perkin Elmer).

⁷ LECO S-144DR.

⁸ “Sulfur in coal reference material” Part No. 502-435, sulfur 1.09%(+/-) 0.05%.

introducirse en un crisol (método destructivo) donde se expone a una temperatura controlada (1400C para azufre), para después al ir introduciendo las muestras donde el azufre reacciona con el oxígeno formando SO₂.

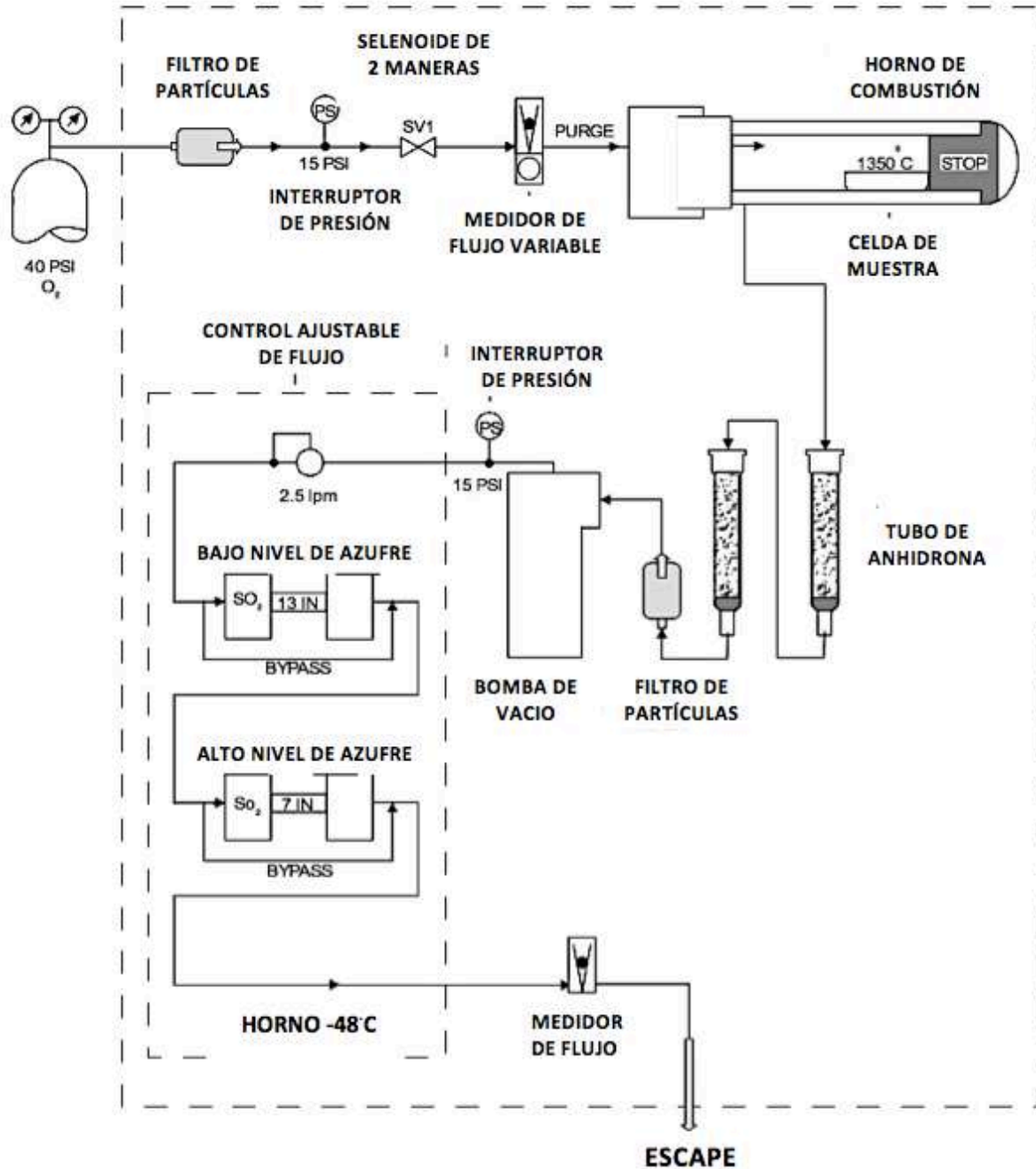


Figura 16. Diagrama de flujo analítico del manual LECO S-144DR.

9 RESULTADOS

En la Figura 17 se puede observar la localización de los sitios de muestreo en un mapa del municipio de Zimapán, para después encontrar un apartado para cada perfil, donde en primer lugar aparecerá la foto del sitio con nomenclatura en sus horizontes (Tabla 12), sus coordenadas geográficas y una descripción general en sus características intrínsecas (la descripción horizonte por horizonte se encuentra en el área de anexos); en segundo lugar están los diagramas que muestran el cambio en las características del suelo a diferente profundidad del perfil (densidad real, densidad aparente, espacio poroso, porcentaje de arcillas, pH, conductividad, alcalinidad en solución del suelo, carbonatos en mg/kg y porcentaje de materia orgánica) y la tercera parte que consta de los diagramas de contenido de azufre, metales pesados y arsénico a diferente profundidad del perfil.

NOMENCLATURA Y DESIGNACIÓN INTERNACIONAL DE HORIZONTES			
A	Horizonte mineral de superficie que muestra acumulación de materia orgánica humificada, o cuya morfología es producto de pedogenénesis, pero sin las características de los horizontes B o E.	p	Horizonte perturbado por arado u otras labranzas.
B	Horizonte mineral que carece de estructura rocosa (no evidente) y que se caracteriza por una o más de las siguientes propiedades: a) Muestra una iluviación de arcillas, hierro, aluminio o humus, sola o en combinaciones. b) Tiene una concentración residual de sesquióxidos en relación al material parental. c) Muestra una alteración de las condiciones originales del material parental con respecto a que presenta neo formación de arcillas y/o óxidos de Fe y Al, además de formación de estructura granular, en bloques o prismática.	h	Acumulación de materia orgánica en horizontes minerales. Solo se usa si el horizonte no presenta disturbios por uso de arado, pastoreo u otra actividad antrópica (por lo que los sufijos h y p son excluyentes entre si).
		w	Alteración in situ reflejada en mayores contenidos de arcilla, color mas rojizo y presencia de estructura en comparación con el horizonte subyacente.
C	Horizonte o capa mineral no consolidado a expensas del cual se forman los horizontes A y B, y que carece de propiedades características de los demás horizontes principales.	k	Acumulación de carbonatos de calcio.
		g	Horizonte moteado, indicando diferencias en condiciones de óxido-reducción

Tabla 12. Nomenclatura de horizontes (Siebe *et. al.*, 2006).

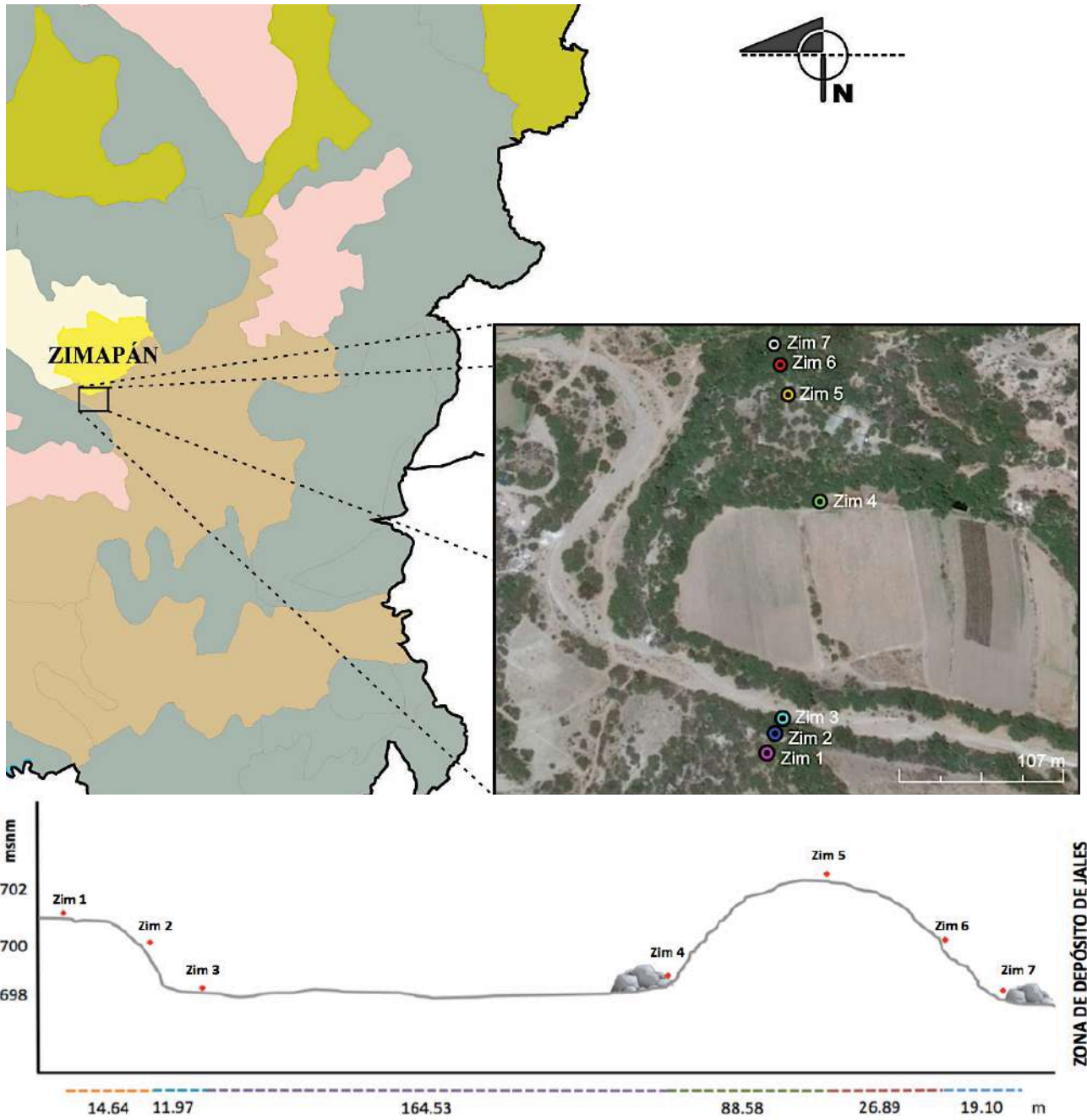


Figura 17. Modificación de figura 14 ubicando los puntos de muestreo para introducir a los resultados.

9.1 Perfil Zim 1

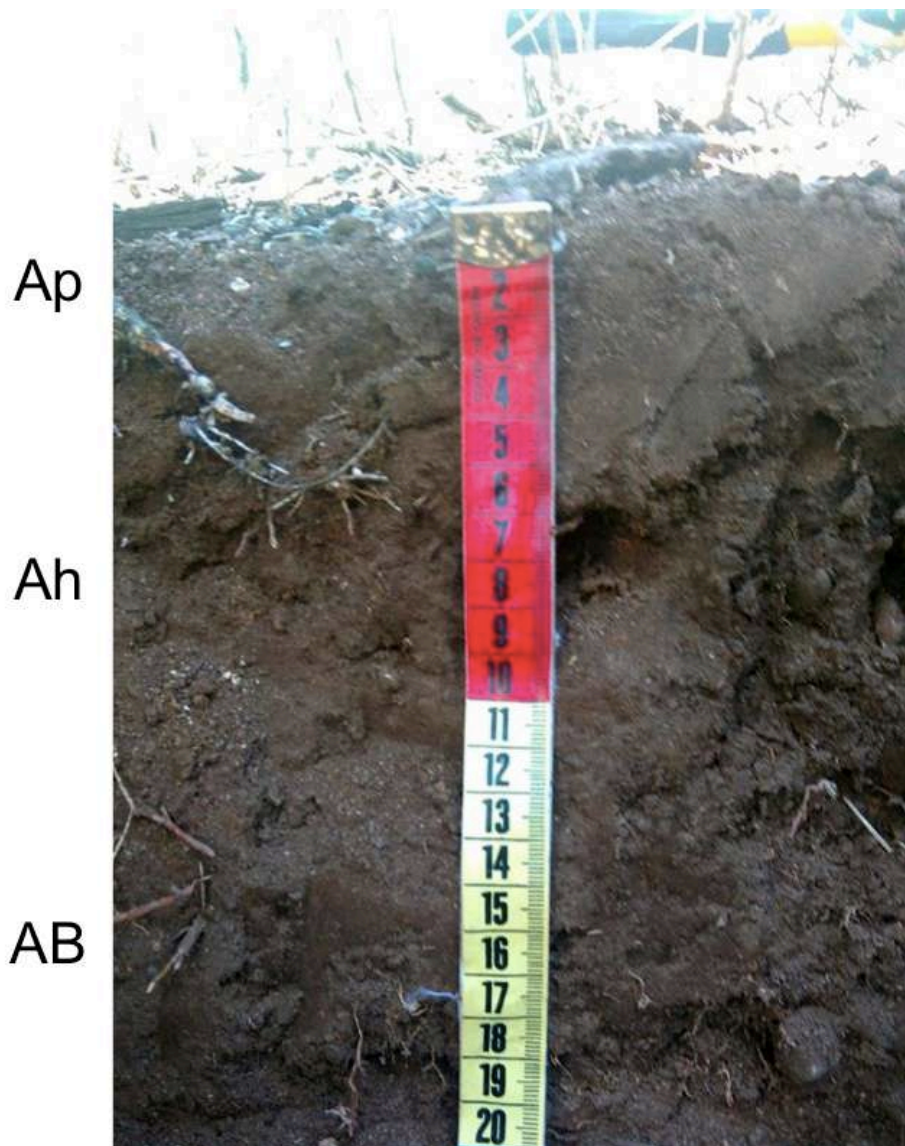


Figura 18. Fotografía del perfil de suelo Zim 1 con escala.

Ubicación: $20^{\circ}43'21''$ N $99^{\circ}23'11''$ O

Perfil ubicado en la superficie de una ladera cóncava y convexa en perfil, con poca pendiente (2%) exposición norte. Uso de suelo variado, era usado como zona agrícola, después solo para pastoreo y posteriormente se ha procedido a quemar constantemente la hierba. Perfil somero (20 cm), con buen drenaje, color café grisáceo, alta pedregosidad (60-80%), sin presencia de carbonatos, ni reacción a la fenolftaleína. Estructura de grano simple en superficie y granular a profundidad. Baja estabilidad de agregados, poros intersticiales de micro a muy finos, poca densidad de raíces y límites difusos.

En el sitio 1 se determinaron 3 horizontes (Anexo 15.1.1) los cuales mostraron una densidad real y aparente mayor en superficie y muy similar en los dos horizontes subsecuentes (Figura 19), el horizonte 2 fue el que tuvo valores menores en comparación con el 1 y el 3 en espacio poroso, arcillas y conductividad. En cuanto a la alcalinidad en la solución del suelo y el pH tienen un comportamiento similar donde los valores en superficie son significativamente más bajos que en el tercer horizonte esto relacionado a la presencia de carbonatos.

Prof.	pH	Densidad Real g/cm ³	Densidad Aparente g/cm ³	Espacio poroso	Arcillas	Cond. mS/cm	mg/kg CaCO ₃	Alcalinidad	
								mg/L CaCO ₃	mg/L HCO ₃ ⁻
0 - 3	6.9	2.98	1.3	56%	26%	0.2	0	100	122
3 - 11	6.6	2.15	1.14	47%	22%	0.1	0	100	122
11 - 20	7.9	2.43	1.1	54%	31%	0.2	51,260	180	219.6

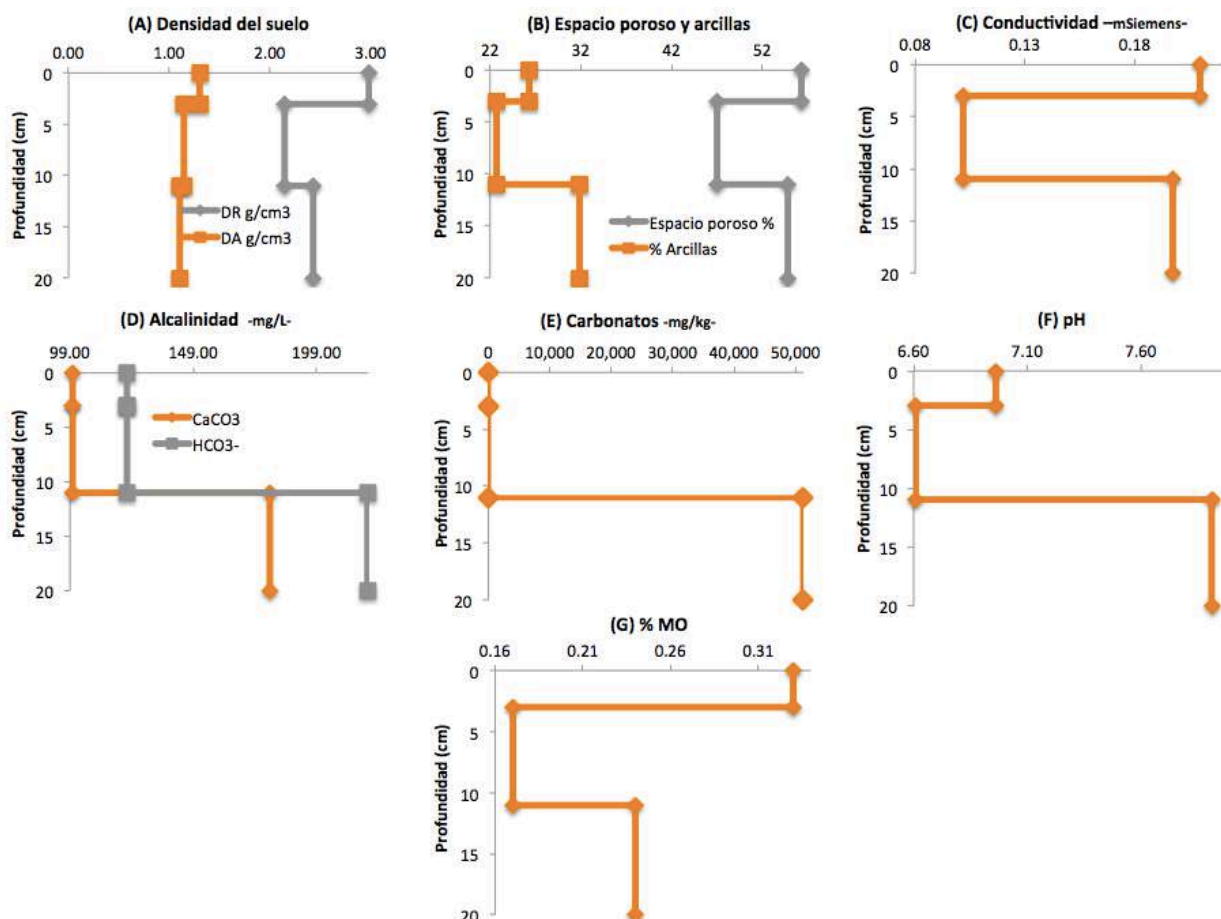


Figura 19. Diagramas que muestran el cambio de características como densidad real (DR), densidad aparente (DA), espacio poroso, porcentaje de arcillas, parámetros físico químicos (pH, conductividad), así como alcalinidad carbonatos y porcentaje de materia orgánica (MO); a diferente profundidad del perfil Zim 1.

Todos los elementos analizados (Figura 20) (a excepción del hierro) tienen el mismo comportamiento (S, Cd, Pb, As y Zn), donde cada horizonte contiene una concentración hasta 6 veces mayor que en el tercero (de 11 a 20 cm). El azufre por ejemplo, presenta 3,880 mg/kg en el primer horizonte y disminuye a profundidad. De acuerdo a las concentraciones máximas permisibles en la NOM 147 (excepto el S, Fe, Zn que no se encuentran normados) y la NOM 004 (sin normar el Fe y S), el contenido de plomo en el primer horizonte las rebasa de manera importante y el segundo solo las rebasa para el suelo agrícola, pero acercándose de manera importante a los suelos industriales y el tercer horizonte aun siendo alto no rebasa la norma; en cuanto al arsénico todos los horizontes rebasan los límites máximos permisibles en suelo agrícola, industrial e incluso de un biosólido respectivamente, pero ni el cadmio ni el zinc rebasan las normas.

Prof.	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Fe mg/kg	Zn mg/kg	S mg/kg
0 - 3	531	7	1,065	22,993	637	3,880
3 - 11	205	5	724	16243	325	1724
11 - 20	75	1	184	23,118	98	972

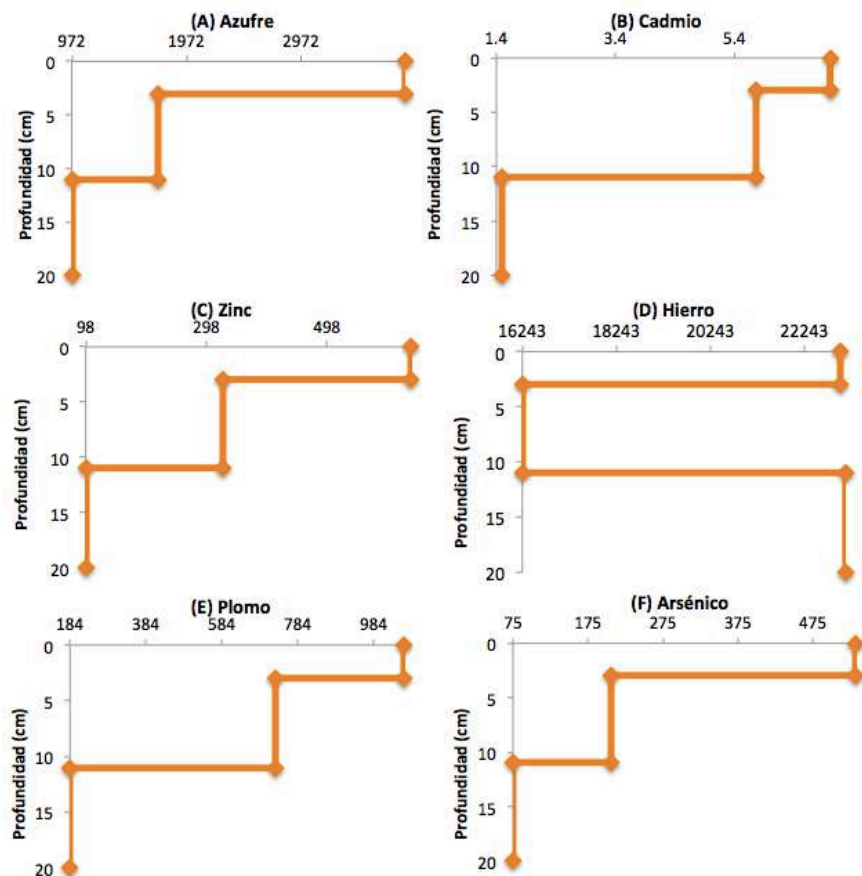
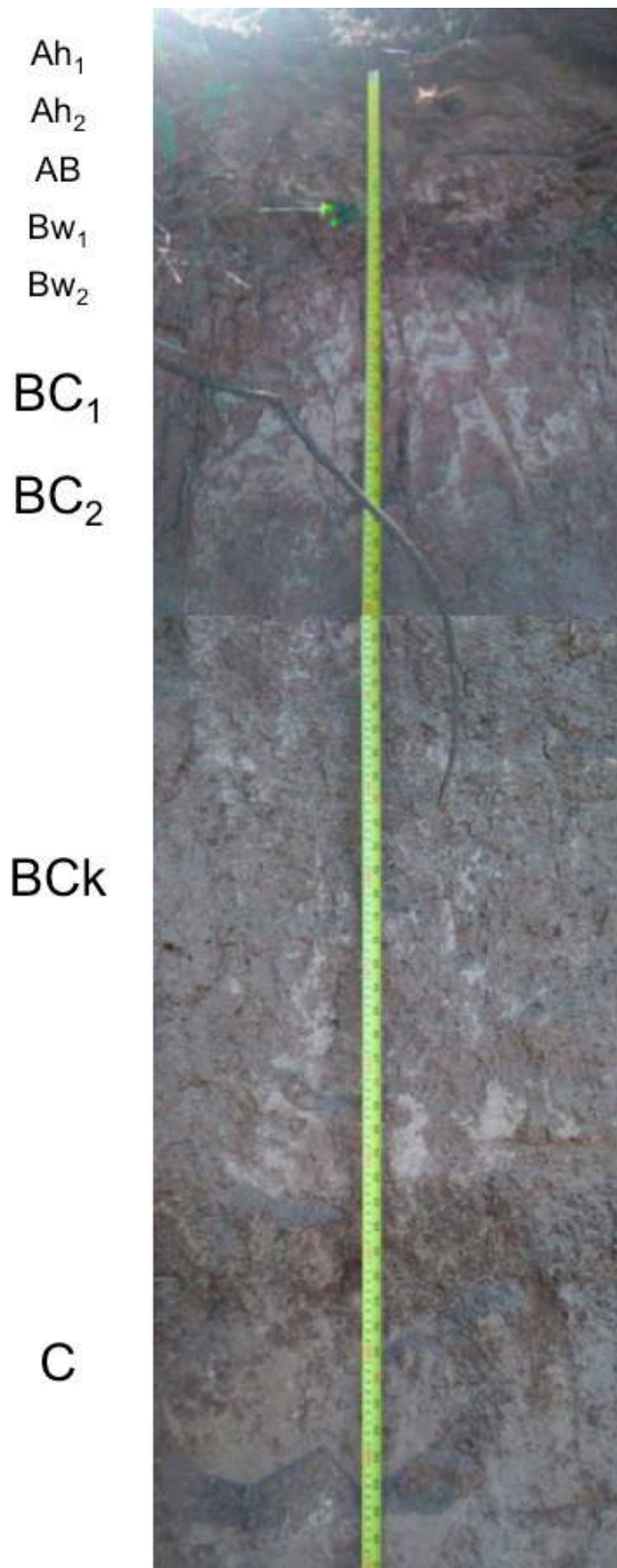


Figura 20. Diagramas de contenido de (A) azufre (calcinación), (B, C, D, E) metales pesados y (F) arsénico a profundidad en Zim 1.



9.2 Perfil Zim 2

Ubicación: 20°43'22" N 99°23'10" O
 Perfil ubicado en la pared de caída de una ladera cóncava en superficie y convexa en perfil exposición este. Mantillo de 10 cm de profundidad. Sin un uso de suelo particular por su posición en la ladera. Perfil profundo (185 cm) color café blancuzco con poca pedregosidad (20-10% en superficie). Reacción a la fenolftaleína y al HCl (carbonatos y aluminio intercambiable) a lo largo del todo el perfil. Estructura granular (fino-media), angular y prismático medio, angular en bloques (rompe en angular fino) y hasta masivo. Estabilidad de agregados variable a través del perfil (baja, alta, media, baja), al igual que el tipo de poros que va de vesiculares e intersticiales comunes muy finos a pocos medios para después haber grietas profundas. Densidad de raíces de muy baja a media con cambios en horizontes que van desde difusos a abruptos. Formación de cristales en el octavo horizonte (127-167 cm).

Figura 21. Fotografía del perfil de suelo Zim 2 con escala.

En el sitio 2 (Figura 21) se determinaron 9 horizontes (Anexo 15.1.2) donde la densidad aparente fue homogénea, a diferencia de la densidad real que presentó un valor mayor en superficie que fue disminuyendo hasta la mitad del perfil, para después aumentar y mantener valores similares el resto, teniendo como resultado valores de espacio poroso irregulares hasta los 28 cm, para después presentar un intervalo entre 51-53%. El contenido de arcillas en superficie es de 36% en el primer horizonte, aumentando a profundidad a 56% y posteriormente baja a 27%. En cuanto a la conductividad fue aumentando de manera significativa a profundidad, al contrario del pH que a pesar de ser muy irregular, mostró una tendencia a disminuir a mayor profundidad. Los carbonatos presentaron su valor menor en superficie para después aumentar, volver a disminuir y tener un incremento importante en el último horizonte. Por otro lado la alcalinidad en la solución del suelo mostró un comportamiento similar para los carbonatos y bicarbonatos, de 0 a 39 cm presenta valores altos, de 39 a 167 disminuyen y en el último horizonte hay un incremento significativo (Figura 22).

Prof.	pH	Densidad Real g/cm ³	Densidad Aparente g/cm ³	Espacio poroso	Arcillas	Cond. mS/cm	mg/kg CaCO ₃	Alcalinidad	
								mg/L CaCO ₃	mg/L HCO ₃ ⁻
0 - 4	7,74	2.65	1.18	55.42	36%	0.46	53,300	100	122
4 - 10	8.14	2.37	1.15	51.4	56%	0.45	56,660	120	146
10 - 18	8.19	2.16	1.16	46.19	27%	0.36	58,400	160	195
18 - 28	8.28	2.6	1.07	58.8		0.5	55,820	140	170
28 - 39	7.84	2.23	1.03	53.73		1.7	56,000	100	122
39 - 66	7.87	2.37	1.06	55.21		2.8	55,280	60	73
66 - 127	7.81	2.3	1.12	51.22		4.26	54,920	60	73
127 - 167	7.97	2.37	1.11	53.09		4.3	55,760	60	73
167-185	7.23	2.38	1.1	53.71		4.4	61,400	120	146

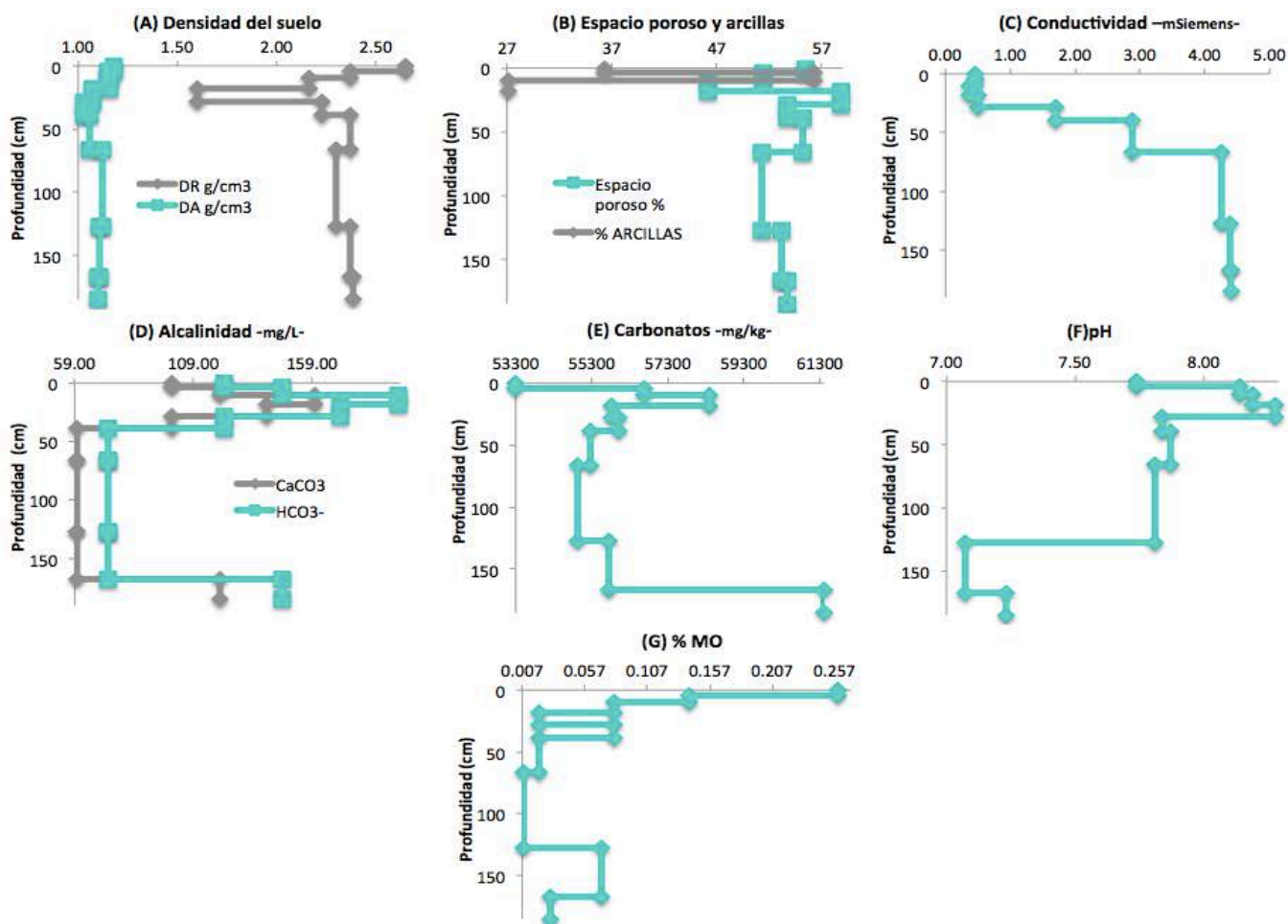


Figura 22. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad en el perfil Zim 2.

Todos los elementos analizados (Cd, Pb, Fe, As, y Zn), a excepción del hierro y el azufre, tienen el mismo comportamiento (Figura 21), donde el primer horizonte rebasa de manera significativa los valores del resto del perfil.

De acuerdo a las concentraciones máximas permisibles en la NOM 147 (sin normar el S, Fe, Zn) y 004 (sin normar el Fe y S), el contenido en plomo en el primer horizonte no rebasa los niveles máximos de ninguna de las dos (se acerca al de suelos agrícolas y sobrepasa las condiciones *excelentes* en biosólidos); para el arsénico los primeros 5 horizontes rebasan los límites permisibles para NOM 147 y solo el primero para la NOM 004. El cadmio con un valor máximo de 3.5 mg/kg no rebasa ninguna norma al igual que el zinc.

Prof.	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Fe mg/kg	Zn mg/kg	S mg/kg
0 - 4	115.8	3.5	340	21,368	275	2719
4 - 10	31.2	1.5	103.25	20,055	75	1011
10 - 18	24.6	0.75	11.25	21,743	49	725
18 - 28	22.15	0.5	7.5	20,868	60	1051
28 - 39	28.25	1	2.5	15,868	45	1699
39 - 66	4.14	1	9	18,430	52	1050
66 - 127	2.92	1	7.25	20,243	56	1835
127 - 167	5.09	1	24	26,305	77	1763
167-185	2.89	1.5	3.25	14,180	53	1921

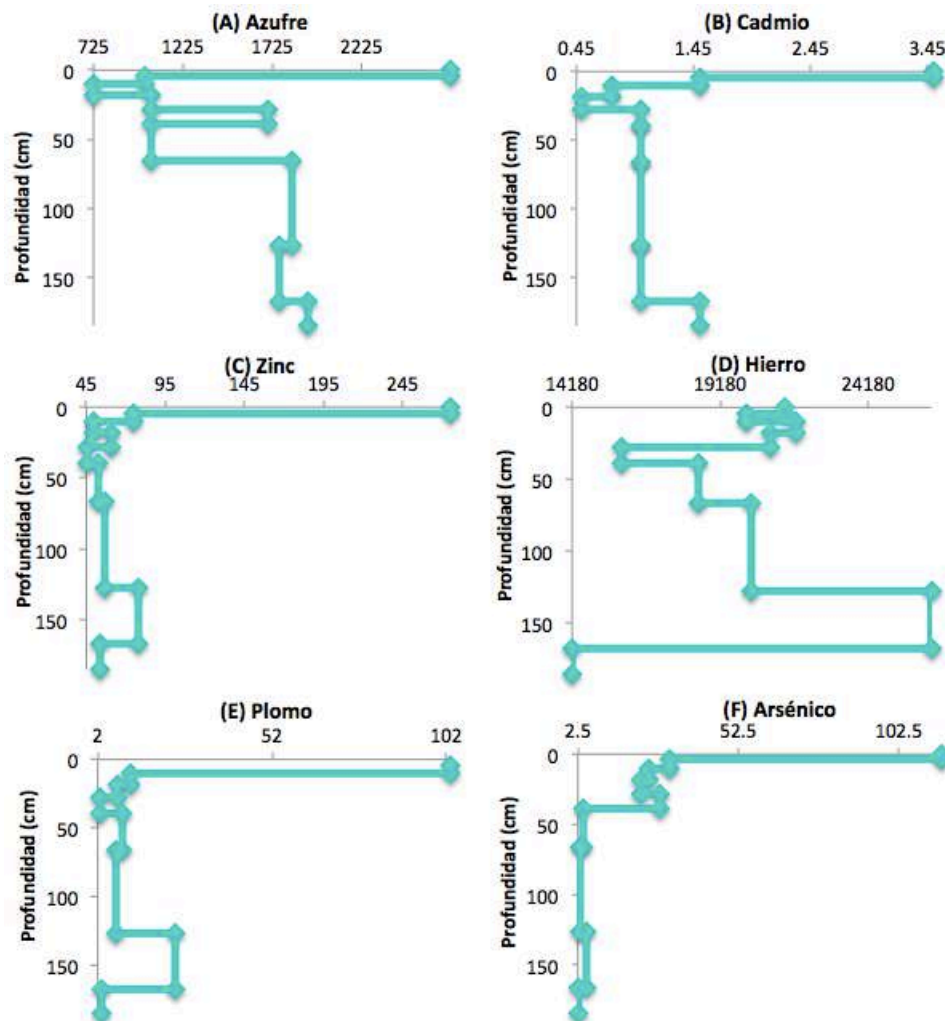


Figura 23. Diagramas de contenido de (A) azufre (calcinación), (B,C,D,E) metales pesados y (F) arsénico (digestión en horno de microondas) a profundidad en Zim 2.

9.3 Perfil Zim 3

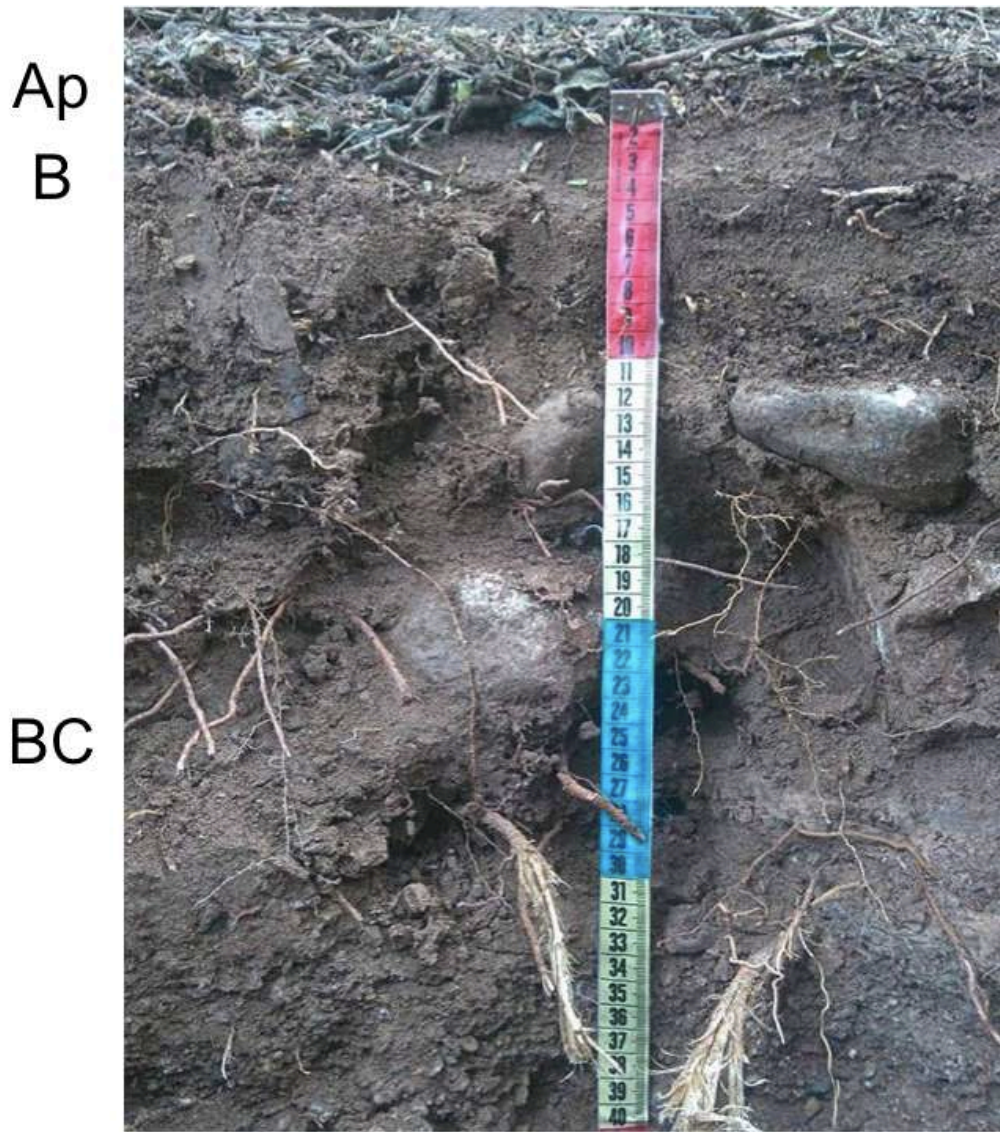


Figura 24. Fotografía del perfil de suelo Zim 3 con escala.

Ubicación: 20°43.368 N 99°23.163" O

Perfil ubicado en una terraza aluvial de la ladera cóncava en superficie y convexa en perfil con exposición al Este con color café grisáceo, justo en la orilla de lo que es el camino de un río. Mantillo de 2 cm de profundidad. Perfil somero (40 cm) muy pedregoso (10-80%) con estructura granular fina y sub angular que rompe en granular (medios-finos y finos-muy finos), estabilidad de agregados de baja a media, poros intersticiales de finos a muy finos y densidad de raíces de muy baja a baja. Reacción a la fenolftaleína y al HCl (carbonatos y aluminio intercambiable).

En el sitio 3 (Figura 24) se determinaron 3 horizontes (Anexo 15.1.3) los cuales mostraron una densidad real y aparente mayor en superficie y muy similar en los dos horizontes subsecuentes (Figura 25), el horizonte 2 fue el que tuvo valores menores en comparación con el 1 y el 3 en cuanto a porcentaje de arcillas, para el espacio poroso se mantuvo relativamente homogéneo al igual que el pH, la conductividad presentó valores más altos en el horizonte 2. En cuanto a la alcalinidad en la solución del suelo los valores en superficie son más bajos que en el tercer horizonte al igual que para los carbonatos.

Prof.	pH	Densidad Real g/cm ³	Densidad Aparente g/cm ³	Espacio poroso	Arcillas	Cond. mS/cm	mg/kg CaCO ₃	Alcalinidad	
								mg/L CaCO ₃	mg/L HCO ₃ ⁻
0 - 4	7.79	2.9	1.3	55%	52%	0.2	58,800	100	122
4 - 7	7.75	2.2	1.0	54%	23%	0.3	59,900	100	122
7 - 10	7.76	2.3	1.01	54%	39%	0.1	62,720	120	146

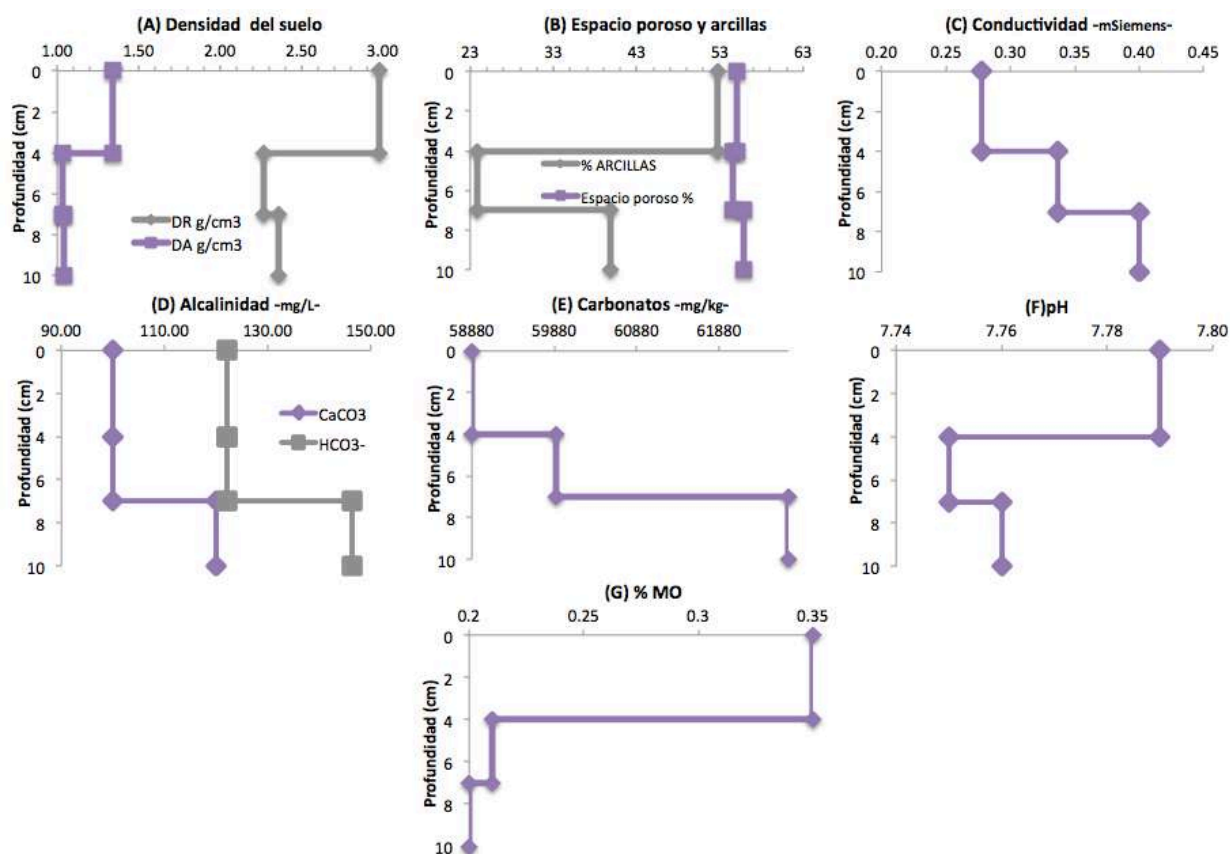


Figura 25. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad del perfil Zim 3.

Todos los elementos analizados (S, Cd, Pb, Fe, As, y Zn) (Figura 26), tienen el mismo comportamiento, donde los valores de zinc, hierro y plomo son mayores en el primer y segundo horizonte en comparación con el tercero, a excepción del cadmio y el azufre. De acuerdo con las NOM 147 y 004 el único elemento que rebasa las concentraciones máximas permisibles en los primeros dos horizontes, es el arsénico con valores de 35 y 41 mg/kg respectivamente (solo para suelo agrícola, residencial y comercial).

Prof.	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Fe mg/kg	Zn mg/kg	S mg/kg
0 - 4	35.9	1.5	36	22,305	77	1,037
4- 7	41.8	1.5	38	23,430	80	9,376
7 - 10	7.52	1.5	15	1,655	45	595

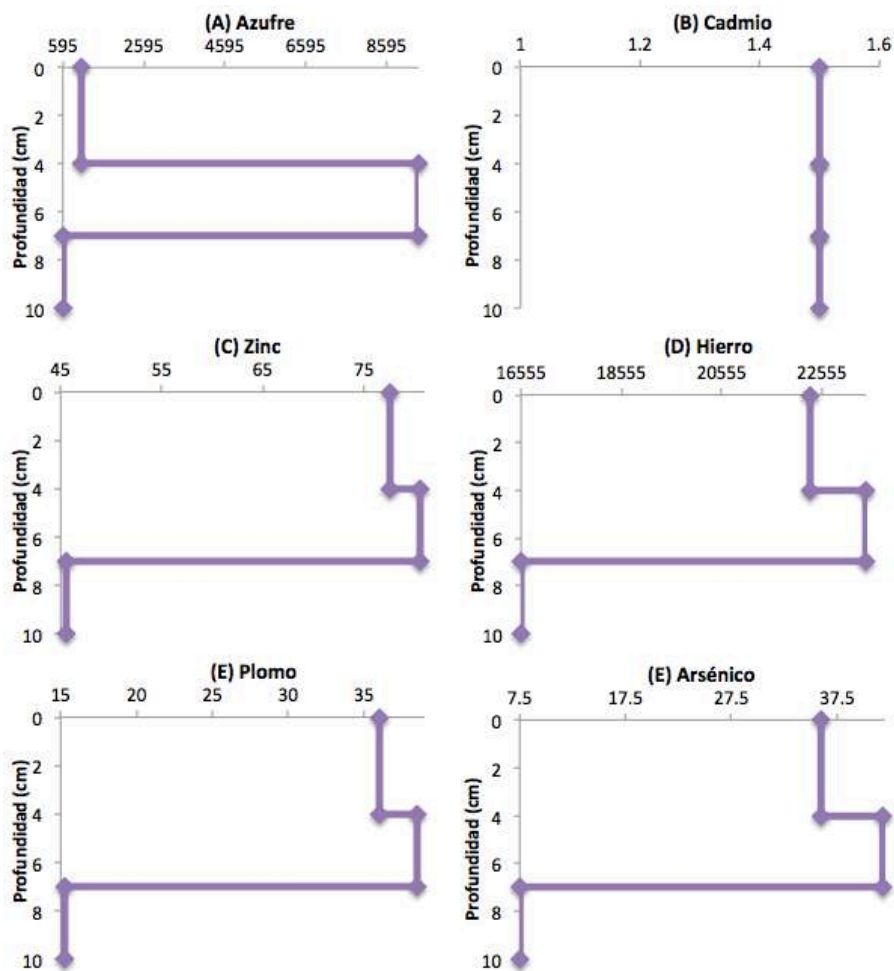


Figura 26. Diagramas de contenido de azufre, arsénico y metales pesados (cadmio, zinc, hierro y plomo) a profundidad en Zim 3.

9.4 Perfil Zim 4

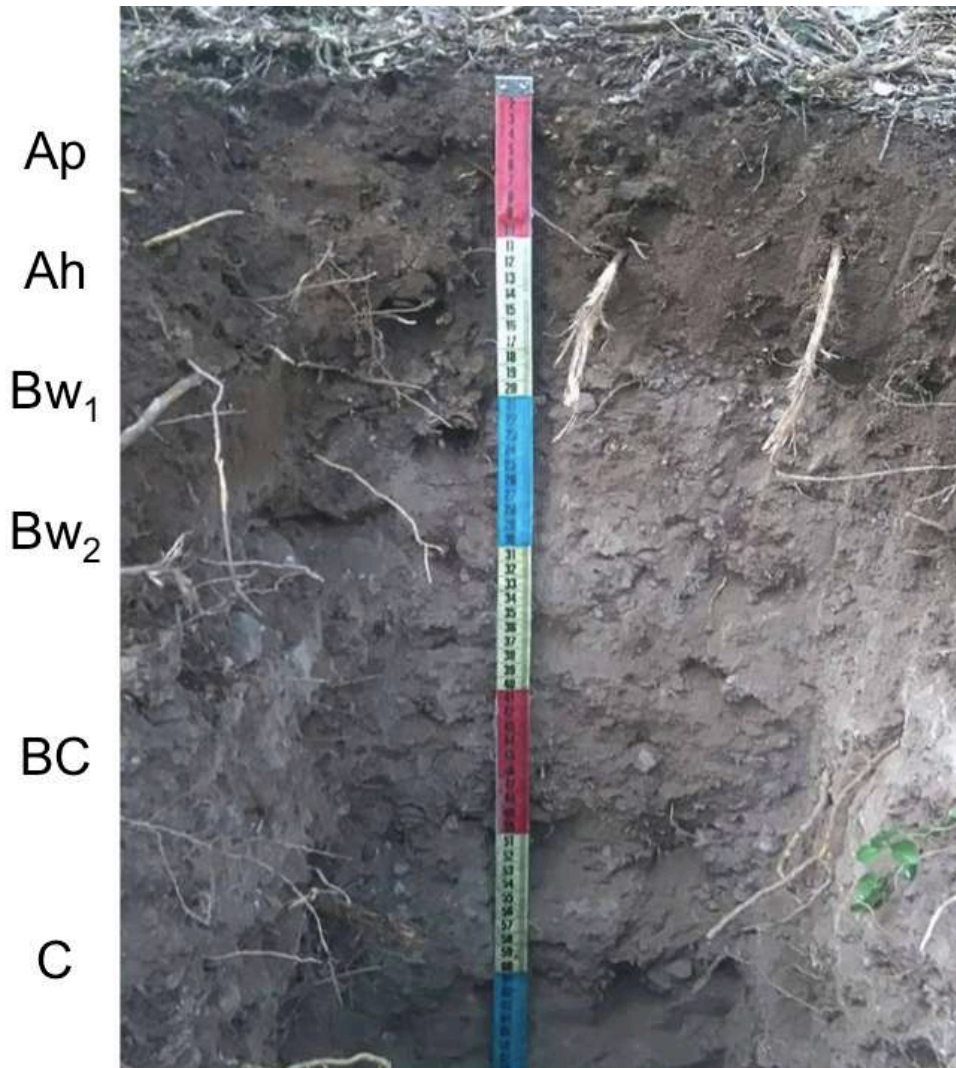


Figura 27. Fotografía del perfil de suelo Zim 4 con escala.

Ubicación: $20^{\circ}43'27'' N$ $99^{\circ}23'8.7'' O$

Perfil ubicado en la base aluvial del piedemonte de una ladera, plana en superficie y cóncava en perfil con una inclinación de 20%, con exposición Oeste. Uso de suelo mixto (pastoreo, cultivo y con periodos de desuso). Mantillo de 3 cm de profundidad. Perfil moderadamente profundo (68 cm) color café blancuzco y muy poca pedregosidad a profundidad. Reacción a la fenolftaleína y al HCl (excepto en el primer horizonte). Estructura granular (muy fino-fino), sub angular en bloque (rompe a granular) que va de medios-finos-muy finos (ambos) y se vuelve masivo a profundidad. Estabilidad de agregados que va de media a alta y baja densidad de raíces. En cuanto a la porosidad, se presentaron al principio del perfil intersticiales comunes seguido de pocos tubulares y vesiculares, para que en la parte final hubiera muy pocos intersticiales.

En el sitio (Figura 27) se determinaron 4 horizontes (Anexo 15.1.4) (Figura 28) que presentaron una densidad aparente muy homogénea, pero en cuanto a la densidad real y al espacio poroso se mostraron valores superiores en los primeros horizontes. Las arcillas mostraron un aumento en el segundo horizonte; la conductividad al igual que la alcalinidad y el contenido de carbonatos fue aumentando con la profundidad; en cuanto al pH se mantuvo neutral con tendencias alcalinas.

Prof.	pH	Densidad Real g/cm ³	Densidad Aparente g/cm ³	Espacio poroso	Arcillas	Cond. mS/cm	mg/kg CaCO ₃	Alcalinidad	
								mg/L CaCO ₃	mg/L HCO ₃ ⁻
0 – 6	7.7	3.1	0.99	68.25	37.5	0.48	59,900	100	122
6 – 16	7.63	2.9	1.0	66.31	39.9	0.72	60,680	100	122
16 – 24	7.65	2.5	0.95	66.13	35.1	0.58	60,800	120	146
24 – 34	7.74	2.3	0.94	59.77		0.48	62,660	180	219
34 – 51	7.73	2.4	0.99	58.69		0.59	65,240	220	268
51 - 68	7.67	2.5	1.02	60.26		0.9	65,180	180	219

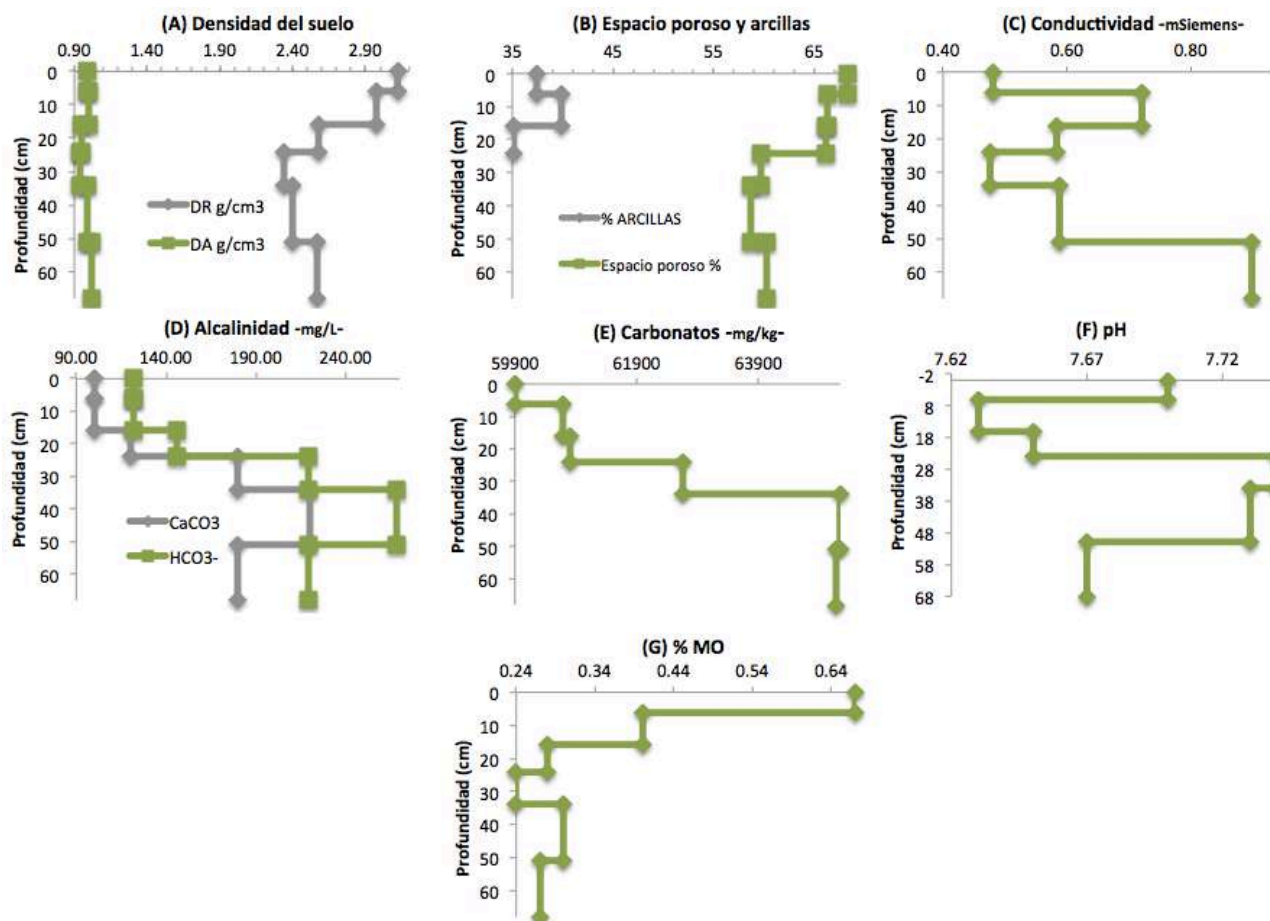


Figura 28. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad del perfil Zim 4.

Para el azufre y el arsénico las concentraciones fueron disminuyendo a profundidad de manera constante, el cadmio y el plomo mostraron un valor superficial menor que fue aumentando gradualmente hasta el tercer horizonte (16-24 cm) para después disminuir drásticamente y aunque el cadmio presentó un leve incremento a profundidad que no se repitió en el horizonte siguiente. En cuanto al zinc y el hierro las concentraciones más altas fueron en el primer horizonte para disminuir gradualmente en el tercer horizonte (correspondiente a los valores más bajos para todos los elementos) después tuvo un ligero incremento (menor si se compara con el valor más alto) (Figura 29).

Solo los valores del arsénico y el plomo en sus niveles más altos rebasan la NOM-147 y la NOM-004.

Prof.	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Fe mg/kg	Zn mg/kg	S mg/kg
0 – 6	518	7	670	25,805	512	3,728
6 – 16	357	9.75	1,017	23,243	500	2,230
16 – 24	206	11	1,146	22,805	362	1,177
24 – 34	119	1	555	20,493	150	922
34 – 51	115	3	562	20,743	125	739
51 - 68	83	1.75	357	21,868	112	664

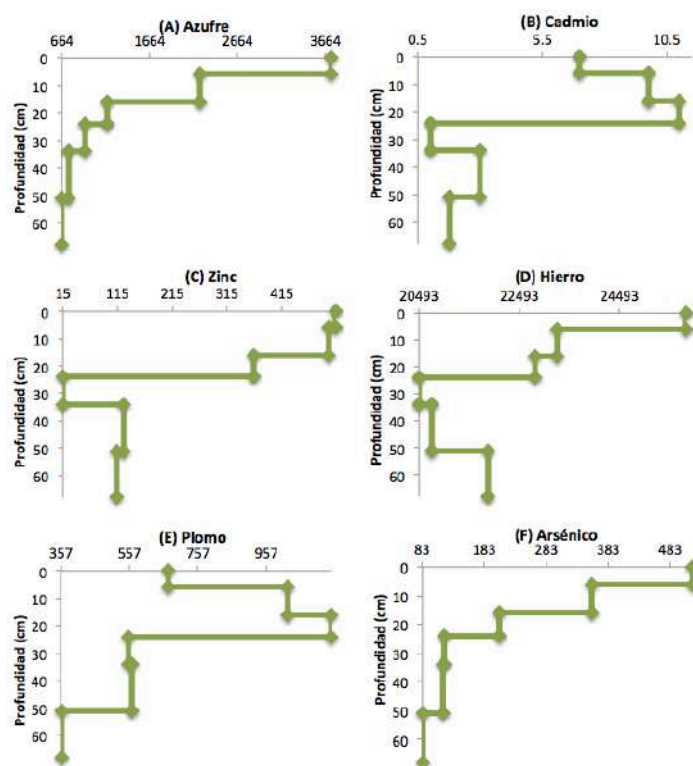


Figura 29. Diagramas de contenido de azufre, arsénico y metales pesados (cadmio, zinc, hierro y plomo) a profundidad en Zim 4.

9.5 Perfil Zim 5

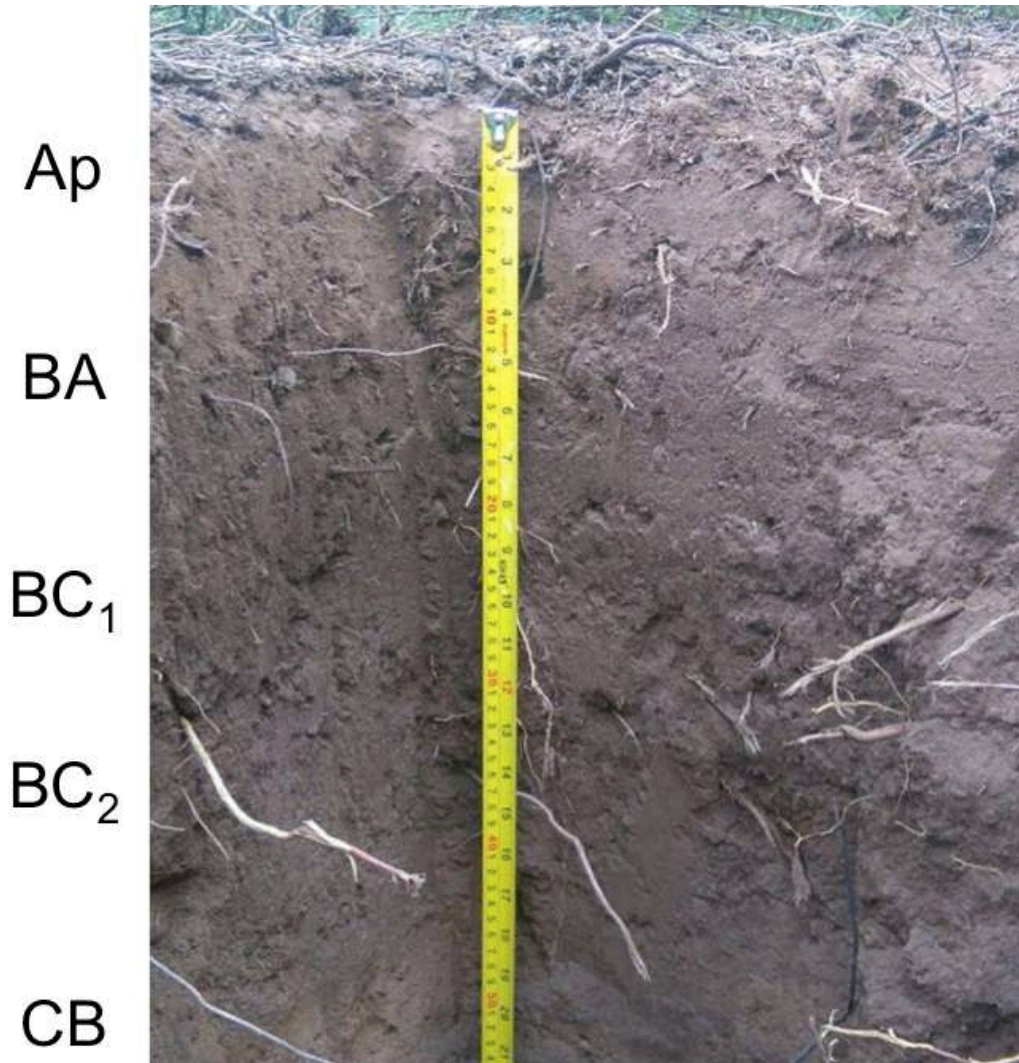


Figura 30. Fotografía del perfil de suelo Zim 5 con escala.

Ubicación: $20^{\circ}43'30.18'' N$ $99^{\circ}23'9.11'' O$

Perfil de 56 cm de profundidad con un acumulación de material vegetal no humificado (2 cm) ubicado en la superficie cumbre de una ladera plana en superficie y cóncava en perfil, exposición norte, con poca pedregosidad en superficie (10%). Uso de suelo mixto, principalmente pastoreo (en algún tiempo se usó para siembra). Color café con tintes grisáceos. Reacción a la fenolftaleína y al HCl. Estructura granular muy fina en superficie y sub angular (rompe a granular muy fino-fino-medio a profundidad). Estabilidad de agregados media a baja en superficie y de media a alta a profundidad. Poros intersticiales muy finos y densidad de raíces baja. Presencia de carbón en el tercer horizonte.

En el sitio 5 se determinaron 5 horizontes (Anexo 15.1.5) (Figura 30), donde la densidad aparente fue relativamente homogénea y la densidad real presentó su valor más alto en el horizonte superficial al igual que el espacio poroso, a diferencia del contenido de arcillas, que fue mayor a la mitad del perfil que en la parte superficial. La alcalinidad en la solución del suelo se comportó de manera diferente para cada uno de sus elementos, en cuando al contenido de bicarbonatos la menor cantidad se presentó en superficie para después aumentar con la profundidad hasta el tercer horizonte y volver a disminuir, el carbonato de calcio presenta un pequeño aumento en el segundo horizonte para después disminuir y comportarse igual en el resto del perfil y al final el contenido de carbonatos se comportó de manera “constante”, siendo este el único perfil que los presentó. La conductividad aumentó con la profundidad, el pH mantuvo su tendencia alcalina y los carbonatos tuvieron su valor más alto en superficie, con una disminución de manera importante en el tercer horizonte para después aumentar a profundidad (Figura 31).

Prof.	pH	Densidad Real g/cm^3	Densidad Aparente g/cm^3	Espacio poroso	Arcillas	Cond. mS/cm	mg/kg CaCO_3	Alcalinidad	
								mg/L CaCO_3	mg/L HCO_3^-
0 – 5	7.9	3.63	1.13	60.8	23.5	0.4	68,660	260	317
5 – 20	8.38	2.38	1.07	54.9	21.5	4.17	68,240	320	292
20 - 31	8.63	2.23	1.06	52.3	25.9	5.04	65,540	240	195
31 - 45	8.12	2.35	1.08	53.9		8.43	66.560	400	390
45 - 56	8.3	2.39	1.04			9.03	67,520	300	268

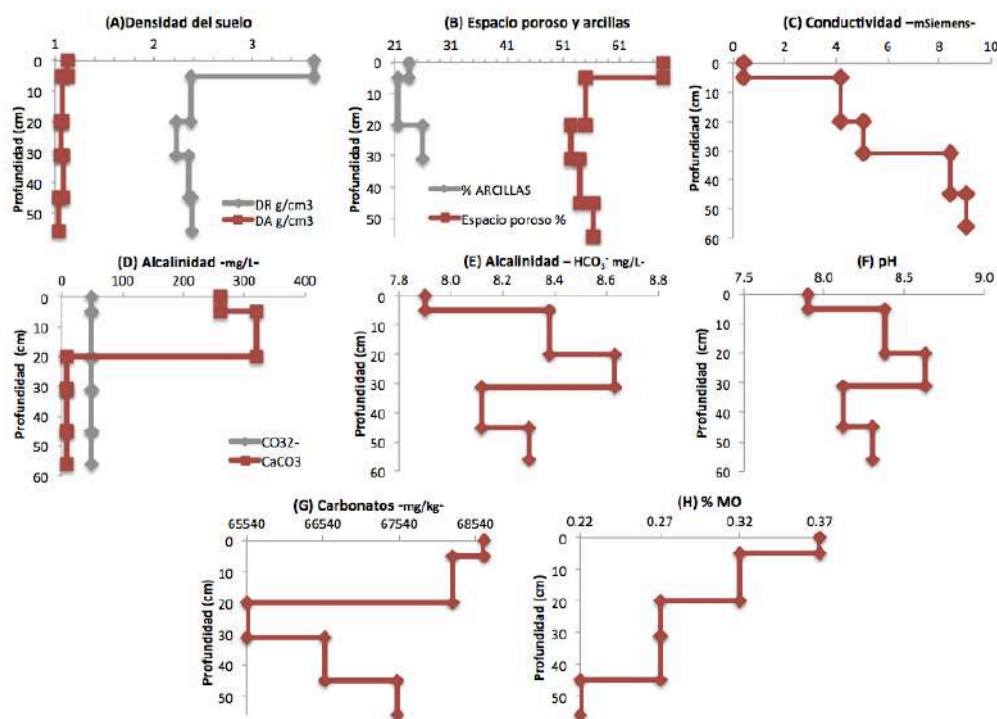


Figura 31. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad del perfil Zim5.

En el perfil 5 (Figura 32) a diferencia de los demás, el azufre y el hierro mostraron un valor mayor a profundidad en contraste con el horizonte superficial, incluso el arsénico mostró ese aumento, pero en el último horizonte descendió de manera importante. Para el cadmio y el plomo el valor superficial fue cercano al promedio, donde después hubo un aumento y disminución alternada en cada horizonte hasta el último que presentó el valor más bajo. El zinc tuvo el valor mayor en superficie y fue disminuyendo a profundidad, como en los demás perfiles. Solo el arsénico rebasó las normas por tipo de uso de suelo agrícola, residencial y comercial, pero no el de suelo industrial.

Prof.	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Fe mg/kg	Zn mg/kg	S mg/kg
0 – 5	128	2	156	13,993	300	1,032
5 – 20	168	3.25	283	15,243	135	1,531
20 - 31	215	1.5	122	17,868	109	1,727
31 - 45	215	3	283	17,243	115	2,927
45 - 56	117	0.5	15	16,805	58	3,014

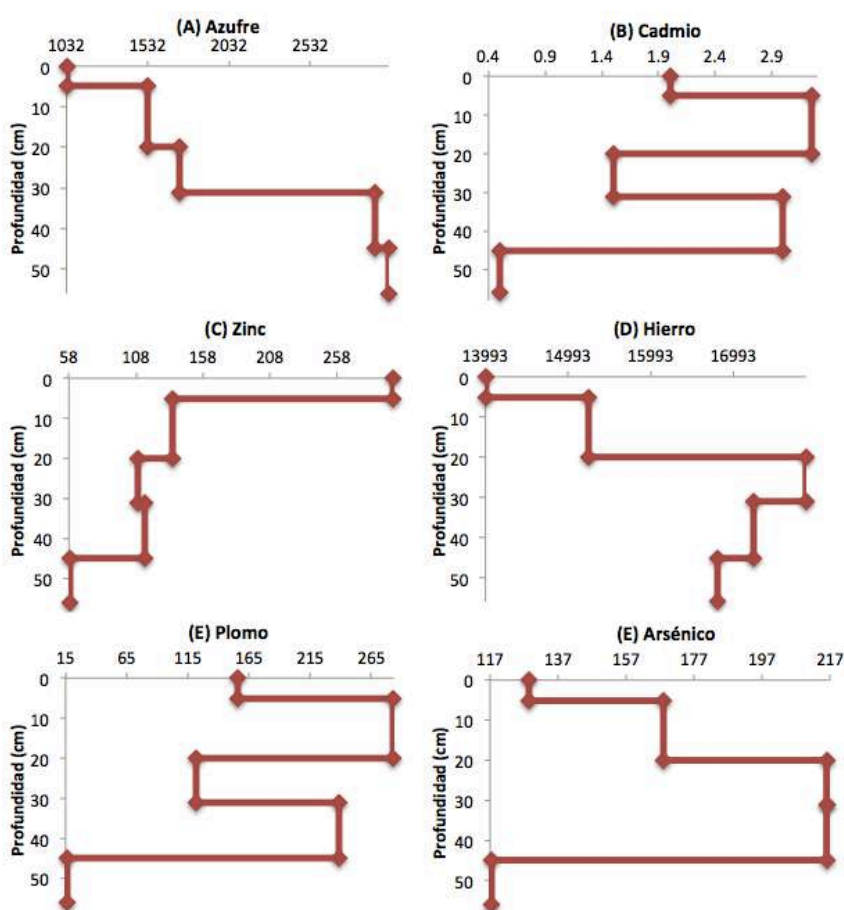


Figura 32. Diagramas de contenido de azufre, arsénico y metales pesados (cadmio, zinc, hierro y plomo) a profundidad en Zim 5.

9.6 Perfil Zim 6

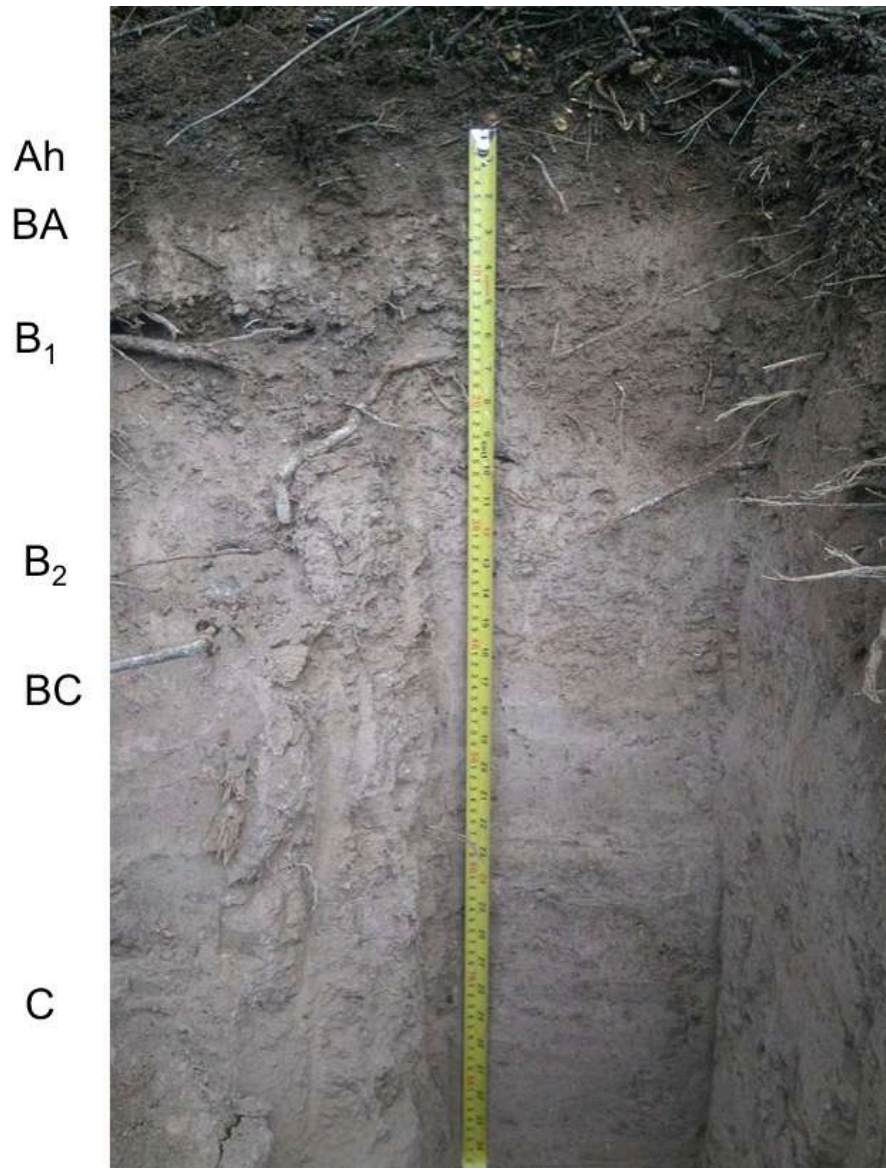


Figura 33. Fotografía del perfil de suelo Zim 6 con escala.

Ubicación: $20^{\circ}43'31.04'' N$ $99^{\circ}23'9.19'' O$

Perfil con 87 cm de profundidad y un mantillo de 10 cm de profundidad en el lomo de ladera (plana en superficie, cóncava en perfil) con exposición este y una inclinación de 35° , sin pedregosidad y uso de suelo forestal. Estructura granular (medio-fino) en superficie y sub angular que rompe a granular (medio-fino-muy fino) a profundidad y con un fondo masivo. Estabilidad de agregados que va de alta-media-baja a lo largo del perfil con una densidad de raíces que va de media-baja-muy baja. Poros intersticiales finos, vesiculares y tubulares muy finos hasta el 4o horizonte. Reacción a la fenolftaleína y al HCl.

En el sitio 6 (Figura 33) se determinaron 6 horizontes (Anexo 15.1.6) (Figura 34), donde la densidad aparente se mantuvo homogénea a lo largo del perfil y tanto la densidad real como el espacio poroso mostraron un valor mayor en el horizonte superficial para después disminuir y mantener valores muy cercanos entre sí. En cuanto a la alcalinidad en la solución del suelo, tanto para los bicarbonatos como los carbonatos el valor más alto fue en la zona superficial para después disminuir drásticamente, con un leve incremento en los últimos dos horizontes. La conductividad al igual que el pH fue menor en superficie, mientras que los carbonatos fueron aumentando a profundidad (con excepción del último horizonte, que presentó una disminución importante).

Prof.	pH	Densidad Real g/cm ³	Densidad Aparente g/cm ³	Espacio poroso	Arcillas	Cond. mS/cm	mg/kg CaCO ₃	Alcalinidad	
								mg/L CaCO ₃	mg/L HCO ₃ ⁻
0 - 5	7.19	4.76	0.93	80.4	30.3	0.63	68,360	200	244
5 - 10	7.6	2.52	0.98	61	43.9	2.62	68,120	60	73.2
10 - 26	7.48	2.53	0.91	63.9	33.1	4.48	69,020	40	48.8
26 - 42	7.54	2.58	0.91	64.6		5.67	71,300	40	48.8
42 - 55	7.66	2.4	0.92	61.6		4.79	72,080	60	73.2
55 - 87	7.73	2.76	0.97	64.8		3.61	67,820	80	97.6

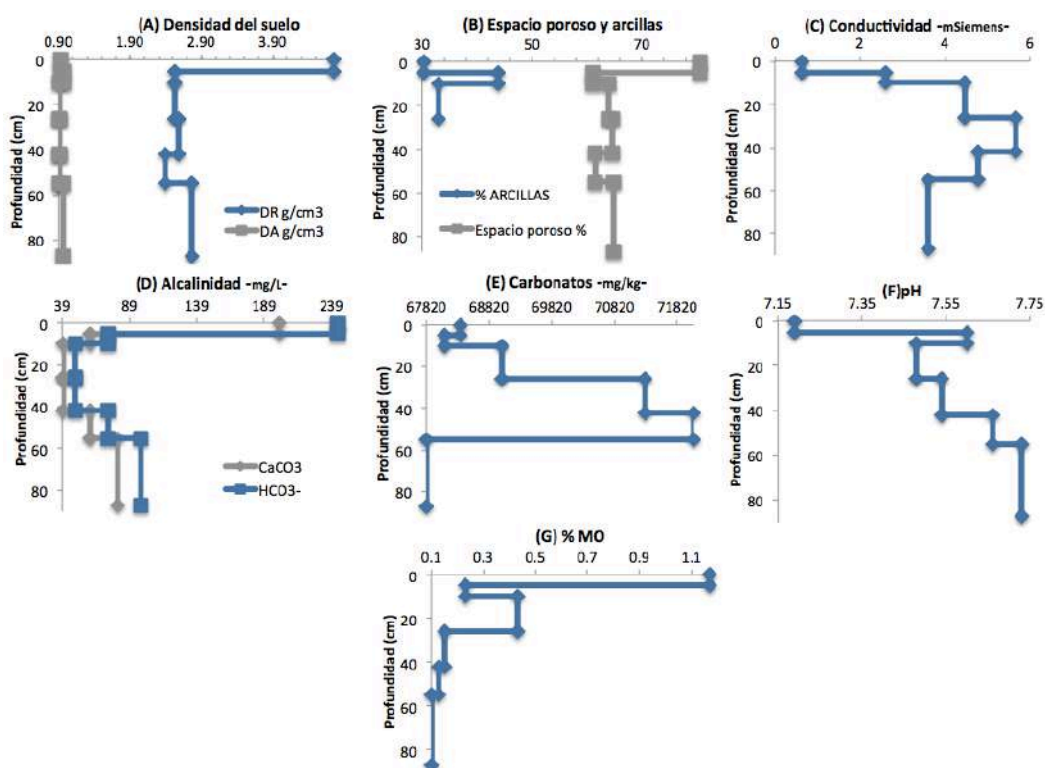


Figura 34. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad del perfil Zim6.

El cadmio, zinc, plomo y arsénico muestran claramente la acumulación de EPT en superficie, de manera más clara que en los demás perfiles, ya que después de los primeros 5 cm de profundidad (primer horizonte) hay una disminución muy drástica. El azufre por otro lado mostró un valor “promedio” en superficie para después alcanzar su valor más alto (entre los 10 y 26 cm profundidad) y tener una disminución drástica a profundidad, mientras que el hierro mostró un patrón diferente a los demás elementos, presentando su valor más alto en superficie para después disminuir drásticamente, sin embargo hay un aumento importante en el último horizonte (Figura 35).

Tanto el arsénico como el plomo solo rebasan la NOM-147 y la NOM-004 en el horizonte superficial.

Prof.	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Fe mg/kg	Zn mg/kg	S mg/kg
0 – 5	1,484	14.5	1,082	42,493	1,550	14,665
5 – 10	153	1	15.2	21,368	60.5	12,538
10 - 26	193.2	1	5	16,555	52.7	21,119
26 - 42	229.4	1.25	4.5	16,868	65	4,887
42 - 55	177.9	1	5.7	13,118	56.8	2,701
55 - 87	23.7	0	7.25	28,993	83.7	1,832

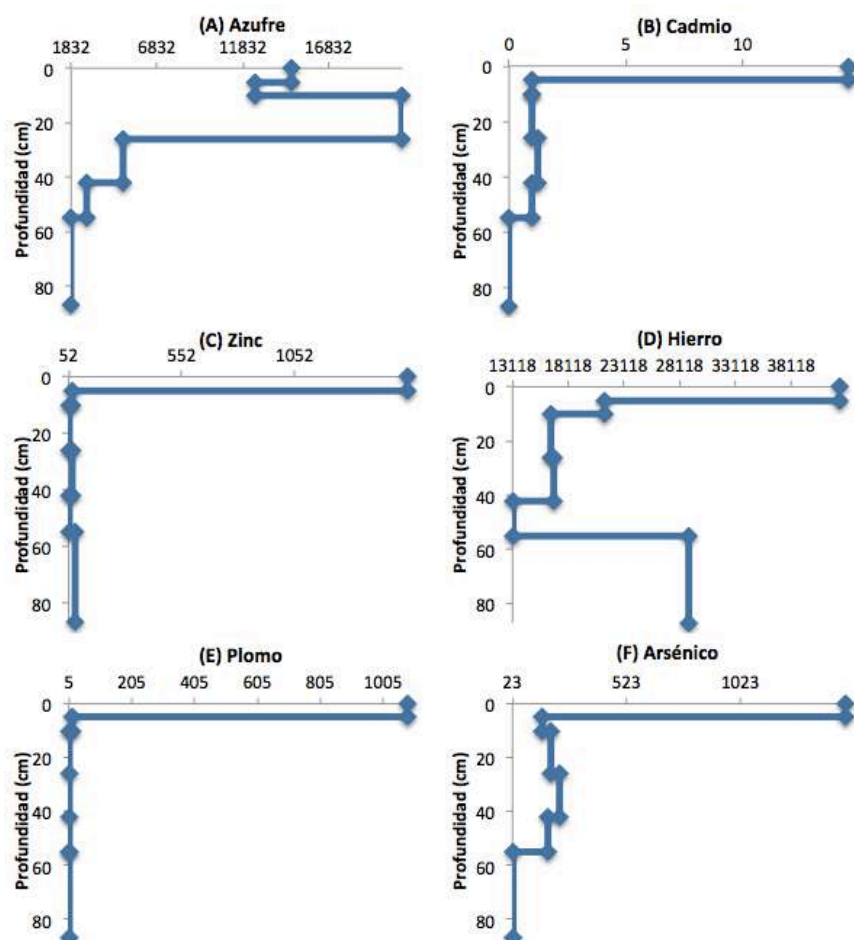


Figura 35. Diagramas de contenido de azufre, arsénico y metales pesados (cadmio, zinc, hierro y plomo) a profundidad en Zim 6.

9.7 Perfil Zim 7

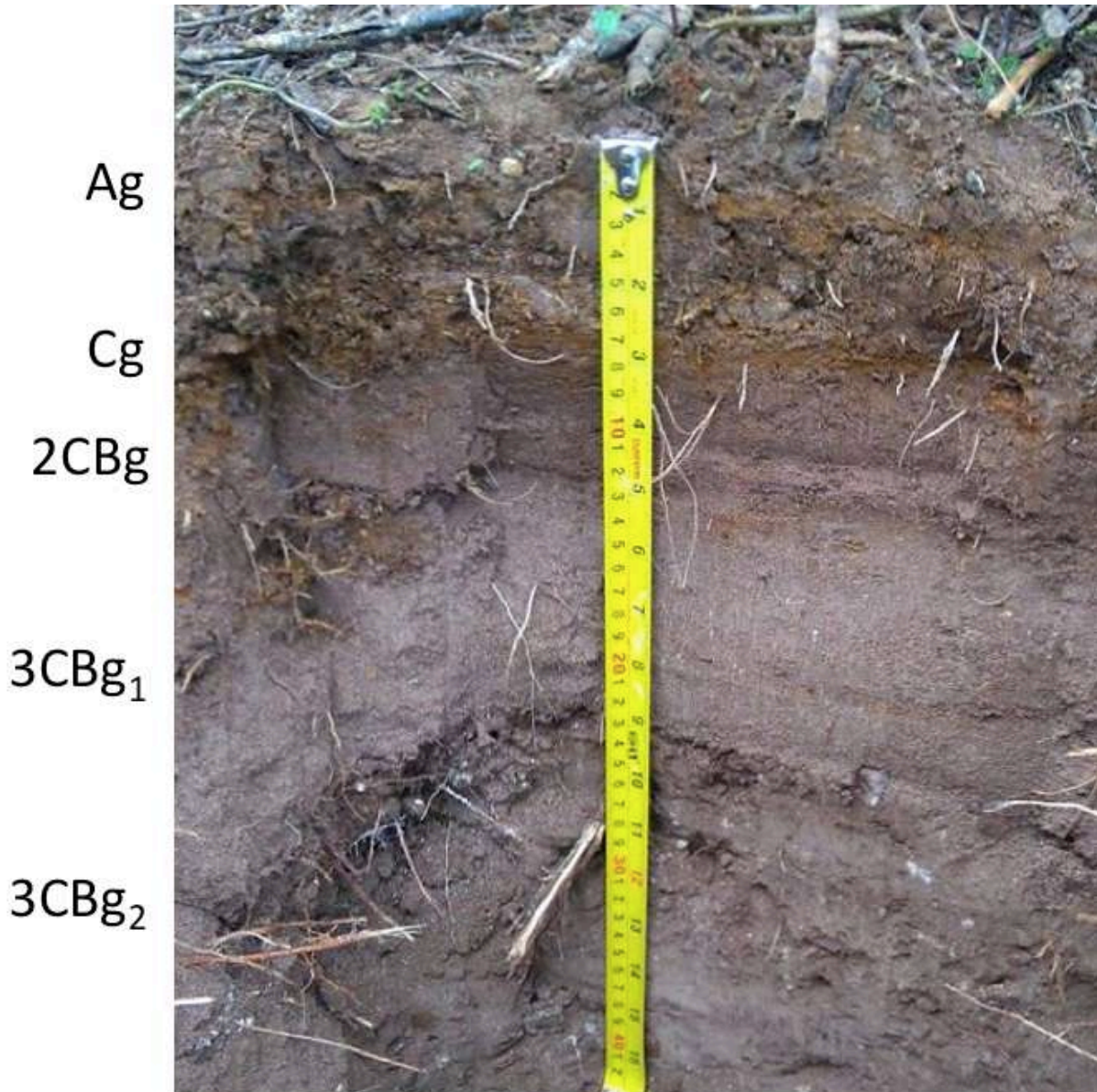


Figura 36. Fotografía del perfil de suelo Zim 6 con escala.

Ubicación: $20^{\circ}43'31.67''$ N $99^{\circ}23'9.29''$ O

Perfil poco profundo (44 cm) ubicado en el pie de ladera con una inclinación de 35° y exposición oeste. Alta pedregosidad (40%) en el 4o horizonte. Estructura tipo masiva en superficie y angular en bloques en profundidad. Pocos poros intersticiales que van de fino a muy fino. Densidad de raíces de baja a muy baja. Reacción a la fenolftaleína y al HCl. Estabilidad de agregados de baja-media (a lo largo del perfil). Es el punto más cercano a los jales.

En el sitio 7 (Figura 37) se determinaron 6 horizontes (Anexo 15.1.7) (Figura 37). Este perfil fue el más heterogéneo en todos sus datos, tal vez asociado a la acumulación coluvial (perfil estratificado). Sin embargo a mostró algunas similitudes en el comportamiento de las distintas variables analizadas. La densidad aparente mostró su mayor valor en superficie, para después disminuir un poco (9 a 14 cm) y volver a aumentar a profundidad. La densidad real, el espacio poroso y el contenido de arcillas en superficie mostraron un comportamiento similar, donde el valor alto, se encontró por debajo del segundo horizonte (zona que presenta los mayores contenido del perfil), para después disminuir y volver a subir a profundidad, pero sin rebasar el valor en superficie. En cuanto a la alcalinidad del suelo, tanto los carbonatos de calcio como los bicarbonatos presentaron un valor menor en superficie, para después aumentar progresivamente, aunque en el último horizonte disminuyó la concentración a un valor “intermedio”. Para la conductividad el valor más alto fue en superficie para después disminuir de forma “escalonada” a profundidad, a diferencia del contenido de carbonatos, donde el valor mayor se encontró a la mitad del perfil mientras que los valores de superficie y profundidad fueron similares pero con un valor menor en el segundo horizonte (2.7 a 9 cm). El pH mostró un horizonte por debajo de 7, algo que solo se había encontrado en el perfil Zim1.

Prof.	pH	Densidad Real g/cm ³	Densidad Aparente g/cm ³	Espacio poroso	Arcillas	Cond. mS/cm	mg/kg CaCO ₃	Alcalinidad	
								mg/L CaCO ₃	mg/L HCO ₃ ⁻
0 - 2.7	7.3	3.13	1.12	64.1	19.1	2.7	63,740	40	48.8
2.7 - 9	6.9	3.41	0.83	75.6	56.7	3	61,940	40	48.8
9 - 14	7.3	2.47	0.9	63.5	32.3	1.7	66,200	60	73.2
14 - 24	7.6	2.19	1.09	50.1		0.7	66,380	80	97.6
24 - 36	7.4	2.54	1.01	60.1		2.1	63,020	60	73.2
36 - 44	7.7	2.27	1.08	52.3		0.1	62,960	60	73.2

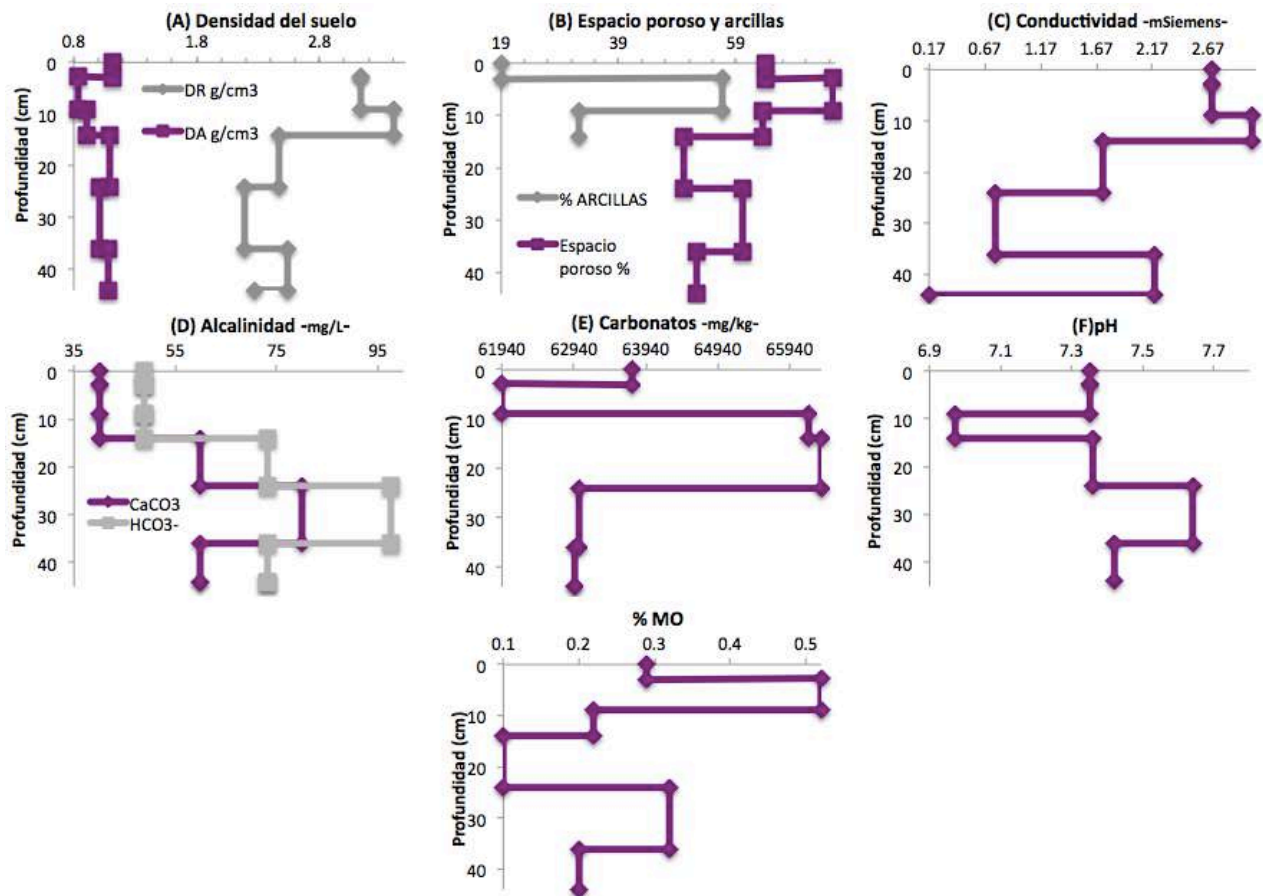


Figura 37. Diagramas que muestran el cambio de características a diferente profundidad del perfil Zim7.

En este perfil el azufre, cadmio, zinc, hierro, plomo y arsénico mostraron comportamiento similar. El valor más alto se presentó en el segundo horizonte (2.7 a 9 cm) para después disminuir de manera significativa a profundidad y en superficie el valor es un intermedio (Figura 38).

Tanto para el arsénico como para el plomo las concentraciones rebasan la NOM-147 y NOM-004 casi en la totalidad del perfil, con la excepción del horizonte más profundo (36 a 44 cm).

Prof.	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Fe mg/kg	Zn mg/kg	S mg/kg
0 - 2.7	1,029	5.5	1,022	41,243	675	14,763
2.7 - 9	4,368	18.5	1,490	62,493	2,100	27,787
9 - 14	426	4	710	38,493	600	3,192
14 - 24	1,728	7.5	825	38,743	80	4,184
24 - 36	905	10.5	847	30,118	850	7,330
36 - 44	97	1	111	21,118	76.2	2,466

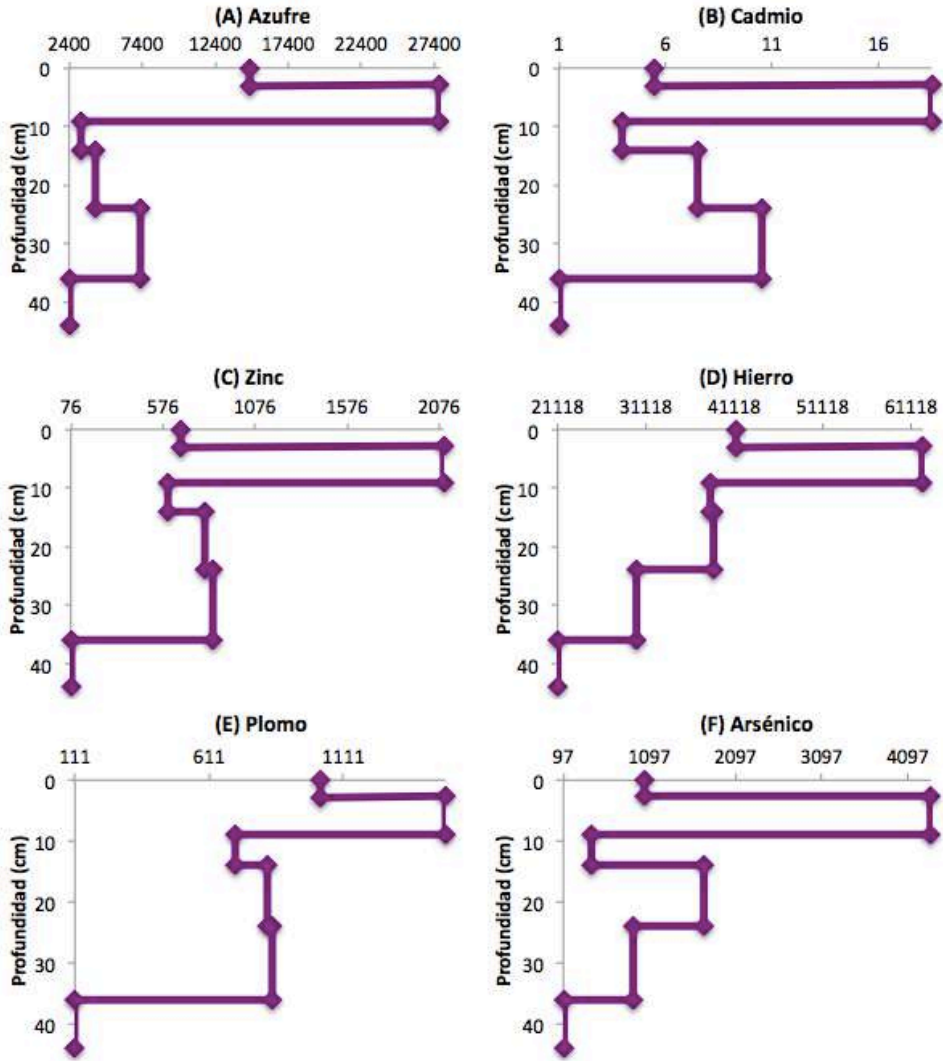


Figura 38. Diagramas de contenido de azufre, arsénico y metales pesados (cadmio, zinc, hierro y plomo) a profundidad en Zim 7.

10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1 Densidad real y densidad aparente

La densidad real presenta los valores más altos en los horizontes superficiales de los perfiles más cercanos a los depósitos de jales (Zim5, Zim6 y Zim7) y el resto (Zim1, Zim2, Zim3 y Zim4) se mantiene en valores “similares” (excepto el tercer horizonte de Zim2). En cuanto a la densidad aparente, tiene valores relativamente bajos entre 0.82 y 1.17 g/cm³, esto puede ser atribuido al alto contenido de carbonato de calcio en los suelos de esta zona; los valores más bajos se encontraron en Zim7, Zim6 y Zim4, que en contraste con el espacio poroso, se encontraron los valores más altos (Figura 39).

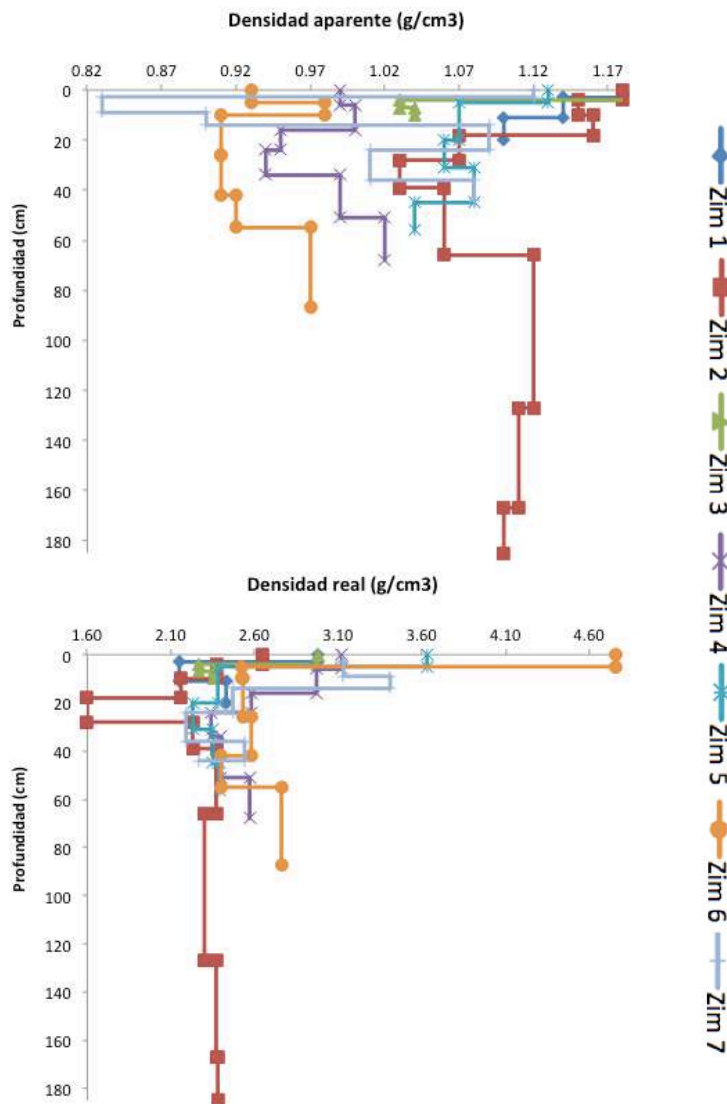


Figura 39. Diagramas de relación profundidad/densidad real y profundidad/espacio poroso entre los puntos de muestreo.

10.2 Espacio poroso y contenido superficial de arcillas

Bajo la premisa de que los jales mineros que se dispersan en el ambiente tienen el tamaño de partícula de una arcilla (Fernández, 2014), su dispersión y depósito en los diferentes perfiles evaluados representaría cambios significativos en la superficie del suelo (la parte más afectada por el depósito), sin embargo al hacer un análisis de arcillas superficiales, se descubre que Zim2, Zim3 y Zim7 son los que presentan la mayor acumulación de las mismas, para Zim2 y Zim7 se da en el segundo horizonte y después disminuye, al contrario de Zim3 donde el primer horizonte presenta la mayor acumulación, lo que haría pensar que el análisis de arcillas no es un buen parámetro para definir la dispersión de los jales ya que Zim7 es el más cercano a los jales y Zim2 y Zim3 son de los más retirados (Figura 40).

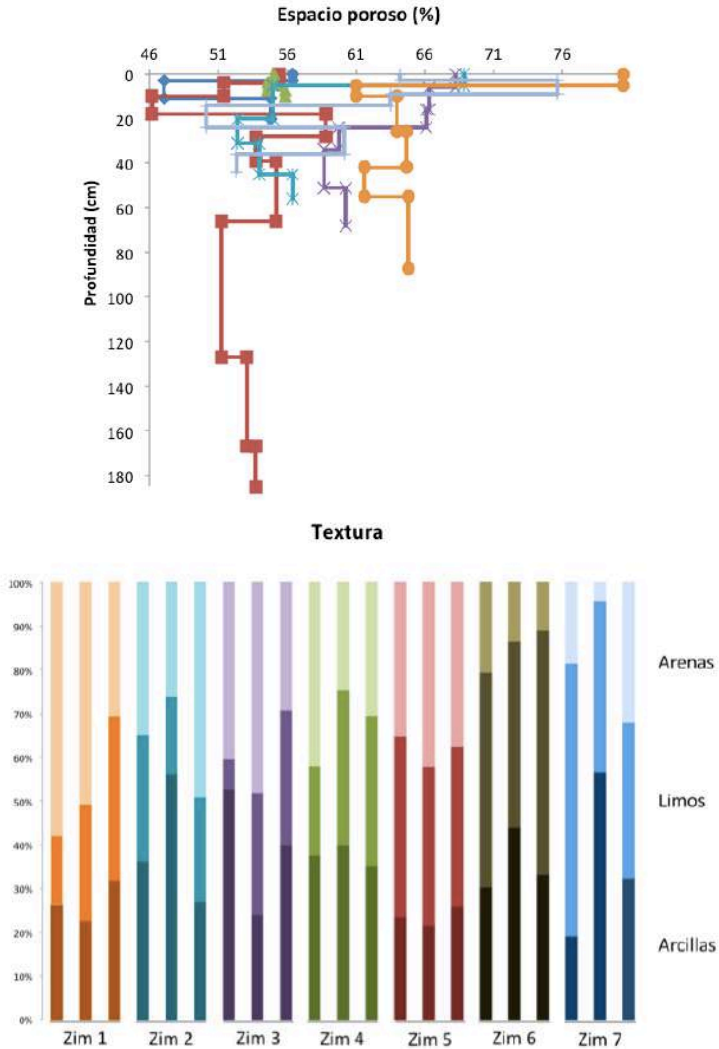


Figura 40. Diagramas de relación profundidad/espacio poroso y profundidad/%arcillas entre los puntos de muestreo.

10.3 Conductividad (mS/cm) y pH

Los sitios Zim5, Zim6 y Zim7 mostraron los valores más altos de conductividad en superficie y Zim2 a profundidad, el resto de los perfiles se mantuvieron en valores más bajos y muy cercanos entre ellos (Figura 41). Estos resultados podrían hablarnos de la acumulación de sales en los perfiles más cercanos a los depósitos de jales, a diferencia de Zim2 que puede estar más relacionado con su alto contenido de carbonato de calcio a profundidad (material parental); en cambio los valores de pH se mantuvieron con una tendencia alcalina y no representan relación con la distancia a los depósitos de jales.

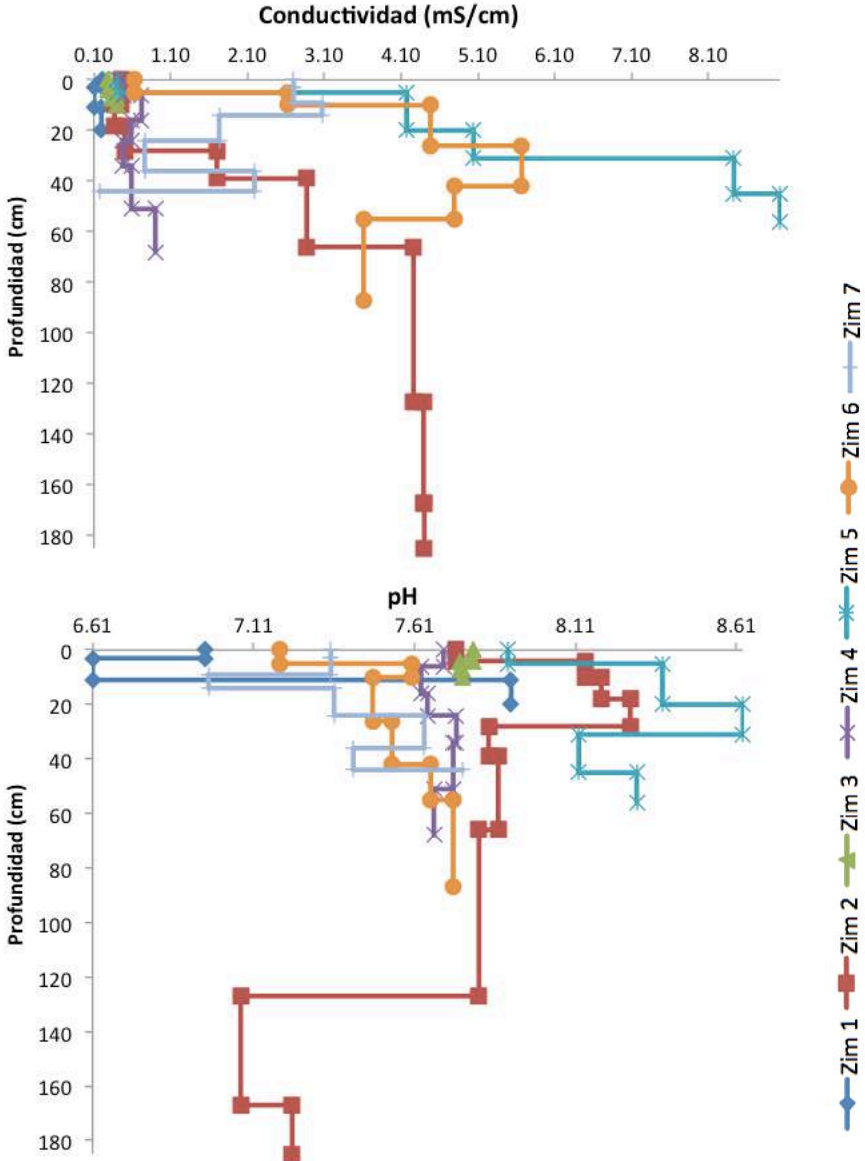


Figura 41. Diagramas de relación profundidad/conductividad y profundidad/pH entre los puntos de muestreo.

10.4 Alcalinidad en la solución del suelo y carbonatos

El carbonato de calcio (CaCO_3 mg/L) y los bicarbonatos (HCO_3^- mg/L) mostraron comportamientos similares en todos los perfiles (excepto Zim5 y Zim6) con valores menores en superficie y un comportamiento escalonado con la profundidad, donde fue aumentando gradualmente para después disminuir. Por otro lado, Zim6 presentó el valor mayor en superficie y después disminuyó drásticamente (perfil con mantillo en superficie y valores más altos de materia orgánica), y por último Zim5, que mostró comportamientos diferentes en superficie, donde la presencia de carbonato de calcio (CaCO_3 mg/L) fue menor en comparación con la de bicarbonatos (HCO_3^- mg/L), además que es el único perfil que mostró carbonatos (CO_3^{2-} mg/L) a causa de sus altos valores de pH (cerca de 8). Para carbonatos (mg/kg) Zim1 no presentó carbonatos en superficie, pero sí una alta cantidad en su último horizonte; para Zim2, Zim3, Zim4 y Zim7 el horizonte superficial mostró un valor alto que después fue disminuyendo (de manera escalonada, con altos y bajos, igual que en la alcalinidad), Zim5 y Zim6 por otro lado mostraron un valor alto en superficie, después disminuyó un poco y mantuvo valores similares a lo largo del perfil (Figura 42).

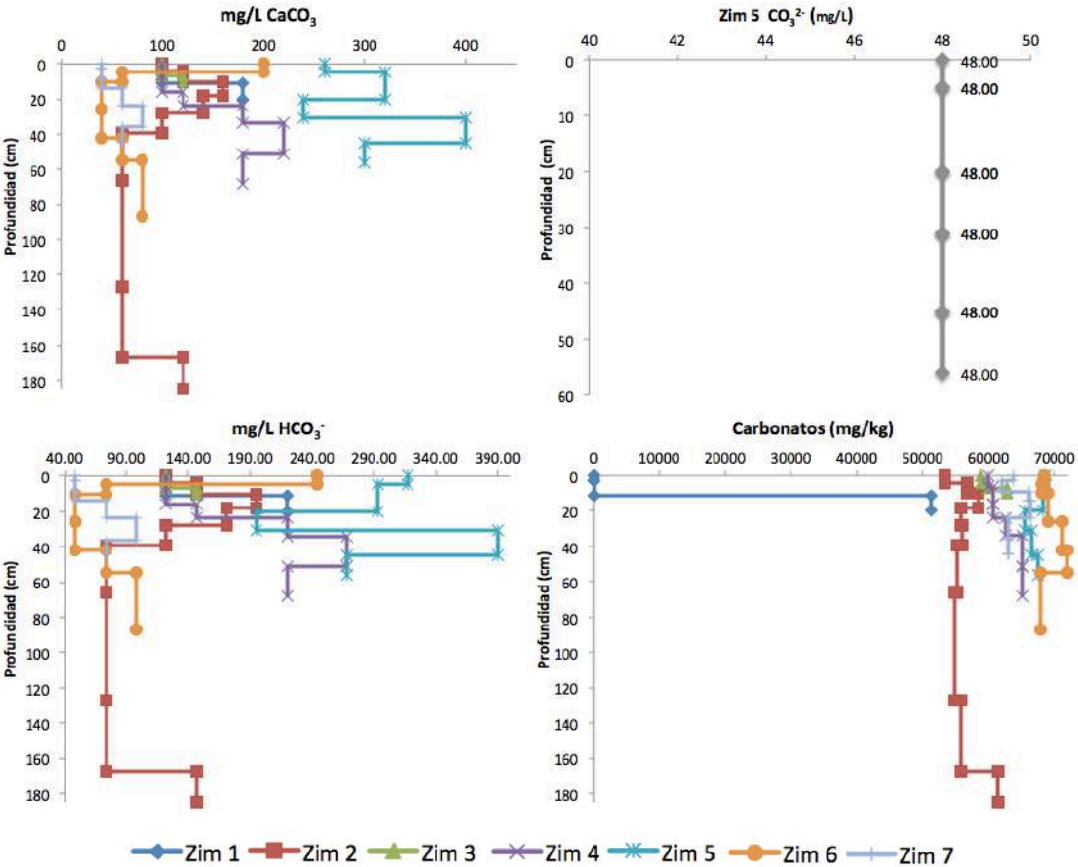


Figura 42. Diagramas de relación profundidad/ CaCO_3 , profundidad/ HCO_3^- , profundidad/ CO_3^{2-} y profundidad/carbonatos^{mg/kg} entre los puntos de muestreo.

10.5 Azufre, Cadmio, Plomo, Hierro, Zinc y Arsénico (mg/kg)

Para todos los EPT (Cd, Zn, Fe, Pb, y As) y el azufre, los valores más altos se mostraron en los primeros horizontes de cada uno de los perfiles (Figura 43), pero en lo particular y en relación a cada elemento, presentaron el siguiente orden:

- El cadmio Zim7 > Zim6 > Zim4 > Zim1 > Zim5 > Zim2 > Zim3.
- El zinc Zim7 > Zim6 > Zim1 > Zim4 > Zim5 > Zim2 > Zim3.
- El hierro Zim7 > Zim6 > Zim4 > Zim1 > Zim3 > Zim2 > Zim5.
- El plomo Zim7 > Zim4 > Zim6 > Zim1 > Zim5 > Zim2 > Zim3.
- El arsénico Zim7 > Zim6 > Zim4 > Zim1 > Zim5 > Zim2 > Zim3.
- El azufre Zim7 > Zim6 > Zim3 > Zim4 > Zim1 > Zim5 > Zim2.

La única constante fue que el perfil más cercano a los jales (Zim7) tiene valores muy por encima de los demás, seguido por Zim6 (a excepción del plomo donde Zim4 presentó valores mayores). Sin embargo después de este punto el orden en el resto de los elementos varió. Zim4 mostró concentraciones mayores que Zim5, probablemente relacionado por su ubicación al pie de ladera, incluso Zim1 se mostró superior a otros perfiles aun siendo el punto más lejano de los jales, tal vez por ser una superficie plana en una zona donde las lluvias no son abundantes, por lo que los EPT se depositan fácilmente, además de ser un perfil somero. Respecto al hierro, ni la NOM-147 (por tipo de uso de suelo) ni la NOM-004 (biosólidos), establece una normatividad para este elemento (claramente porque el contenido natural de Fe en los suelos son valores comúnmente altos) y aunque el zinc solo está normado por la NOM-004, no se rebasaron los límites permisibles al igual que para el cadmio, sin embargo el arsénico (en los perfiles Zim1, Zim2, Zim3, Zim4, Zim5, Zim6, Zim7) y el plomo (en los perfiles Zim1, Zim4, Zim6, Zim7) sí rebasaron los límites permisibles, aunque en algunos perfiles solamente en superficie (mayormente para el plomo).

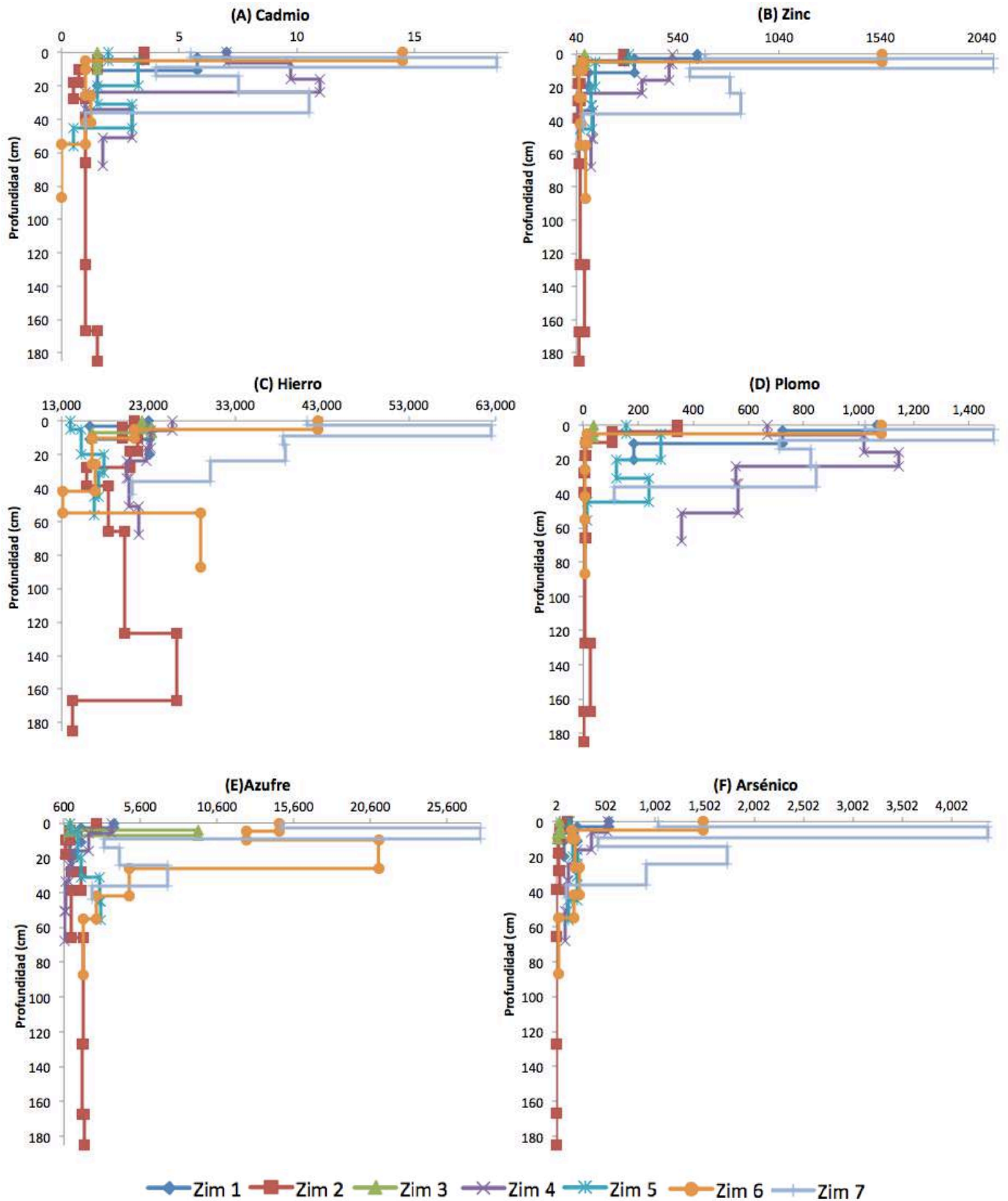


Figura 43. Diagramas de relación profundidad/cadmio, profundidad/zinc, profundidad/Hierro, profundidad/plomo, profundidad/azufre y profundidad/arsénico entre los puntos de muestreo.

10.6 Materia orgánica

Los valores de materia orgánica son bajos en todos los perfiles debido al tipo de clima y vegetación de la zona. El perfil Zim6 fue el más alto, debido a ser un lomo de ladera, donde incluso había un pequeño mantillo, seguido de Zim4 y Zim7, porque son el paso de un río temporal que arrastra material y se deposita en superficie. Para el resto de los perfiles, el valor más alto fue en superficie con orden Zim5>Zim3>Zim1>Zim2, para después disminuir (Figura 44).

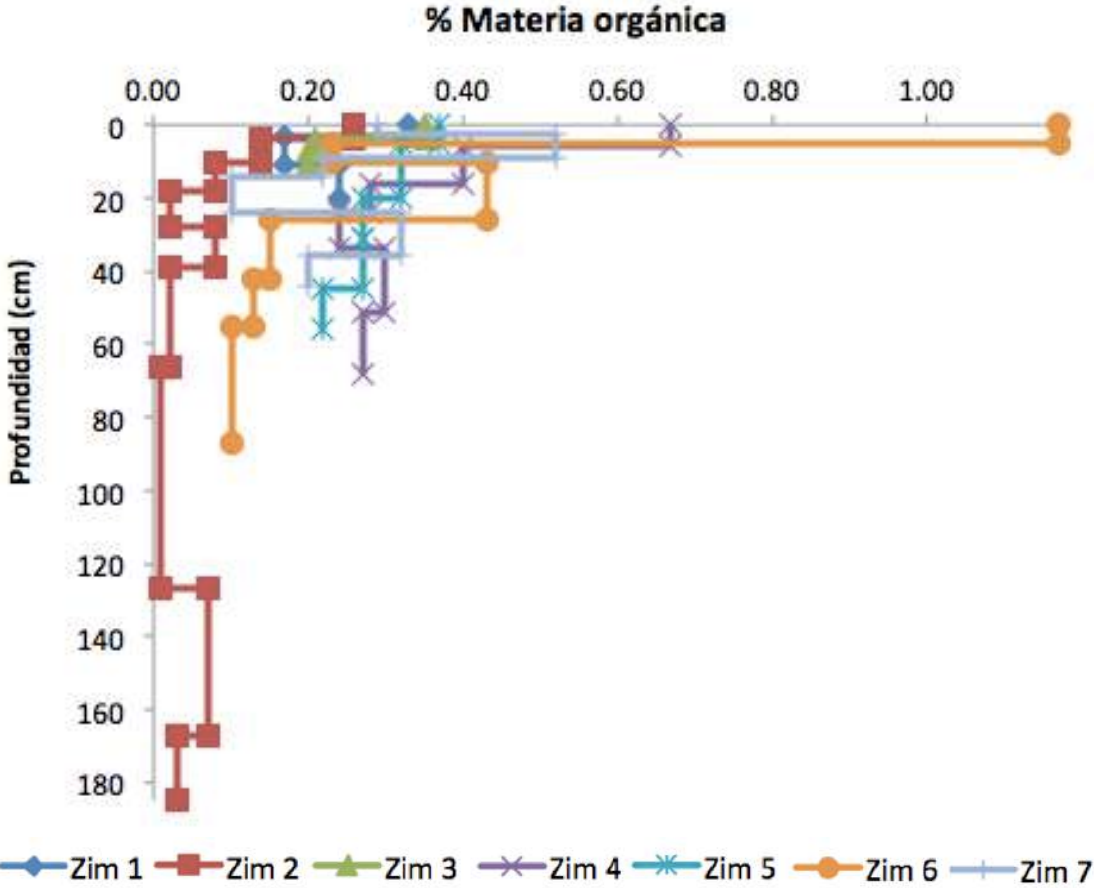


Figura 44. Diagramas de relación profundidad/materia orgánica entre los puntos de muestreo.

10.7 Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson nos indica el cambio de una variable con respecto de otra, sus valores van de -1 a 1. Si el coeficiente es cercano a 1 nos dice que las variables están correlacionadas positivamente, esto es, si una aumenta su valor, la otra también lo hará, en cambio, si el coeficiente es cercano a -1, nos dice que las variables están correlacionadas negativamente, lo que significa que si una aumenta su valor, la otra va a decrecer. Si es cercano a 0 es que no hay una relación lineal entre las variables (Clifford & Taylor, 2008). Para poder comprobar estadísticamente que algunas de nuestras variables están relacionadas entre sí (principalmente los EPT con alguna característica del suelo) se elaboró una tabla de correlación de Pearson, donde se usará un rango entre < -0.5 y > 0.5 para saber si existe dicha correlación, ya sea normal o inversa (Tabla 12). Esto para poder comprobar si la dispersión y depósito de los jales en el suelo a diferentes profundidades está relacionada con alguna variable analizada, así como comprobar la filiación de un dato con otro, por ejemplo algún EPT con el pH o con la granulometría del suelo.

El arsénico mostró una relación positiva con el plomo (0.689), cadmio (0.803) y el zinc (0.914), sin embargo en relación con las características del suelo solo se acercó al límite con el espacio poroso (0.493), en cambio el cadmio y el zinc tuvieron una correlación positiva con la densidad real (0.601 Cd, 0.663 Zn), el espacio poroso (0.662 Cd, 0.621 Zn), la materia orgánica (0.566 Cd, 0.613 Zn) y una correlación negativa con el pH (-0.490 Cd, -0.504 Zn). El plomo, también mostró una correlación positiva con el cadmio (0.906) y el zinc (0.824), además del espacio poroso (0.507) y quedó muy cerca a la densidad real (0.480), y al igual que el cadmio y el zinc, se correlacionó negativamente con el pH (-0.525). El hierro por otro lado, no presentó ningún valor entre -0.5 y 0.5, por lo que no se sabe si está correlacionado con alguna variable o es totalmente independiente, al igual que la conductividad y el azufre.

En cuanto a los análisis gravimétricos, la densidad aparente mostró una correlación negativa con el espacio poroso (-0.611) y un valor bastante cercano a 0.5 para el carbonato de calcio en mg/kg (-0.493), la densidad real con la materia orgánica (0.793), el espacio poroso con la densidad real (0.822) y la materia orgánica (0.659); en cambio el contenido de arcillas superficiales no mostró valores significativos.

El carbonato de calcio CaCO_3 (mg/L) y bicarbonatos HCO_3^- (mg/L) se relacionaron positivamente entre sí (0.972), al igual que con el pH (0.549, 0.481 respectivamente), mientras que el ión carbonato CO_3^{2-} se mostró como una constante.

Al final se realizó una correlación entre todas las variables y la distancia entre cada punto de muestreo y los depósitos de jales y se encontró una correlación positiva con la densidad aparente (0.594) y una correlación negativa tanto para el espacio poroso (-0.548) como para el carbonato de calcio en mg/kg (-0.838).

Tabla 13. Donde pH (potencial hidrógeno), mS (conductividad), DR (densidad real), DA (densidad aparente), EP (espacio poroso), CC (CaCO₃), BC (HCO₃⁻), MO (materia orgánica), Ca (CO₃²⁻), CCs (carbonato de calcio en mg/kg), AR (arcillas), As (arsénico), Cd (cadmio), Pb (plomo), Fe (hierro), Zn (zinc) y Dis (distancia entre el punto de muestreo y los depósitos de jales). Realizado en SPSSStatistics.

		Correlaciones																		
		pH	mS	DR	DA	EP	CCs	CC	BC	Ca	S	MO	As	Pb	Fe	Cd	Zn	AR	Dis	
pH	Correlación de Pearson	1	.210	-.309	.113	-.292	-.077	.549 ^{**}	.481 ^{**}		-.106	-.223	-.393	-.525 ^{**}	-.304	-.494 ^{**}	-.504 ^{**}	-.024	-.010	
	Sig. (bilateral)		.206	.059	.501	.075	.654	.000	.002		.528	.179	.015	.001	.064	.002	.001	.918	.954	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
mS	Correlación de Pearson	.210	1	-.189	-.232	-.026	.402 ^{**}	.291	.124		-.053	-.066	.017	-.304	-.147	-.195	-.152	-.106	-.360 ^{**}	
	Sig. (bilateral)	.206		.256	.160	.876	.015	.076	.459		.751	.692	.920	.063	.378	.248	.363	.648	.026	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
DR	Correlación de Pearson	-.309	-.189	1	-.138	.822 ^{**}	.224	.025	.100		-.091	.793 ^{**}	.454 ^{**}	.480 ^{**}	.135	.601 ^{**}	.663 ^{**}	.092	-.296	
	Sig. (bilateral)	.059	.256		.410	.000	.189	.883	.550		.586	.000	.004	.002	.418	.000	.000	.693	.071	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
DA	Correlación de Pearson	.113	-.232	-.138	1	-.611 ^{**}	-.493 ^{**}	.135	.152		-.023	-.200	-.347 ^{**}	-.210	.389 ^{**}	-.315	-.299	-.120	.594 ^{**}	
	Sig. (bilateral)	.501	.160	.410		.000	.002	.418	.362		.891	.229	.033	.206	.016	.057	.068	.604	.000	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
EP	Correlación de Pearson	-.292	-.026	.822 ^{**}	-.611 ^{**}	1	.408 ^{**}	-.094	-.044		-.066	.659 ^{**}	.493 ^{**}	.507 ^{**}	-.039	.622 ^{**}	.621 ^{**}	.171	.548 ^{**}	
	Sig. (bilateral)	.075	.876	.000	.000		.013	.576	.793		.694	.000	.002	.001	.814	.000	.000	.459	.000	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
CCs	Correlación de Pearson	-.077	.402 ^{**}	.224	-.493 ^{**}	.408 ^{**}	1	.191	.132		.075	.234	.147	.091	.009	.102	.129	-.308	.838 ^{**}	
	Sig. (bilateral)	.654	.015	.189	.002	.013		.265	.444		.663	.169	.392	.597	.957	.560	.452	.199	.000	
	N	36	36	36	36	36	36	36	36	5	36	36	36	36	36	35	36	19	36	
CC	Correlación de Pearson	.549 ^{**}	.291	.025	.135	-.094	.191	1	.972 ^{**}		-.147	.182	-.168	-.117	-.062	-.135	-.174	-.394	-.083	
	Sig. (bilateral)	.000	.076	.883	.418	.576	.265		.000		.379	.274	.315	.485	.714	.427	.297	.077	.619	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
BC	Correlación de Pearson	.481 ^{**}	.124	.100	.152	-.044	.132	.972 ^{**}	1		-.155	.201	-.188	-.087	-.054	-.116	-.161	-.360	-.005	
	Sig. (bilateral)	.002	.459	.550	.362	.793	.444	.000			.354	.226	.257	.601	.747	.493	.336	.109	.975	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
Ca	Correlación de Pearson	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	^b	
	Sig. (bilateral)																			
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	
S	Correlación de Pearson	-.106	-.053	-.091	-.023	-.066	.075	-.147	-.155		1	-.017	.248	.255	-.031	.309	.283	.192	-.261	
	Sig. (bilateral)	.528	.751	.586	.891	.694	.663	.379	.354			.919	.134	.122	.853	.062	.085	.404	.114	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
MO	Correlación de Pearson	-.223	-.066	.793 ^{**}	-.200	.659 ^{**}	.234	.182	.201		-.017	1	.430 ^{**}	.461 ^{**}	.090	.566 ^{**}	.613 ^{**}	-.007	-.312	
	Sig. (bilateral)	.179	.692	.000	.229	.000	.169	.274	.226		.919		.007	.004	.591	.000	.000	.977	.056	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
As	Correlación de Pearson	-.393 ^{**}	.017	.454 ^{**}	-.347 ^{**}	.493 ^{**}	-.147	-.168	-.188		.248	.430 ^{**}	1	.689 ^{**}	.055	.803 ^{**}	.914 ^{**}	.336	-.404 ^{**}	
	Sig. (bilateral)	.015	.920	.004	.033	.002	.392	.315	.257		.134	.007		.000	.743	.000	.000	.137	.012	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
Pb	Correlación de Pearson	-.525 ^{**}	-.304	.480 ^{**}	-.210	.507 ^{**}	.091	-.117	-.087		.255	.461 ^{**}	.689 ^{**}	1	.289	.906 ^{**}	.824 ^{**}	.025	-.301	
	Sig. (bilateral)	.001	.063	.002	.206	.001	.597	.485	.601		.122	.004	.000		.078	.000	.000	.915	.067	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
Fe	Correlación de Pearson	-.304	-.147	.135	.389 ^{**}	-.039	.009	-.062	-.054		-.031	.090	.055	.289	1	.147	.152	-.155	.202	
	Sig. (bilateral)	.064	.378	.418	.016	.814	.957	.714	.747		.853	.591	.743	.078		.385	.361	.504	.225	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
Cd	Correlación de Pearson	-.494 ^{**}	-.195	.601 ^{**}	-.315	.622 ^{**}	.102	-.135	-.116		.309	.566 ^{**}	.803 ^{**}	.906 ^{**}	.147	1	.925 ^{**}	.215	-.334 ^{**}	
	Sig. (bilateral)	.002	.248	.000	.057	.000	.560	.427	.493		.062	.000	.000	.000	.385		.000	.349	.044	
	N	37	37	37	37	37	35	37	37	5	37	37	37	37	37	37	37	21	37	
Zn	Correlación de Pearson	-.504 ^{**}	-.152	.663 ^{**}	-.299	.621 ^{**}	.129	-.174	-.161		.283	.613 ^{**}	.914 ^{**}	.824 ^{**}	.152	.925 ^{**}	1	.209	-.368 ^{**}	
	Sig. (bilateral)	.001	.363	.000	.068	.000	.452	.297	.336		.085	.000	.000	.000	.361	.000		.364	.023	
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	
AR	Correlación de Pearson	-.024	-.106	.092	-.120	.171	-.308	-.394	-.360		.192	-.007	.336	.025	-.155	.215	.209	1	.089	
	Sig. (bilateral)	.918	.648	.693	.604	.459	.199	.077	.109		.404	.977	.137	.915	.504	.349	.364		.701	
	N	21	21	21	21	19	21	19	21	3	21	21	21	21	21	21	21	21	21	
Dis	Correlación de Pearson	-.010	-.360 ^{**}	-.296	.594 ^{**}	-.548 ^{**}	-.838 ^{**}	-.083	-.005		-.261	-.312	-.404 ^{**}	-.301	.202	-.334 ^{**}	-.368 ^{**}	.089	1	
	Sig. (bilateral)	.954	.026	.071	.000	.000	.000	.619	.975		.114	.056	.012	.067	.225	.044	.023	.701		
	N	38	38	38	38	38	36	38	38	5	38	38	38	38	38	37	38	21	38	

** . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral).

b. No se puede calcular por que, como mínimo, una de las variables es constante.

10.8 Minerales por perfiles y horizontes

Se utilizó la metodología de “Difracción de Rayos X⁹”, para poder hacer un análisis general de la mineralogía presente para cada uno de los horizontes en cada uno de los perfiles y poder determinar los cambios en relación con la distancia de los depósitos (minerales primarios, secundarios, raros, etc.). En la primera parte se expone una tabla con los minerales (en orden alfabético) presentes en cada uno de los sitios (Tabla 13) y en la segunda parte para cada uno de los horizontes (Tabla 14).

Tabla 14. Minerales presentes en cada perfil.

MINERAL	FORMULA	Zim 1	Zim 2	Zim 3	Zim 4	Zim 5	Zim 6	Zim 7
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	X	X	X	X	X	X	X
Almandina	Fe ²⁺ ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂			X				
Altaíta	PbTe				X	X	X	
Ankerita	CaFe ²⁺ (CO ₃) ₂		X		X			
Annita	KFe ²⁺ 3(AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂		X					
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	X	X	X	X	X	X	X
Anortoclasa	PbTe						X	
Arsenico	As		X					
Arsenolita	As ₂ O ₃	X			X	X		
Arsenopirita	FeAsS				X			
Azufre	S					X		
Bernardita	FeAsS							X
Bilibinskita	Au ₃ Cu ₂ PbTe ₂	X						
Blixita	4(Pb _{1.95}) ₄ (Ca _{0.02}) ₄ (O _{1.27}) ₄ (OH) _{0.41} 4(Cl _{1.02})		X					
Brucita	Mg(OH) ₂			X				
Calcita	CaCO ₃	X	X	X	X	X	X	X
Calcita de magnesio	MgCO ₃				X			
Carrollita	CuCo ₂ S ₄					X		
Chaoite	C	X	X	X	X	X	X	X
Clinosafflorita	(Co,Fe,Ni)As ₂					X		
Cobaltita	CoAsS					X	X	X
Colusita	Cu ₁₂ VAs ₃ S ₁₆						X	

⁹ Difractómetro marca Siemens modelo D5000. Se empleó radiación CuK α , λ : 1.54Å con rango de escaneo 4° a 70° en 2 θ , y la interpretación de difractogramas se realizó en el software TRACES.

MINERAL	FORMULA	Zim 1	Zim 2	Zim 3	Zim 4	Zim 5	Zim 6	Zim 7
Cooperita	PtS					X	X	
Cordierita	(Mg,Fe) ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	X						
Corindón	Al ₂ O ₃		X		X	X		
Cristobalita	SiO ₂		X	X	X	X	X	
Cuarzo	SiO ₂	X	X	X	X	X	X	X
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	X						
Dolomita Ferroan	Ca(Mg,Fe)(CO ₃) ₂					X		
Discrasita	Ag ₃ Sb		X			X		
Ecdemita	Pb ₆ Cl ₄ (As ₂ O ₇)						X	
Epistilbita	CaAl ₂ Si ₆ O ₁₆ · 5H ₂ O							X
Esfalerita	ZnS					X	X	X
Fluorita	CaF ₂						X	
Forsterita	Mg ₂ SiO ₄	X	X					
Furutobeita	(Cu,Ag) ₆ PbS ₄							X
Galena	PbS			X	X			
Gismondina	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ · 4(H ₂ O)	X		X	X	X		X
Gladita	PbCuBi ₅ S ₉					X		
Gmelinita	(Si ₈ Al ₄)O ₂₄ · 11H ₂ O							X
Gobbinsite	Na ₅ (Si ₁₁ Al ₅)O ₃₂ · 11H ₂ O		X					
Gutsevichita	Al ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₃ · 8H ₂ O							X
Halita	NaCl				X			
Halloysita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄		X	X	X	X	X	
Heliophyllita	Pb ₆ Cl ₄ (As ₂ O ₇)					X	X	
Hematita	Fe ₂ O ₃	X	X	X	X			X
Hydrophilita	CaCl ₂			X				
Ilita	(K,H ₃ O)(Al, Mg, Fe) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀	X	X		X			
Hierro	Fe				X			
Kaolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄			X				
Lanthanita	(Ce,La,Nd) ₂ (CO ₃) ₃ · 8H ₂ O							X
Litargirio	PbO			X				
Lizardita	Mg ₃ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄							X
Lorandita	TlAsS ₂							X
Magnesia	MgO				X			
Magnesioferrita	MgFe ³⁺ ₂ O ₄	X						
Magnetita	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄		X		X		X	X
Margarit	CaAl ₂ (Al ₂ Si ₂ O ₁₀)(OH) ₂					X		

MINERAL	FORMULA	Zim 1	Zim 2	Zim 3	Zim 4	Zim 5	Zim 6	Zim 7
Metahohmanite	$\text{Fe}^{3+}_2(\text{O})(\text{SO}_4)_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$					X		
Moissanita	SiC				X	X		X
Montmorillonita	$(\text{Na},\text{Ca})_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}^1$	X	X	X	X	X	X	X
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	X	X	X	X			X
Neotocite	$(\text{Mn},\text{Fe},\text{Mg})\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$				X			
Nontronita	$(\text{CaO}_{0,5},\text{Na})_{0,3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$		X	X	X			X
Opal-A	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$						X	
Ortoclasa	KAlSi_3O_8			X				X
Palladio, platino	(Pd,Pt)				X			
Periclasa	MgO			X	X	X		
Pigeonita	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})(\text{Mg},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$		X					
Piromorfita	$\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	X						
Plombierita	$[\text{Ca}_4\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}] \cdot (\text{Ca} \cdot 5\text{H}_2\text{O})$							X
Plomo	Pb				X	X		
Plumboferrita	$\text{Pb}_2(\text{Fe}^{3+},\text{Mn}^{2+},\text{Mg})_{11}\text{O}_{19}$				X			
Polydymita	$\text{Ni}^{2+}\text{Ni}^{3+}_2\text{S}_4$					X		
Rankinita	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$		X					
Rayita	$\text{Pb}_8(\text{Ag},\text{Tl})_2\text{Sb}_8\text{S}_{21}$				X			
Rebulita	$\text{Tl}_5\text{Sb}_5\text{As}_8\text{S}_{22}$							X
Rooseveltita	$\text{Bi}(\text{AsO}_4)$					X		
Saponita	$\text{Ca}_{0,25}(\text{Mg},\text{Fe})_3((\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$				X			
Sauconita	$\text{Na}_{0,3}\text{Zn}_3((\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$							X
Schachnerita	$\text{Ag}_{1,1}\text{Hg}_{0,9}$							X
Seinäjökita	$(\text{Fe},\text{Ni})(\text{Sb},\text{As})_2$							X
Sulfuro	S_8					X		
Silvita	KCl			X				X
Tridimita	SiO_2							X
Truscottita	$(\text{Ca},\text{Mn})_{14}\text{Si}_{24}\text{O}_{58}(\text{OH})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$					X		
Vermiculita	$\text{Mg}_{0,7}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$						X	X
Volkonskoita	$\text{Ca}_{0,3}(\text{Cr},\text{Mg},\text{Fe})_2((\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$							X
Whitneyita	Cu				X	X	X	X
Wurtzita	ZnS				X		X	

MINERAL	FORMULA	Zim 1	Zim 2	Zim 3	Zim 4	Zim 5	Zim 6	Zim 7
Wustita	FeO		X			X		
Yakhontovita	(Ca,Na) _{0.5} (Cu,Fe,Mg) ₂ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂ · 3H ₂ O						X	X
Yeelmita	Ca ₄ Al ₆ O ₁₂ (SO ₄)		X		X			
Yeso	CaSO ₄ · 2H ₂ O						X	X

Para determinar la clasificación de (S) seguros, (P) probables y (PP) poco probables se tomaron en cuenta diversos factores como la naturaleza del mineral, abundancia en el mundo, presencia en nuestro país, anteriores estudios mineralógicos de la zona, claridad en los difractogramas y complejidad en su aseveración (para asegurar su presencia se necesitan estudios más complejos, por ejemplo, separar la fracción fina para la determinación de arcillas).

Tabla 15. Minerales presentes en cada horizonte de cada perfil, clasificados como (S) seguros, (P) probables y (PP) poco probables.

	Zim1	Zim2	Zim3	Zim4	Zim5	Zim6	Zim7
Horizonte 1	Cuarzo (S) Anortita Magnesioferrita (PP) Hematita (P) Ilita (P) Montmorillonita (P) Forsterita (PP) Piromofita (P)	Anortita (P) Chaoita (PP) Cuarzo (S) Calcita (S) Ilita (P) Nontronita (P) Forsterita (PP) Rankinita (PP)	Albita (P) Cuarzo (S) Anortita (P) Hematita (P) Montmorillonita (P) Hidrofiliita (PP) Silvita ((PP) Ortoclesa (S) Halloysita (PP)	Anortita (P) Calcita (S) Cuarzo (S) Hematita (P) Plumboferrita (P) Arsenolita (PP) Wurtzita (PP) Montmorillonita (P) Ilita (P) Cristobalita (PP) Halita (PP) Moissanita (PP)	Chaoita (PP) Cuarzo (S) Calcita (S) Anortita (P) Albita (P) Cristobalita(PP) Esfalerita (P) Cobaltita (P) Azufre (P) Altaita (PP) Whitneyita (2°) (PP)	Cuarzo (S) Calcita (S) Anortita (P) Cobaltita (P) Ecdemita (2°) (PP) Whitneyita (PP) Heliophyllita(2°) (PP) Montmorillonita (P)	Cuarzo (S) Magnetita (P) Petrovicita (PP) Cobaltita (P) Fettelite (PP) Plumboferrita (P) Whitneyita (PP) Esfalerita (PP) Muscovita (PP)
Horizonte 2	Cuarzo (S) Albita (P) Anortita (P) Chaoita (PP) Cordierita (PP) Gismondina (P)	Cuarzo (S) Calcita (S) Chaoita (PP) Anortita (P) Yeelmita (PP) Ilita (P) Ankerita (P) Forsterita (PP)	Cuarzo (S) Anortita (P) Calcita (S) Chaoita (PP) Litargiro (2°) Galena (P) Montmorillonita (P) Muscovita (P) Halloysita (PP) Periclasa (S)	Chaoita (PP) Anortita (PP) Calcita (S) Cristobalita (PP) Plomo (PP) Yeelmita (P) Magnesia (P) Nontronita (2°) Montmorillonita (P) Ilita (P) Magnetita (P)	Calcita (S) Cuarzo (S) Albita (P) Chaoita (PP) Cristobalita(PP) Arsenolita (P) Azufre (P) Montmorillonita (P) Cooperita (P) Corindón (P) Dolomita (PP) Ferroan	Anortita (P) Calcita (S) Cristobalita(PP) Yeso (P) Altaita (PP) Yakhontovita (PP) Gutsevichita (PP) Wurtzita (PP) Cooperita (PP) Montmorillonita (P) Halloysita (PP) Fierro (PP)	Cuarzo (S) Schachnerita (2°) (PP) Bernardite (P) Whitneyita (PP) Yakhontovita (PP) Gutsevichita (PP) Gmelinita (2°) (PP) Yeso (P) Montmorillonita (P) Yakhontovita (PP) Troymite-O (PP)
Horizonte 3	Albita (P) Cuarzo (S) Calcita (S) Arsenolita (P)	Calcita (S) Chaoita (PP) Anortita (S) Cuarzo (S)	Cristobalita(PP) Cuarzo (S) Calcita (S) Albita (P)	Calcita (S) Albita (P) Chaoita (PP) Anortita (P)	Cuarzo (S) Calcita (S) Cristobalita(PP) Carrollita (P)	Anortita (P) Calcita (S) Chaoita (PP) Cuarzo (S)	Chaoita (PP) Cuarzo (S) Calcita (S) Nontronita (2°)

	<p>Montmorillonita (P) Dolomita (P) Muscovita (P)</p>	<p>Hematita (P) Yeelmita (PP) Magnetita (P) Cristobalita(PP) Ankerita (P)</p>	<p>Nontronita (2°) Muscovita (P) Almandina (P) Gismondina (PP)</p>	<p>Rayita (PP) Periclasa (S) Paladium (PP) Halita (PP) Moissanita (PP)</p>	<p>Discrasita (PP) Whitneyita (PP) Polydimita (PP) Zinc (PP) Clinosafflorita (As) (PP) Rooseveltita(As) (PP) Moissanita (PP)</p>	<p>Yeso (P) Whitneyita (PP) Esfalerita (P) Montmorillonita (P) Ópalo (P) Colusita(PP)</p>	<p>(PP) Lantanita (2°) Schachnerita (2°) Montmorillonita (P) Sauconita (P) Ortoclasa (S)</p>
Horizonte 4		<p>Calcita (S) Cuarzo (S) Muscovita Cristobalita(PP) Maghemite (PP) Discrasita (PP) Montmorillonita (P) Iliita (P) Magnetita (P)</p>		<p>Cuarzo (S) Anortita (P) Calcita (S) Yeelmita (P) Arsenolita (PP) Delvauxita (PP) Hisingerita (2°) (P) Nontronita (2°) (PP) Halloysita (PP) Magnesium (P) Corindón (P) Taenita (PP) Moissanita (PP)</p>	<p>Cuarzo (S) Anortita (P) Cuarzo (S) Arsenolita (PP) Cooperita (P) Azufre (P) Whitneyita (PP) Grimaldita (PP) Montmorillonita (P) Cristobalita (PP) Periclasa (S) Halloysita (PP) Gismondina (PP)</p>	<p>Calcita (S) Anortita (F) Cuarzo (S) Chaoita (PP)</p>	<p>Albita (P) Calcita (S) Anortita (P) Hematita (P) Furutobeita (PP) Cobaltita (P) Yeso (P) Montmorillonita (P) Gismondina (PP) Volkonskoita (P)</p>
Horizonte 5		<p>Calcita (S) Cuarzo (S) Chaoita (PP) Anortita (P) Cristobalita(PP) Montmorillonita (P) Nontronita (P) Annita (P) Muscovita (P)</p>		<p>Chaoita (PP) Calcita (S) Albita (P) Cristobalita(PP) Altaita (PP) Rayita (PP) Whitneyita (PP) Nontronita(PP) Montmorillonita (P) Saponita (P) Moissanita (PP)</p>	<p>Calcita (S) Cuarzo (S) Arsenolita (PP) Wustita (PP) Gadita (PP) Montmorillonita (P) Plomo (PP) Margarita (P) Truscotita (P) Cristobalita(PP)</p>	<p>Calcita (S) Albita (P) Cuarzo (S) Cristobalita(PP) Whitneyita (PP)</p>	<p>Calcita (S) Chaoita (PP) Lorandita (2°) (PP) Cristobalita(PP) Montmorillonita (P) Vermiculita (P) Muscovita (PP) Silvita (P) Turmalina (PP) Moissanita (PP)</p>
Horizonte 6		<p>Cuarzo (S) Calcita (S) Albita (P) Montmorillonita (P)</p>		<p>Chaoita (PP) Cuarzo (S) Calcita (S) Cristobalita(PP) Neotocita (2°) (P) Arsenopirita (P) Whitneyita (PP) Galena (P) Montmorillonita (P) Gismondina (PP) Ankerita (P) Hierro (PP) Muscovita (PP)</p>		<p>Calcita (S) Chaoita (PP) Yeso (P) Whitneyita (PP) Fluorita (P) Montmorillonita (P) Vermiculita (P) Anortoclasa (S)</p>	<p>Chaoita (PP) Anortita (P) Lizardite (PP) Montmorillonita (P) Cuarzo (S) Epistilbita (PP)</p>
Horizonte 7		<p>Chaoita (PP) Cuarzo (S) Anortita (P) Cristobalita(PP) Hematita (P) Nontronita (2°) Montmorillonita (P) Blixita (PP) Pigeonita (PP) Arsénico (PP) Forsterita (PP)</p>					
Horizonte 8		<p>Chaoita (PP) Cuarzo (S) Montmorillonita (P) Blixite (PP) Pigeonita (PP) Halloysita (PP) Gobbinsita (PP)</p>					

Horizonte 9		Cuarzo (S) Calcita (S) Albita (P) Chaoita (PP) Nontronita (2°) Wustita (PP) Montmorilonita (P) Corindón (P) Magnetita (P)					
Xx Minerales comunes en suelos de la zona (presentes en todos los perfiles y en la mayoría de los horizontes)							Xx Arcillas
Xx Óxidos, sulfuros o minerales secundarios.		Xx Minerales primarios y comunes		Xx Minerales muy raros			
(S) : Seguros		(P): Probables		(PP): Poco Probables			

12 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Todos los procesos que resultan de la industria minera tienen un gran impacto en cada uno de los componentes del ecosistema en donde se realiza dicha actividad. El enfoque de este trabajo fue determinar si el hecho de que los jales mineros históricos hayan estado expuestos libremente al ambiente ha ocasionado su dispersión y depósito en el suelo, cambiando sus características y así poder determinar cuáles podrían ser indicadores para después realizar estudios con un mayor alcance.

La fuente de contaminación en todos los puntos de muestreo son los depósitos de jales mineros históricos en Zimapán (Armienta & Rodríguez, 1996), demostrado por los resultados descritos anteriormente, pero principalmente por el aumento de elementos potencialmente tóxicos en superficie (si fuera por el material parental, algo muy común en los pozos de la zona [Armienta et. al., 1997], los niveles serían muy similares a lo largo del perfil), el aumento de la densidad real en horizontes superficiales (Volke et. al., 2005) y el contraste con la baja densidad aparente reflejo del material parental (suelos con alto contenido de carbonato de calcio [NOM-021]).

En Razo et. al. (2004), para climas semi áridos, como el de Zimapán, la contaminación de suelos por dispersión de partículas producto de la minería obedece a ciertas variables, donde cada calicata responde a un proceso de dispersión diferente según su posición en el paisaje; en este caso para Zim1 y Zim5, en zona cumbral, se daría principalmente por acción del viento (Csavina et. al., 2011), Zim2 y Zim6 están expuestos a procesos eólicos y fluviales (arrastre de material particulado) al estar en lomo de ladera, Zim3 está expuesto, tanto por el viento como por el depósito de material que pueda ser arrastrado de Zim1 y Zim2, lo mismo para Zim4 más la acción de arrastre (que puede ser lavado o depositado por la acción del río temporal). Por otro lado, para Zim7 influye la depositación pluvial (arrastre de material de Zim5 y Zim6), eólica, el río temporal y el drenaje ácido de mina que llega con las escorrentías, ya que es el punto más cercano a los depósitos de jales, por lo que el mayor contenido de EPT y azufre se presenta en el segundo horizonte.

Se muestra también que los perfiles Zim6 y Zim7 (los más cercanos a la zona de depósito de residuos) presentan las mayores concentraciones de EPT y azufre, así

como los valores más altos de densidad real debido a la acumulación de elementos más pesados, lo más común para zonas mineras (Simón *et. al.*, 2001); para los demás sitios, el comportamiento es el mismo sin importar el uso del suelo ni las características específicas de cada uno de los perfiles, donde los horizontes superficiales presentan las concentraciones más altas en contraste con el resto del perfil, incluso para los más lejanos, por lo que se advierte al factor tiempo como una influencia importante, ya que los jales mineros han estado expuestos a los factores climáticos y con eso favorecido la dispersión hacia el entorno (Romero *et. al.*, 2008), que también se debió ver reflejado en el contenido de arcillas superficiales, ya que comúnmente los depósitos de jales separan la parte fina (vaso) en el centro y se recubre con partes más gruesas (talud) (Gutierrez-Ruiz *et. al.*, 2007) , en Zimapán no es algo común, por lo que la fracción fina es lo que más se volatiliza, sin embargo no fue así y resulto ser un valor muy variable.

Por otro lado el pH se mostró como un factor independiente, ya que la naturaleza de los suelos carbonatados (Bess Fuster, 2012) mantiene la tendencia neutra-alcalina (intervalos 6.9 a 8.6) sin importar su posición en el paisaje o su cercanía al depósito de jales, sin embargo al realizar una correlación de Pearson se encontró una correlación negativa con el plomo > cadmio > zinc (en ese orden), justificado por la naturaleza de los elementos, que están en una base dura y reaccionan con la misma afinidad, es decir, el Pb^{4+} es un ácido duro, el Zn^{2+} uno intermedio y el Cd^{2+} uno blando (Alcañiz, 2012), por eso la correlación se da en ese orden.

La conductividad (para este caso, definida en su mayoría por el contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} , así como de CO_3^{2-} y HCO_3^{-}) está ligada tanto a la alcalinidad en la solución del suelo como al contenido de carbonatos (mg/kg) (Usón *et. al.*, 2010). La dispersión de jales se corrobora con la disminución de estos valores (tanto de pH como de conductividad) en los horizontes superficiales (donde están las concentraciones más altas de EPT), debido a los procesos de amortiguamiento que se están dando ante la depositación de los residuos mineros (Jing *et. al.*, 2004).

Partiendo del supuesto de la presencia de todos los minerales, así como estudios anteriores (Armienta *et. al.*, 2005) y sin tomar en cuenta la clasificación otorgada de (S) seguros, (P) probables y (PP) poco probables por la complejidad de la matriz (suelo), podemos decir que la albita ($NaAlSi_3O_8$), anortita ($CaAl_2Si_2O_8$), calcita ($CaCO_3$), chaoita

(C), cuarzo (SiO_2), cristobalita (SiO_2) y la arcilla tipo montmorillonita ($(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}^1$) están presentes en todos los perfiles y en la mayoría de los horizontes, además también forman parte la composición de los jales de la zona, incluso de los más antiguos (Moreno *et. al.*, 2009), por lo que pueden ser indicadores de la composición primaria de los suelos de la zona, y que sobresalen junto con otros minerales primarios como la forsterita (Mg_2SiO_4), periclasa (MgO), ortoclasa (KAlSi_3O_8) y muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) en los primeros tres perfiles (Zim1, Zim2 y Zim3) donde no hay una gran presencia de minerales secundarios u otros como óxidos o sulfuros. Sin embargo en los siguientes perfiles (Zim4, Zim5, Zim6 y Zim7), la presencia de estos aumenta de manera significativa, con la presencia de hematita (Fe_2O_3), arsenolita (As_2O_3), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), esfalerita (ZnS), whitneyita (Cu) y wurtzita (FeO) principalmente (mayoría de horizontes), además de que estos ya han sido reportados como minerales presentes en los jales de Zimapán (Moreno *et. al.*, 2012; Molina A., 2018) .

La hematita, wurtzita y esfalerita son minerales de mena (Márquez-Zavalía, 2006), por lo que no deberían de estar presentes en los horizontes superficiales (debido al origen del material y los procesos de pedogénesis) al igual que elementos de forma elemental como azufre y plomo por lo que podríamos considerarlos indicadores de dispersión de jales.

13 CONCLUSIONES

- El análisis de la densidad real y espacio poroso son buenos indicadores de dispersión de jales mineros ya que ambas variables presentaron valores muy altos en horizontes superficiales en todos los sitios de muestreo. Por otro lado la densidad aparente presentó valores bajos en todos los perfiles analizados, sin embargo presenta un aumento en los horizontes superficiales de los tres sitios más cercanos a la zona de depósitos por lo que podría ser un indicador de dispersión, pero sólo en zonas colindantes, al contrario del análisis de arcillas, que mostraron valores “independientes” respecto a la distancia de los jales.
- El pH no presenta una relación evidente con la distancia a los depósitos de residuos mineros o la posición en el paisaje de los perfiles, ya que mantiene sus valores con tendencia neutra-alkalina. Sin embargo, la estadística nos habla de una correlación negativa con el cadmio, zinc y plomo, donde al aumentar las concentraciones el pH tiende a disminuir.
- La dispersión y depositación de jales mineros en el suelo es muy evidente debido al aumento de la concentración de elementos potencialmente tóxicos (As, Cd, Pb, Fe, Zn) y azufre en los horizontes superficiales de todos los perfiles, donde los puntos más cercanos a los depósitos (Zim6 y Zim7) presentan los valores más altos en comparación con los demás.
- La alcalinidad en la solución del suelo (CaCO_3 , HCO_3^- mg/L) así como el contenido de carbonatos (mg/kg), ligado a la conductividad eléctrica (por los iones que la definen) disminuyen en los horizontes superficiales (zona de mayor acumulación de EPT y azufre), por lo que pueden ser considerados como evidencia de depositación de jales.
- De la mineralogía en los suelos analizados podemos asumir tres cosas; la primera es que los minerales mayoritarios (más probables) son el cuarzo, anortita, la calcita, albita, chaoita, cristobalita, forsterita, periclasa, ortoclasa, muscovita y la montmorillonita, lo más común en suelos calcáreos de origen sedimentario; la segunda es la posibilidad de usar la presencia de hematita, esfalerita, arsenolita, yeso, esfalerita, whitneyita, wurtzita y minerales de

elementos nativos como plomo, arsénico, zinc y azufre a manera de evaluadores tanto de dispersión de jales mineros como de procesos de degradación del suelo. Por último, a pesar de la heterogeneidad de los minerales encontrados, los perfiles más cercanos a los jales mineros presentan una mayor abundancia en minerales secundarios, óxidos o sulfuros, es decir que la dispersión de jales está afectando de manera directa la composición mineralógica del suelo.

|

14 RECOMENDACIONES

- Se encontró reacción a la fenolftaleína (indicador de aluminio intercambiable y alófanos) en el análisis descriptivo de campo, una característica muy común en andosoles (suelos con origen volcánico), pero los suelos de Zimapán están más relacionados con material parental de origen sedimentario por lo que se tendría que hacer un análisis a detalle para determinar si está relacionado con la dispersión de jales o solo reacciona ante un cambio de pH por el alto contenido de carbonato de calcio en suelos.
- Se determinó la concentración total de elementos potencialmente tóxicos totales, sin embargo se recomendaría realizar el análisis de las concentraciones geodisponibles, así como una extracción secuencial para conocer la biodisponibilidad de cada uno de ellos.
- Según el comportamiento observado para las diferentes variables se podría concluir que existe un proceso de amortiguamiento debido al alto contenido de carbonato de calcio en el suelo por lo que se recomendaría realizar pruebas de capacidad buffer y coeficientes de adsorción de metales con la finalidad de entender hasta qué punto el suelo podría estar expuesto a estas condiciones sin ser afectado de manera irreversible.
- Hacer un análisis mineralógico más específico para comprobar la existencia de minerales que pueden ser indicadores de dispersión de jales mineros, así como para confirmar a los minerales poco comunes.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., & Cruz-Chávez, E. (2004). EL papel de óxidos de hierro en suelos. *Terre Latinoamericana* , 22 (4), 485-497.
- Alcañiz Ernesto de Jesus. (2012). Química Inorgánica: Capítulo 3 “Fundamentos de reactividad inorgánica”. Recuperado 4 de Marzo 2019. http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/QI/Tema_3A.pdf?fbclid=IwAR3Vlzx7nOBSzFEzfn4fmv4GX9P7QSWLGeth80rJYIHAT0LCFygEHq0DW9M
- Aleida Azamar , A. (21 de Septiembre de 2017). *Cronica*. Recuperado el 4 de Octubre de 2017, de Perspectiva de la minería en México ¿maldición o beneficio?: <http://www.cronica.com.mx/notas/2017/1044300.html>
- Alloway, B. J. (1990). *Heavy Metals in Soils*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Arias Jiménez, A. C. (2007). *Suelos tropicales* . San José, Costa Rica : EUNED.
- Armienta , M. A., Zamora, V., & Juárez, F. (1987). *Manual para el análisis químico de aguas naturales, en el campo y en el laboratorio*. México: Docencia y Divulgación .
- Armienta, M. A., Mugica , V., Reséndiz, I., & Gutierrez Arzaluz, M. (2015). Arsenic and metal mobility in soils impacted by tailing at Zimapán, México. *Soil Pollution and Remediation* .
- Armienta, M. A. & Rodríguez R. (1996). Arsénico en el valle de Zimapán (México). Problemática ambiental. MAPFRE SEGURIDAD. (63) Tercer Trimestre.
- Armienta, M. A., Rodriguez , R., Aguayo , A., Cenicerros , N., Villaseñor , G., & Cruz, O. (1997). Arsenic Contamination of Groundwater at Zimapán, México. *Hydrogeology* , 5 (2), 39-46.
- Armienta, M. A., Villaseñor, G., Cenicerros, N., Aguayo, A., & Morton , O. (2012). Geochemical processes and mobilization of toxic metals and metalloids in an As-rich base metal waste pile in Zimapán, Central Mexico. *Applied Geochemistry* , 27 (11), 2225-2237.
- Armienta M.A, Villaseñor G, Romero FM, XXVI Convención Internacional de Minería, Veracruz, México, 2005.
- Bautista Zúñiga, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados* . Mérida, Yucatán , México: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Baker, D. E., & Cooper. (1995). *Heavy Metals in Soils* . London: Blackie Academic & Professional.
- Bess Fuster E. (2012). Descontaminación de suelos y acuíferos: procesos de remediación. 5ª Edición. Editorial Elearning.
- CAMIMEX: Industria minera mexicana (2013). La importancia de la minería en México. Recuperado 28 Febrero 2019. México País minero <http://www.industriamineramexicana.com/2013/02/la-importancia-de-la-mineria-en-mexico/>

- Casanova Olivo , E. F. (2005). *Introducción a la Ciencia del Suelo* (2a ed.). Caracas : UCV .
- Cepeda Dovala, J. (2009). *Química de suelos*. México: Trillas.
- Clifford Blair R. & Taylor Richard A. (2008). *Bioestadística*. Pearson Educación. México.
- Coker, W. B., Dunn, C. E., & Hall, G. E. (1991). The behavior of platinum group elements in the surficial environment at Ferguson Lake. *Geochem Explore* (40), 165-192.
- Connel, D. W., & Miller, G. J. (1984). *Chemistry and Ecotoxicology of Pollution*. John Wiley & Sons .
- Csavina J., Landázuri A., Wonaschütz A., Rine K., Rheinheimer P., Barbaris B., Conant W., Sáez A. E. & Betterton E. A. (2011). Metal and Metalloid *Contaminants in Atmospheric Aerosols from Mining Operations*. *Water Air Soil Pollut* (221), 145-157.
- Dean Carter Binational Center . (2003). *The University of Arizona*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2017, de Jales Mineros: <http://binational.pharmacy.arizona.edu/content/jales-mineros>
- Dokuchaev V. V. (1899) *Report to the Transcaucasian Statistical Committee on Land Evaluation in General and Especially for the Transcaucasia. Horizontal and Vertical Soil Zones*. Kasan Federal University.
- Dolbear, B. (2014). *Dolbear* . Recuperado el diciembre de 2016, de Dolbear Resources : <http://www.dolbear.com/resources/>
- Donorroso Fernandez C. (2018). Recuperado Febrero 2018, de Libros web, monografías, trabajos de investigación, conferencias, atlas... sobre la Edafología y los suelos: www.edafologia.net/introeda
- Encyclopaedia Britannica. (2015). *Encyclopaedia Britannica School and library subscribers* . Recuperado el 26 de abril de 2016, de Phaeozem FAO soil group : <http://global.britannica.com/science/Phaeozem>
- EPA (2004). *Method 9045D Soil and Waste pH*. United States Environmental Protection Agency.
- EPA (2007). *Method 3051A Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils*. United States Environmental Protection Agency.
- FAO-ISRIC (1990). Guidelines for profile description. 3rd Edition. Roma.
- FAO. (2000). *Depósito de documentos de la FAO*. Recuperado el 18 de Octubre de 2017, de Evaluación de la contaminación del suelo: <http://www.fao.org/docrep/005/x2570s/X2570S02.htm>
- FAO-Unesco . (1990). *Informes sobre recursos mundiales de suelos* . Roma : Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.
- Fassbender , H. W. (1975). *Química de suelos: Con énfasis en suelos de América Latina* (1a ed.). (M. d. Cruz, Ed.) Turrialba, Costa Rica : IICA.
- Fenton , T. E. (2006). Rendzina. En R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science* (2a ed., Vol. 2, págs. 1482-1483).
- Fernández García P. (2014). *Geomorfología – Eólica*. Dpto. Geodinámica, Facultad C.C. Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. Recuperado 28 Febrero 2018. https://eprints.ucm.es/26197/1/Geomorfologia_EOLICA.pdf

- Flores , E., Armienta, A., Micete , S., & Valladares, M. R. (2009). Tratamiento de agua para consumo humano con alto contenido de arsénico: Estudios de un caso en Zimapán Hidalgo, México. *Información tecnológica* , 20 (4), 85-93.
- Flores Delgadillo , L., & Alcalá Martínez, J. R. (2010). *Manual de procedimientos analíticos* . México : UNAM .
- Fortescue, J., Stahl, H., & Webb, J. R. (1988). *Humus geochemistry in the Lac des Iles area, District of Thunder Bay, Ontario*. Recuperado el 2009, de Canadian Geochemical Surveys : http://edg.rncan.gc.ca/geochem/metadata_pub_e.php?id=00730
- Fuentes Nava, E. M. (8 de Septiembre de 2017). *Cambio de Michoacán*. Recuperado el 10 de Octubre de 2017, de La doble cara de la minería en México : <http://www.cambiodemichoacan.com.mx/columna-nc29344>
- García , T., & Dorronsonoro , C. (2002). *Contaminación por metales pesados*. Departamento de edafología y química agrícola de España.
- Gomez, M. B., Gomez, M. M., & Palacios, M. A. (2000) Control of interferences in the determination of Pt, Pd and Rh in airborne particulate matter by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Anal. Chim.* , (404), 285-294.
- Grotz, N., Fox, T., Connolly, E., Guerinot, M. L., & Eide, D. (1998). Identification of a family of zinc transporter genes from Arabidopsis that respond to zinc deficiency. *Proc. Natl. Acad. Sci* (95), 7220-7224.
- Guadarrama-Yáñez, J. (6 de Agosto de 2014). *¿Hacia dónde va la industria minera de México?* Recuperado el 12 de septiembre de 2016, de Forbes México : <http://www.forbes.com.mx/hacia-donde-va-la-industria-minera-de-mexico/#gs.=2mWpP4>
- Gutierrez-Ruiz, M., Romero, F. M., & González-Hernández , G. (2007). Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México . *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* . , 24 (2), 170-184.
- Hidalgo, N. E. (2001). *Correlación y calibración de métodos de análisis químico y determinación del nivel crítico de calcio en suelos ecuatorianos*. Quito, Ecuador .
- Hooda, P. S. (2010). *Trace Elements in Soils* . London: Wiley.
- Hodgson J. M. (1987). Muestreo y descripción de suelos. Reverté. España.
- INEGI. (1972). *Carta edafológica F-14-C-68*. México: INEGI.
- INEGI . (1974). *Carta edafológica*.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos* . Recuperado el 11 de Enero de 2016, de Zimapán, Hidalgo. Clave geostadística 13084: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/13/13084.pdf>
- Instituto de Geología UNAM. (2000). *Resumen de la Geología de la hoja de Zimapán, estados de Hidalgo y Querétaro*, México : UNAM .
- Instituto Geológico y Minero de España . (2004). *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*. Madrid: Estudios y Proyectos mineros S.A. .

- Jiménez Arévalo, I. Y. (2008). *Caracterización geoquímica ambiental de suelos contaminados por arsénico, plomo y cadmio en el distrito minero Zimapán, Hgo.* San Luis Potosí: Facultad de ingeniería Instituto de metalurgia.
- Jing C., Meng Xiaoguang M. & Korfiatis G. P. (2004). Lead leachability in stabilized/solidified soil samples evaluated with different leaching tests. *Journal of Hazardous Materials B114* 101-110.
- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (1984). *Trace elements in soils and plants.* Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Kass, D. C. (1998). *Fertilidad de suelos.* (J. Nuñez, Ed.) San José, Costa Rica: EUNED.
- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macking, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245.
- Lillo, J. (2010). *Impactos de la minería*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2017, de Universidad Complutense de Madrid:
<https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>
- Lillo, J. (2006). *Universidad Complutense de Madrid.* Recuperado el 29 de Noviembre de 2017, de Impactos de la minería en el medio natural:
<https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>
- Li, X., & Thornton, I. (2001). Chemical partitioning of trace and major elements in soils contaminated by mining and smelting activities. *Applied geochemistry* (16), 1693-1706.
- Manning, B. A., & Goldberg, S. (1997). Arsenic (III) and arsenic (V) adsorption on three California soils. *Soil Sci.* (162), 886-895.
- Márquez-Zavalía M. F. (2006). El extremo rico en As de la serie Jordanita-Geocronita de mina Capillitas, Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61 (2), 231-235.
- Mendoza-Amézquita, E., Armienta Hernández, M. A., Ayora, C., Soler, A., & Ramos Ramírez, E. (2006). Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas "La Asunción" y "Las Torres", en el distrito minero de Guanajuato, México. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*, 23 (1), 75-78.
- MMSD. (Abril de 2002). *MMSD.* Recuperado el 24 de Noviembre de 2017, de Proyecto minería, minerales y desarrollo sustentable:
<http://pubs.iied.org/pdfs/G00684.pdf>
- Molina Garduño Alexia (2018). *Geoquímica y distribución de St en jales del distrito minero de Zimapán, Hidalgo.* Ciudad de México. Tesis de obtención de grado de M. en C. UNAM.
- Moreno Tovar, R., Barbanson, L., & Coreño Alonso, O. (2009). Neoformación mineralógica en residuos mineros (jales) del distrito minero Zimapán, estado de Hidalgo, México. *Minería y Geología*, 23 (2), 1-31.
- Moreno Tovar R., Téllez Hernández J. & Monroy Fernández M. G. (2012). Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28 (3), 203-218.

- N., C., F., M., & A., I. (2000). Cuantificación de la degradación de las propiedades de los suelos en explotaciones mineras a cielo abierto. *Edafología*, 7 (3), 31-42.
- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (1999). Geochemistry of acid mine waste, in. Plumlee, G. S. And London, M. J., Eds. reviews, in *Economic Geology, The environmental Geochemistry of ore deposits.*, 6A, 133-160.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. (2002). *Normas Oficiales Mexicanas*. Recuperado el 6 de Septiembre de 2018, de Norma oficial mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/rn/rn021-02.pdf>
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerin, M., & Poch Claret, R. M. (2014). *Edafología: uso y protección de suelos*.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, R. M. (2014). *Edafología. Uso y protección del suelo* (3a ed.). Madrid, España : Mundi-Prensa.
- Porta, Jaume ; López-Acevedo, Marta ; Poch, Rosa M. (2014). *Edafología: Uso y protección de suelos* (3a ed.). Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Prieto García, F., Callejas Hernández, J., Román Gutiérrez, A., Prieto Mendez, J., & Beltran Hernández, R. (2007). Bioacumulación y daños genotóxicos en cultivos de cebada cervecera (*Hordeum distichon* L) y habas (*Vicia faba*) por presencia de arsénico en aguas y suelos de Zimapán, Hidalgo, México. *Ingeniería sanitaria y ambiental* (91), 63-68.
- Prieto García, F., Lechuga Vargas, M. A., Méndez Marzo, M. A., Barrado Esteban, E., & Gaytan Oyarzún, J. C. (2006). Daños tóxicos en tejidos vegetales, producidos por aguas contaminadas con arsénico en Zimapán, Hidalgo, México. *Ciencia y tecnología alimentaria*, 26 (1), 94-97.
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología aplicada*, 5 (1,2), 149-155.
- Ramírez, É. (11 de Junio de 2013). *Contralínea.com.mx*. Recuperado el 12 de septiembre de 2016, de México, "paraíso"para extractivistas mineros : <http://www.contralinea.com.mx/archivo-revista/index.php/2013/06/11/mexico-paraíso-para-extractivistas-mineros/>
- Ramos Villegas Jorge L y Hernández Viveros Juan A. (Agosto 2014). Asimilación de arsénico y metales pesados en maíz cultivado en suelos cercanos a jales. Proyecto de Integración en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- Randell, B. (2008). *Ordenamiento ecológico territorial regional en los municipios donde se ubica el Parque Nacional Los Marmoles*. Consejo Estatal de Ecología. SNIB-CONABIO. D.F. : Consejo Estatal de Ecología.
- Razo I., Carrizales L., Castro J., Díaz-Barriga F. & Monroy M. (2004). Arsenic and heavy metal pollution of soil, wáter and sediments in a semi-arid climate mining área in Mexico. *Water, Air and Soil Pollution* 152, 129-152.
- Reyes Cruz, V. E., Urbano Reyes, G., Veloz Rodríguez, M. A., & González, M. I. (2008). Caracterización geoquímica ambiental de suelos contaminados por arsénico, plomo y cadmio en el distrito minero de Zimapán, Hgo. *Boletín de Mineralogía*, 18, 51-52.

- Rodríguez, O., & Rodríguez, V. (2002). Comparación de la CIC en dos suelos, utilizando acetato de amonio, acetato de sodio y Cloruro de Amonio. *Fac. Agron.*, 19 (4).
- Rodríguez, R., Ramos, J. A., & Armienta, A. (2004). Groundwater arsenic variations: the role of local geology and rainfall. *Applied Geochemistry*, 19, 245-250.
- Rojas J. M. (2012). *Comparación de métodos de determinación en Ensayo de rotaciones en siembra directa*. Centro Regional Chaco Formosa Estación experimental Agropecuaria "Sáenz Peña". Argentina.
<https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta- densidad aparente.pdf>
- Romero F., Armienta M. A., Gutiérrez M. & Villaseñor G. (2008). Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 24 (2) 43-54.
- Ruda de Schenquer, E. E., Mongiello, A., & Acosta, A. (2004). *Contaminación y salud del suelo*. Santa Fe, Argentina: UNL.
- Ruiz Huerta, E. A., & Armienta Hernández, M. A. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28 (2), 103-117.
- Saucedo Plata, E. (2014). *Suelos contaminados con Elementos Potencialmente Tóxicos. Un nuevo método de detección*. Bloomington: Palibrio.
- SEMARNAT. (2 de marzo de 2007). *PROFEPA*. Recuperado el Octubre 2 de 2018, de Norma Oficial Mexicana 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.: http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1392/1/nom-147-semarnat_ssa1-2004.pdf
- Siebe, C., Jahn, R., & Stahr, K. (2006). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. México-Alemania: UNAM, Universidad de Halle, Universidad de Hohenheim.
- Simón M., Martín F., Ortiz I., García I., Fernández J., Fernández E., Donorroso C. & Aguilar J. (2001). *Soil pollution by oxidation of tailings from toxic spill of a pyrite mine*. *The Science of the Total Environment* (279) 63-74.
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* (17), 517-568.
- Solano Marín, A. M. (2005). *Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc*. Universidad de Murcia. Tesis de Doctorado. Recuperado 28 de Febrero 2018.
<https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/11036/Tasm11de16.pdf?sequence=11>
- Suter. (1987). Structural traverse across the Sierra Madre Oriental fold-thrust belt in east-central México. *Geological Society of America Bulletin*, 98, 249-264.
- Taylor, R. M. (1990). Some observations on the formation and transformation of iron oxides. En M. Boodt, M. Hayes, & A. Herbillon, *Soil colloids and their associations in aggregates* (págs. 85-104). New York: Plenum Press.

- The University of Arizona: Dean Carter Binational Center (1999). *Jales mineros*. Recuperado 28 Febrero 2019. <http://binational.pharmacy.arizona.edu/content/jales-mineros>
- Thompson L. M. & Throeh F. R. (1988). *Los suelos y su fertilidad*. Editorial Reverté. 4ª Edición Junio 2002. España.
- Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (2002). *Los suelos y su fertilidad* (4a ed.). España: Reverté.
- UNAM, Instituto de ecología A.C. (2003). *Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México*. (J. Álvarez-Sánchez , & E. Naranjo-García , Edits.) Veracruz , México : UNAM .
- Usón Murillo A., Boixadera Llobet J., Bosch Serra A. & Enrique Martín A. (2010). *Tecnología de suelos: estudio de casos*. Pressas universitarias de Zaragoza, ediciones de la Universitat de Lleida. Zaragoza. España.
- Villaseñor, C., Gómez, C., Medina, J., Condliffe, E., & Lozano, S. (1987). Boulangerita de la chimenea Las Animas, Zimapán, Estado de Hidalgo: Mineralogía y Metalogenia. . *Sociedad Mexicana de Mineralogía, A. C. , 3* (30).
- Villegas Casares W. A., Acereto Escoffie P. O., Vargas Quiñones M. E. (2006). *Análisis ultravioleta visible: La teoría y la practica en el ejercicio profesional*. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Volke Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J., & de la Rosa Pérez , D. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. México : SEMARNAT-INE.
- Walkley, A. (1947). *A Critical examination of a rapid method for determination of organic carbon in soils - effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents*. Soil Sci. 63,251-257.
- Walkley, A. and I. A. Black (1934). *An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method*. Soil Sci. 37,29-37.
- Warren, H. V., Delavault, R. E., & Fletcher, K. W. (July de 1971). *Canad. Mining Metall . Bull , 1-12*.
- Welcher F. & Hanhn R. (1995). *Semimicro Qualitative Analysis*. D. Van Nostrand Co. Inc. New York.
- WRB. (1999). *Base referencial mundial del recurso suelo* . Roma , Italia : SICS-AISS-IBG, ISRIC, FAO .
- Zaragoza, V. M. (2013). *Origen y distribución espacial de metales pesados en suelos de Zimapán, Hidalgo* . Texcoco , Montecillo : Colegio de Post graduados.
- Zúñiga Vázquez, D. V. (2014). *Evaluación de la movilidad de Cd, Pb, Zn, Fe y As bajo diferentes condiciones fisicoquímicas en jales mineros del municipio de Zimapán, Hidalgo*. México, D.F. : Tesis de licenciatura UNAM.

15 ANEXOS

15.1 Descripción de horizontes

15.1.1 Perfil Zim 1

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCIÓN
Ap	0-3	Café muy oscuro en húmedo (7.5YR 2.5/2) y gris muy oscuro en seco (5YR 3/2), textura franco arcillo arenosa, contenido bajo de materia orgánica (2.66%), pH neutro (6.97), 60% pedregosidad, estructura de granular (no hay estabilidad de agregados), pocos poros micro e intersticiales, límite difuso, densidad de raíces bajas y límite difuso.
Ah	3-11	Café muy oscuro en húmedo (10YR 2/2) y café oscuro en seco (7.5YR 3/2), textura franco arcillo arenosa, contenido bajo de materia orgánica (1.43%), pH ligeramente ácido (6.61), 40% pedregosidad, estructura tipo granular con baja estabilidad de agregados, poros comunes muy finos e intersticiales, baja densidad de raíces y límite difuso.
AB	11-20	Negro en húmedo (10YR 2/1) y café grisáceo muy oscuro en seco (10YR 3/2), textura franco arcillosa, contenido bajo de materia orgánica (1.98%), pH ligeramente alcalino (7.91), 80% pedregosidad, estructura tipo granular con baja estabilidad de agregados, poros comunes muy finos e intersticiales, baja densidad de raíces y límite difuso. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.

15.1.2 Perfil Zim 2

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCIÓN
	10-0	Mantillo tipo moder. Con horizontes L-Of-Oh bien definidos.
Ah ₁	0-4	Café muy oscuro en húmedo (7.5YR 2.5/2) y café oscuro (7.5YR 3/2) en seco, textura franco arcillo, contenido bajo de materia orgánica (2.25%), pH ligeramente alcalino (7.74), 20% pedregosidad, estructura granular fino y baja estabilidad de agregados, poros comunes muy finos y vesiculares intersticiales, límite difuso, densidad de raíces muy baja y límite gradual. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
Ah ₂	4-10	Café oscuro en húmedo (7.5YR 3/2) y café en seco (7.5YR 4/2), textura arcillosa, contenido bajo de materia orgánica (1.21%), pH alcalino (8.14), 10% pedregosidad, estructura granular media y baja estabilidad de agregados, poros pocos intersticiales muy finos y vesiculares medios, límite difuso y densidad de raíces muy baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
AB	10-18	Café oscuro en húmedo (7.5YR 3/2) y café en seco (7.4YR 5/2), textura arcillosa, contenido muy bajo de materia orgánica (0.68%), pH alcalino (8.19), estructura angular y primatica, ambas de tamaño medio, poros pocos intersticiales muy finos y vesiculares medios, límite difuso y densidad de raíces muy baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
Bw ₁	18-28	Café en húmedo (7.5YR 4/3) y café claro en seco (7.5YR 6/3), pH alcalino (8.28), estructura angular en bloques, ambas de tamaño medio, baja estabilidad de agregados, poros pocos intersticiales, límite difuso y densidad de raíces media. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.

BW ₂	28-39	Color café en húmedo (7.5YR 4/3) y seco (7.5YR 5/3) , pH ligeramente alcalino (7.84), estructura tipo angular fina, alta estabilidad de agregados, con grietas profundas y límite bien definido. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
BC ₁	39-66	Color café en húmedo (7.5YR 4/3) y café claro en seco (7.5YR 5/3) , pH ligeramente alcalino (7.87), estructura tipo angular fina, alta estabilidad de agregados, con grietas profundas y límite difuso. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
BC ₂	66-127	Color café en húmedo (7.5YR 4/3) y gris rosado en seco (7.5YR 6/2), pH ligeramente alcalino (7.81), estructura tipo angular fina, estabilidad de agregados media, con grietas profundas y límite difuso. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
BCk	127-167	Color café oscuro en húmedo (7.5YR 4/3) y café en seco (7.5YR 6/2), pH neutro (7.07), estructura tipo angular en bloques que rompe a fino, estabilidad de agregados media, con grietas profundas y límite difuso. Presencia de carbonatos en forma de cristales y sin reacción a la fenolftaleína.
C	167-185	Color café en húmedo (7.5YR 4/4) y en seco (7.5YR 5/4) , pH neutro (7.23), estructura masiva, con grietas profundas y límite difuso. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.

15.1.3 Perfil Zim 3

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCIÓN
Ah	0-4	Café muy oscuro en húmedo (10YR 2/2) y café (10YR 4/3) en seco, textura arcillosa, contenido bajo de materia orgánica (2.47%), pH ligeramente alcalino (7.79), 10% pedregosidad, estructura granular fino y baja estabilidad de agregados, poros intersticiales finos, límite difuso y densidad de raíces muy baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
B	4-7	Café oscuro en húmedo (7.5YR 3/2) y café (7.5YR 4/2) en seco, textura franco arcillo arenosa, contenido bajo de materia orgánica (1.51%), pH ligeramente alcalino (7.75), 10% pedregosidad, estructura sub angular media que rompe a granular fina y muy fina, baja estabilidad de agregados, poros intersticiales muy finos, límite difuso y densidad de raíces baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
BC	7-40	Café oscuro en húmedo (7.5YR 3/3) y gris rosado (7.5YR 6/2) en seco, textura franco arcillosa, pH ligeramente alcalino (7.76), 80% pedregosidad, estructura sub angular media que rompe a granular fino y muy fino y estabilidad de agregados media, poros intersticiales (alta pedregosidad), límite difuso y densidad de raíces baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.

15.1.4 Perfil Zim 4

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCIÓN
	3-0	Acumulación de material orgánico no humificado producto de algún tipo de arado.
Ap	0-6	Café muy oscuro en húmedo (7.5YR 2.5/2) y café oscuro (7.5YR 3/2) en seco, textura franco arcillosa, contenido media alta de materia orgánica (4.65%), pH ligeramente alcalino (7.7), estructura granular fina y muy fina, estabilidad de agregados media, poros comunes intersticiales y pocos tubulares, ambos finos, límite difuso y densidad de raíces baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
Ah	6-16	Café muy oscuro en húmedo (7.5YR 2.5/2) y café (7.5YR 4/2) en seco, textura franco arcillosa, contenido medio de materia orgánica (2.77%), pH ligeramente alcalino (7.63), estructura sub angular en bloques que rompe a granular media y fina, estabilidad de agregados media, poros pocos intersticiales y pocos vesiculares, ambos finos, límite claro y densidad de raíces muy baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
Bw ₁	16-24	Café muy oscuro en húmedo (10YR 2/2) y café grisáceo (10YR 5/2) en seco, textura franco arcillosa, contenido bajo de materia orgánica (1.97%), pH ligeramente alcalino (7.65), estructura sub angular en bloques grandes, medios y finos que rompe a granular media y fina, estabilidad de agregados alta, poros pocos intersticiales, límite gradual y densidad de raíces muy baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
Bw ₂	24-34	Café muy oscuro en húmedo (7.5YR 2.5/2) y café (7.5YR 5/2) en seco, contenido bajo de materia orgánica (1.68%), pH ligeramente alcalino (7.74), estructura angular grande y media que rompe en sub angular en bloques medios y finos, estabilidad de agregados alta, poros muy pocos

		intersticiales, límite difuso y densidad de raíces muy baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
BC	34-51	Café muy oscuro en húmedo (7.5YR 3/2) y café (7.5YR 5/2) en seco, pH ligeramente alcalino (7.73), estructura sub angular en bloques medios, finos y muy finos que rompe a granular, estabilidad de agregados nula, límite difuso, sin raíces. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
C	51-68	Café muy oscuro en húmedo (7.5YR 2.5/2) y café (7.5YR 5/2) en seco, pH ligeramente alcalino (7.67), estructura masiva, estabilidad de agregados nula, límite difuso, sin raíces. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.

15.1.5 Perfil Zim 5

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCIÓN
Ap	0-5	Café muy oscuro en húmedo (10YR 2/2) y café grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco, textura franca, contenido muy bajo de materia orgánica (0.37%), pH ligeramente alcalino (7.9), estructura granular muy fina, estabilidad de agregados media, poros pocos intersticiales muy finos, límite difuso y densidad de raíces baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
BA	5-20	Gris muy oscuro en húmedo (5YR 3/1) y café (7.5YR 4/2) en seco, textura franca, pH alcalino (8.38), estructura sub angular media que rompe a granular fina y muy fina, estabilidad de agregados muy baja, poros pocos intersticiales y tubulares, ambos muy finos, límite difuso y densidad de raíces baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
BC ₁	20-31	Gris muy oscuro en húmedo (7.5YR 3/1) y café (7.5YR 4/2) en seco, textura franco arcillosa, pH alcalino (8.63), estructura sub angular media que rompe a granular fina y muy fina, estabilidad de agregados media, poros pocos intersticiales y tubulares, ambos muy finos, límite difuso y densidad de raíces baja. Concreciones de carbón. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
BC ₂	31-45	Café muy oscuro en húmedo (7.5YR 2.5/2) y café (7.5YR 4/2) en seco, pH alcalino (8.12), estructura sub angular media que rompe a granular fina y muy fina, estabilidad de agregados media, poros pocos intersticiales y tubulares, ambos muy finos, límite difuso. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
CB	45-56	Café oscuro en húmedo (7.5YR 3/2) y café (7.5YR 5/2) en seco, pH alcalino (8.3), estructura sub angular media, estabilidad de agregados alta, sin poros, límite difuso. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.

15.1.6 Perfil Zim 6

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCIÓN
	10-0	Mantillo tipo "moder". Con horizontes L-Of-Oh bien definidos.
Ah	0-5	Café oscuro en húmedo (10YR 3/3) y café grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en seco, textura franca arcillosa, contenido bajo de materia orgánica (1.17%), pH ligeramente alcalino (7.19), estructura granular media/fina, estabilidad de agregados alta, poros intersticiales finos, vesiculares medianos y tubulares finos (todos comunes), límite claro y densidad de raíces media. Presencia de carbonatos y baja reacción a la fenolftaleína.
BA	5-10	Café en húmedo (7.5YR 4/3) y (7.5YR 5/3) en seco, textura arcillo limosa, contenido muy bajo de materia orgánica (0.23%), pH ligeramente alcalino (7.6), estructura sub angular media/fina que rompe a granular fina, estabilidad de agregados media, poros intersticiales finos, vesiculares medianos y tubulares finos (todos comunes), límite ondulado y densidad de raíces baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
Bw ₁	10-26	Café en húmedo (7.5YR 4/3) y café claro (7.5YR 6/3) en seco, textura franco arcillo limosa, pH ligeramente alcalino (7.48), estructura sub angular media/fina que rompe a granular muy fina, estabilidad de agregados media, poros intersticiales muy finos (comunes), límite difuso y densidad de raíces muy baja. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.

Bw ₂	26-42	Café en húmedo (7.5YR 4/3) y café claro (7.5YR 6/3) en seco, pH ligeramente alcalino (7.54), estructura sub angular media que rompe a granular fina, estabilidad de agregados media, poros intersticiales muy finos (comunes) y límite difuso. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
BC	42-55	Café en húmedo (7.5YR 4/3) y café claro (7.5YR 6/3) en seco, pH ligeramente alcalino (7.66), estructura sub angular media que rompe a granular fina, estabilidad de agregados baja, sin porosidad y límite difuso. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.
C	55-87	Café en húmedo (7.5YR 4/3) y gris rosado (7.5YR 7/2) en seco, pH ligeramente alcalino (7.73), estructura masiva, sin porosidad y límite difuso. Presencia de carbonatos y reacción a la fenolftaleína.

15.1.7 Perfil Zim 7

HORIZONTE	PROFUNDIDAD (cm)	DESCRIPCIÓN
Ag	0-3	Café oscuro en húmedo (10YR 3/3) y café amarillento oscuro (10YR 4/4) en seco, textura franca limosa contenido muy bajo de materia orgánica (0.29%), pH ligeramente alcalino (7.37), estructura masiva con pequeñas grietas, límite claro y densidad de raíces muy baja. Presencia de manchas rojizas. Presencia de manchas cobrizas. Baja reacción al HCl (10%) y reacción a la fenolftaleína.
Cg <i>(acumulación de una capa de Jales mineros, tomar como "artefactos")</i>	3-9	Café oscuro en húmedo (10YR 3/3) y café amarillento oscuro (10YR 4/4) en seco, textura arcillosa, pH cercano a la neutralidad (6.97), estructura masiva con pequeñas grietas, límite claro y densidad de raíces muy baja. Presencia de un "sub horizonte" claro y continuo de jales. Baja reacción al HCl (10%) y reacción a la fenolftaleína.
2CBg	9-14	Café oscuro en húmedo (10YR 3/3) y café (10YR 4/3) en seco, textura franca arcillosa, pH ligeramente alcalino (7.36), estructura angular en bloques, límite claro y densidad de raíces muy baja. Presencia de manchas cobrizas. Reacción al HCl (10%) y a la fenolftaleína.
3BCg	14-24	Café grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2) y café (10YR 4/3) en seco, pH ligeramente alcalino (7.64), estructura angular en bloques finos y un límite claro. Presencia de manchas cobrizas. Reacción al HCl (10%) y a la fenolftaleína.
3BCg ₂	24-36	Café grisáceo muy oscuro en húmedo (10YR 3/2) y café grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco, pH ligeramente alcalino (7.42), estructura angular en bloques finos y un límite claro. Presencia de manchas cobrizas. Reacción al HCl (10%) y a la fenolftaleína. Comienza el endurecimiento del suelo con pequeñas zonas cementadas y una pedregosidad del 40%.

CB

36-44

Café muy oscuro en húmedo (10YR 2/2) y café grisáceo oscuro (10YR 4/2) en seco, pH ligeramente alcalino (7.76), estructura angular en bloques finos y límite claro. Presencia de manchas cobrizas. Baja reacción al HCl (10%) y alta a la fenolftaleína. Se endurece por completo y ya no permite hacer un perfil más profundo.

15.2 Índice de recuperación

ELEMENTO	Certificado Montana II Soil 2711a (mg/kg)	Valor obtenido tras la digestión (media)	Índice de recuperación (%)	
			Reportado	Obtenido
Arsénico (As)	107 ± 5	100.03	85	93.49
		79.55		74.35
		84.17		78.66
		77.1		72.06
Cadmio (Cd)	54.1 ± 0.5	42	90	77.63
		34		62.85
		35.75		66.08
		33.5		61.92
Plomo (Pb)	1100 ± 1400	1162.5	91	83.04
		1010		72.14
		1035		73.93
		1011.25		72.23
Hierro (Fe)	28200	22493.12	54	79.76
		16868		59.82
		18305.62		64.91
		17993.12		63.81
Zinc (Zn)	414 ± 11	381.25	85	92.09
		300		72.46
		325		78.5
		325		78.5

15.3 Datos numéricos obtenidos

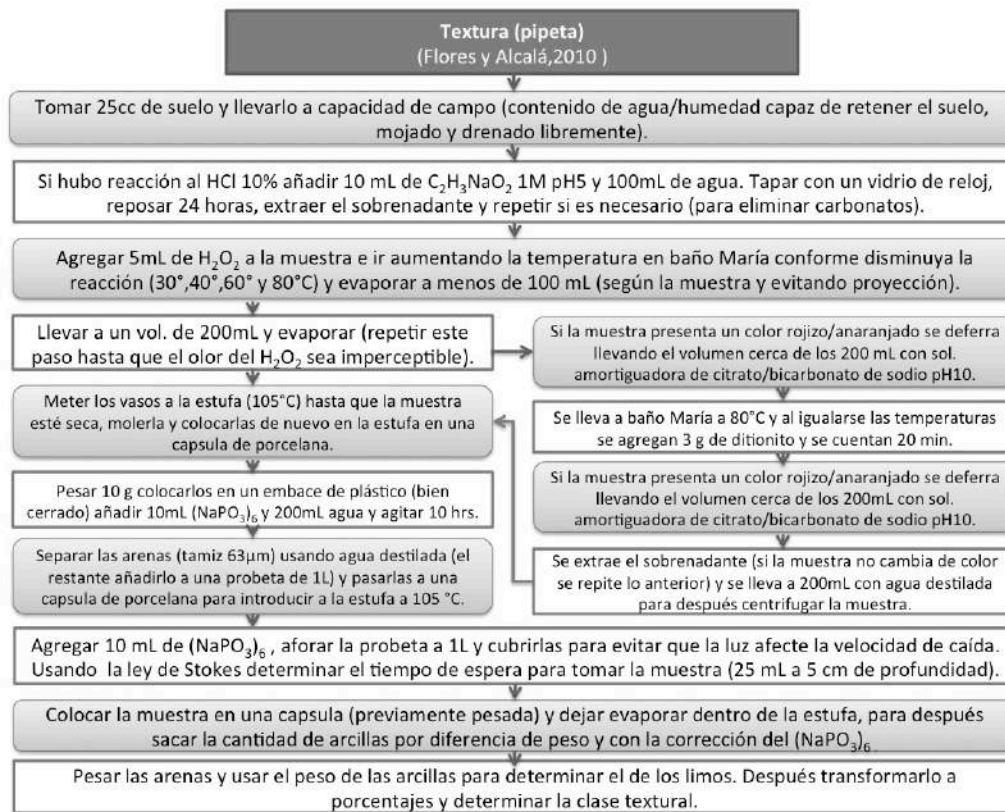
Muestra	Densidad real g/cm ³	Densidad aparente g/cm ³	Espacio poroso %	Alcalinidad Solución del suelo		Textura		
				Bicarbonatos mg/L HCO ₃ ⁻	Carbonatos mg/L CO ₃ ²⁻	Arenas %	Limos %	Arcillas %
Zim 1								
1	2.98	1.3	56.37	122	0	58	15.7	26.3
2	2.15	1.14	47.04	122	0	50.69	26.61	22.7
3	2.43	1.1	54.79	219.6	0	30.51	37.59	31.9
Zim 2								
4	2.65	1.18	55.42	122	0	34.72	28.98	36.3
5	2.37	1.15	51.4	146.4	0	25.99	17.71	56.3
6	2.16	1.16	46.19	195.2	0	49.12	23.78	27.1
7	2.6	1.07	58.8	170.8	0			
8	2.23	1.03	53.73	122	0			
9	2.37	1.06	55.21	73.2	0			
10	2.3	1.12	51.22	73.2	0			
11	2.37	1.11	53.09	73.2	0			
12	2.38	1.1	53.71	146.4	0			
Zim 3								
13	2.98	1.34	55.00	122	0	40.36	6.94	52.7
14	2.27	1.03	54.55	122	0	48	28.1	23.9
15	2.36	1.04	55.86	146.4	0	29.24	30.86	39.9
Zim 4								
16	3.12	0.99	68.25	122	0	41.9	20.6	37.5
17	2.97	1.00	66.31	122	0	24.62	35.48	39.9
18	2.58	0.95	66.13	146.4	0	30.42	34.48	35.1
19	2.34	0.94	59.77	219.6	0			
20	2.4	0.99	58.69	268.4	0			
21	2.57	1.02	60.26	219.6	0			
Zim 5								
22	3.63	1.13	68.87	317.2	0	35.04	41.46	23.5
23	2.38	1.07	54.97	292.8	48	42.09	36.41	21.5
24	2.23	1.06	52.38	195.2	48	37.58	36.52	25.9
25	2.35	1.08	53.97	390.4	48			
26	2.39	1.04	56.42	268.4	48			
Zim 6								
27	4.76	0.93	80.47	244	0	20.56	49.14	30.3
28	2.52	0.98	61.05	73.2	0	13.47	42.63	43.9
29	2.53	0.91	63.97	48.8	0	10.98	55.92	33.1
30	2.58	0.91	64.68	48.8	0			
31	2.4	0.92	61.60	73.2	0			
32	2.76	0.97	64.81	97.6	0			
Zim 7								
33	3.12	1.12	64.19	48.8	0	18.48	62.42	19.1
34	3.41	0.83	75.65	48.8	0	4.29	39.01	56.7
35	2.57	0.9	63.50	73.2	0	31.95	35.75	32.3
36	2.19	1.09	50.12	97.6	0			
37	2.54	1.01	60.17	73.2	0			
38	2.27	1.08	52.33	73.2	0			

Muestra	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Cd (mg/kg)	S (mg/kg)
Zim 1						
1	531.5	1065	637.5	22,993.12	7	3,880
2	205.9	724.5	325	16,243.12	5.75	1,724
3	75.52	184.75	98.75	23,118.12	1.5	972.8
Zim 2						
4	115.8	340	275	21,368.12	3.5	2,719
5	31.2	103.25	75	20,055.62	1.5	1,011.9
6	24.6	11.25	49.37	21,743.12	0.75	725.18
7	22.15	7.5	60.62	20,868.12	0.5	1,051.6
8	28.25	2.5	45.62	15,868.12	1	1,699.9
9	4.14	9	52.5	18,430.62	1	1,050.1
10	2.92	7.25	56.25	20,243.12	1	1,835.4
11	5.09	24	77.5	26,305.62	1	1,763.2
12	2.89	3.25	53.75	14,180.62	1.5	1,921
Zim 3						
13	35.9	36	77.5	22,305.62	1.5	1,037.5
14	41.8	38.5	80.62	23,430.62	1.5	9,376.3
15	7.52	15.25	45.62	16,555.62	1.5	595.28
Zim 4						
16	518.9	670	512.5	25,805.62	7	3,728.2
17	357.15	1,017.51	500	23,243.12	9.75	2,230.4
18	206.77	1,146.87	362.5	22,805.62	11	1,177.3
19	119.07	555	15.62	20,493.12	1	922.81
20	115.62	562.2	125	20,743.12	3	739.71
21		357.5	112.5	21,868.12	1.75	664.3
Zim 5						
22	128.37	156	300	13,993.12	2	1,032.8
23	168	283	135	15,243.12	3.25	1,531.7
24	215.92	122.25	109.37	17,868.12	1.5	1,727.3
25	534.75	238	115	17,243.12	3	2,927.8
26	117.37	15.75	58.75	16,805.62	0.5	3,014.5
Zim 6						
27	1,484.5	1,082.5	1,550	42,493.12	14.5	1,4665
28	153	15.25	68.75	21,368.12	1	1,2538
29	193.2	5	52.5	16,555.62	1	2,1119
30	229.45	4.75	65	16,868.12	1.25	4,887.2
31	177.9	5.75	56.87	13,118.12	1	2,701.2
32	23.72	7.25	83.75	28,993.12	0	1,832.2
Zim 7						
33	1,092.5	1,022.5	675	41,243.12	5.5	14,763
34	4,368	1,490.62	2,100	62,493.12	18.5	27,787
35	426.37	710	600	38,493.12	4	3,192.4
36	1,728.75	825	800	38,743.12	7.5	4,184.1
37	905.75	847.5	850	30,118.12	10.5	7,330.3
38	97.25	111.75	76.25	21,118.12	1	2,466

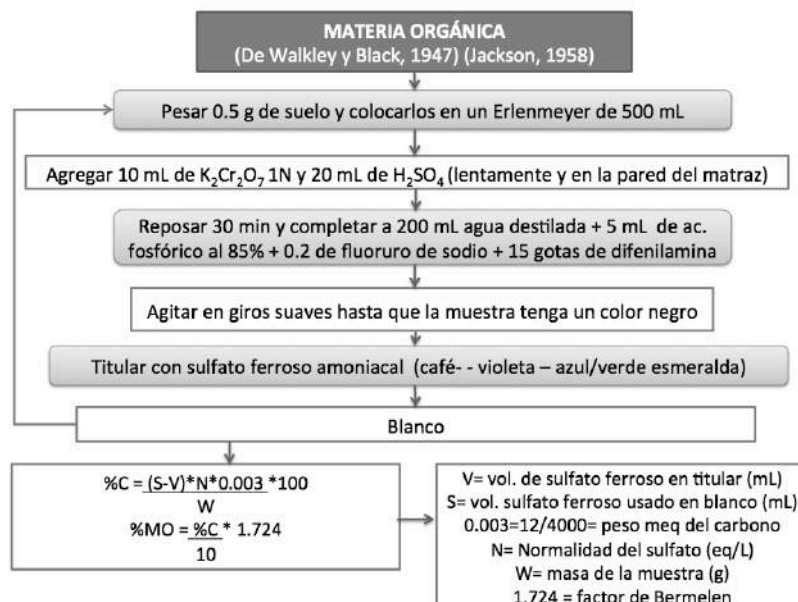
Muestra	pH	Conductividad mS	CaCO ₃ mg/kg	% MO	Color seco	Color Húmedo	Reacción a la fenolftaleína
Zim 1							
1	6.96	0.21	0	0.330	5YR 3/1	7.5YR 2.5/2	NO
2	6.61	0.1016	0	0.177	7.5YR 3/2	10YR 2/2	NO
3	7.91	0.1972	51260	0.245	10YR 3/2	10YR 2/1	++
Zim 2							
4	7.74	0.463	53300	0.264	7.5YR 3/2	7.5YR 2.5/2	++
5	8.14	0.456	56660	0.142	7.5YR 4/2	7.5YR 3/2	++
6	8.19	0.368	58400	0.080	7.5YR 5/2	7.5YR 3/2	++
7	8.28	0.499	55820	0.022	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	++
8	7.84	1.701	56000	0.080	7.5YR 5/3	7.5YR 4/3	++
9	7.87	2.87	55280	0.022	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	++
10	7.81	4.26	54920	0.008	7.5YR 6/2	7.5YR 4/3	+
11	7.07	4.39	55760	0.072	7.5YR 4/3	7.5YR 3/3	NO
12	7.23	4.4	61400	0.037	7.5YR 5/4	7.5YR 4/4	++
Zim 3							
13	7.79	0.278	58880	0.357	10YR 4/3	10YR 2/2	+
14	7.75	0.337	59900	0.218	7.5YR 4/2	7.5YR 3/2	++
15	7.76	0.4	62720	0.200	7.5YR 6/2	7.5YR 3/3	++
Zim 4							
16	7.7	0.48	59900	0.672	7.5YR 3/2	7.5YR 2.5/2	++
17	7.63	0.721	60680	0.400	7.5YR 4/2	7.5YR 2.5/2	+
18	7.65	0.583	60800	0.284	10YR 5/2	10YR 2/2	+
19	7.74	0.476	62660	0.243	7.5YR 5/2	7.5YR 2.5/2	++
20	7.73	0.587	65240	0.305	7.5YR 5/2	7.5YR 3/2	++
21	7.67	0.899	65180	0.270	7.5YR 5/2	7.5YR 2.5/2	++
Zim 5							
22	7.9	0.398	68660	0.377	10YR 4/2	10YR 2/2	++
23	8.38	4.17	68240	0.36	7.5YR 4/2	5YR 3/1	++
24	8.63	5.04	65540	0.274	7.5YR 4/2	7.5YR 3/1	++
25	8.12	8.43	66560	0.274	7.5YR 4/2	7.5YR 2.5/2	++
26	8.3	9.03	67520	0.229	7.5YR 5/2	7.5YR 3/2	++
Zim 6							
27	7.19	0.625	68360	1.176	10YR 3/2	10YR 3/3	+
28	7.6	2.62	68120	0.233	7.5YR 5/3	7.5YR 4/3	++
29	7.48	4.48	69020	0.435	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	++
30	7.54	5.67	71300	0.156	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	++
31	7.66	4.79	72080	0.138	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	++
32	7.73	3.61	67820	0.101	7.5YR 7/2	7.5YR 4/3	++
Zim 7							
33	7.35	2.7	63740	0.293	10YR 4/4	10YR 3/3	+
34	6.97	3.07	61940	0.528	10YR 4/4	10YR 3/3	+
35	7.36	1.728	66200	0.227	10YR 4/3	10YR 3/3	++
36	7.64	0.757	66380	0.107	10YR 4/3	10YR 3/2	++
37	7.42	2.19	63020	0.321	10YR 4/2	10YR 3/2	++
38	7.76	0.1712	62960	0.202	10YR 4/2	10YR 2/2	++

15.4 Diagramas de flujo para elaboración de técnicas

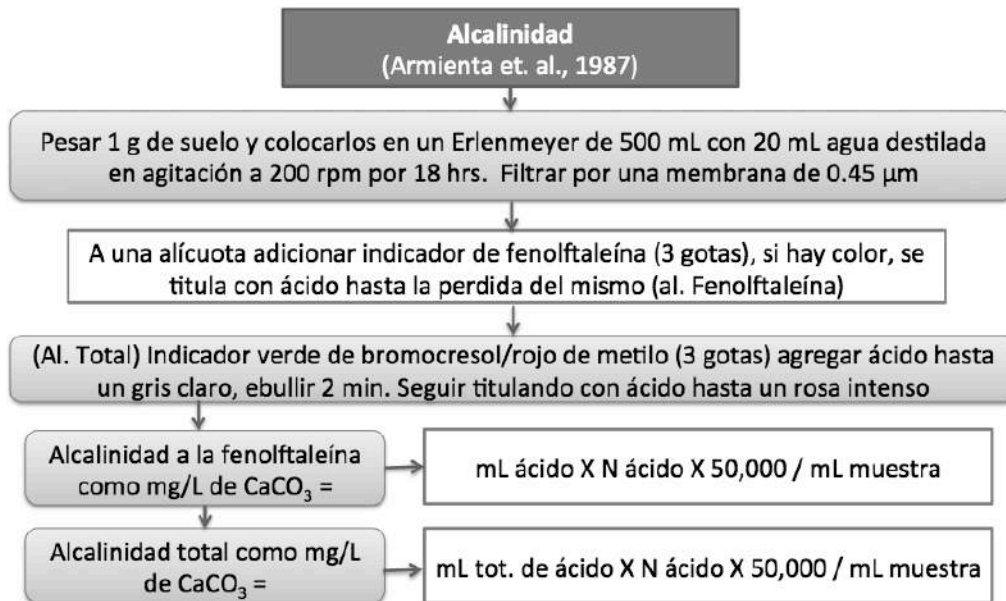
15.4.1 Diagrama de flujo para determinar textura por el método de la pipeta



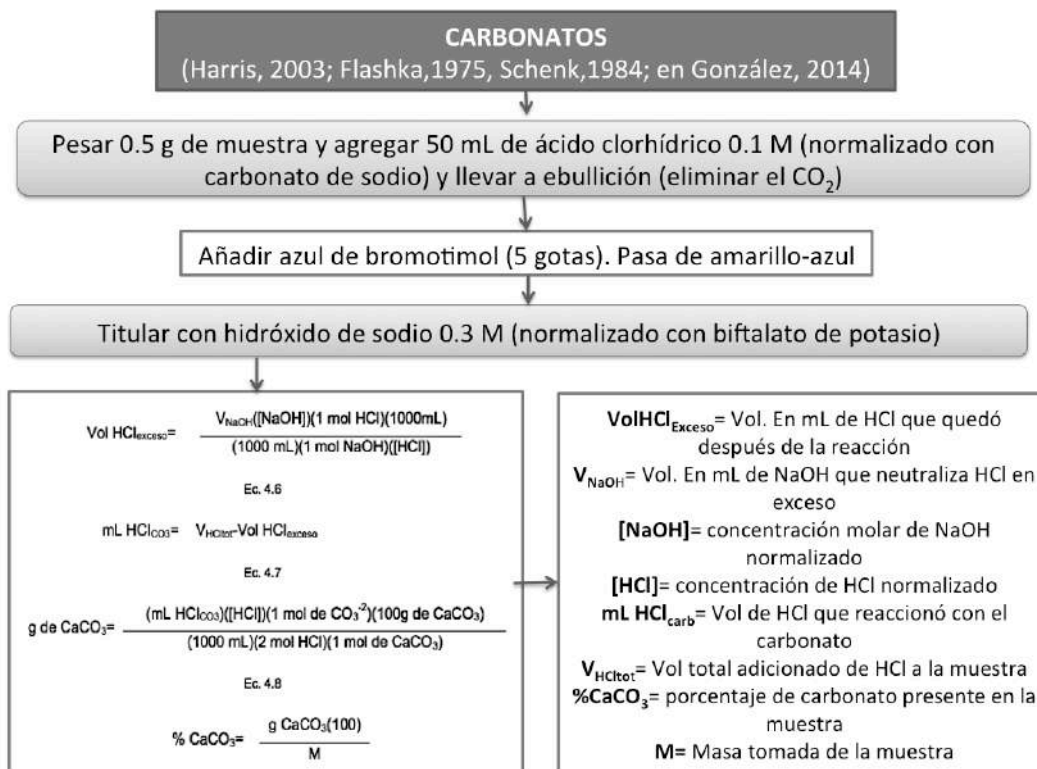
15.4.2 Diagrama de flujo para realizar Materia Orgánica



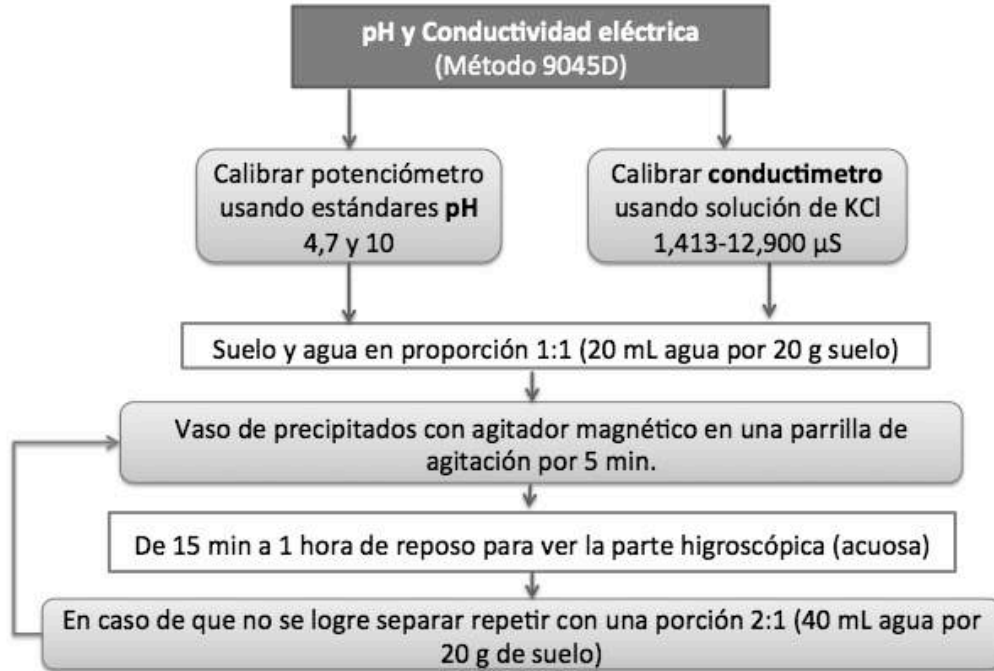
15.4.3 Diagrama de flujo para realizar Alcalinidad



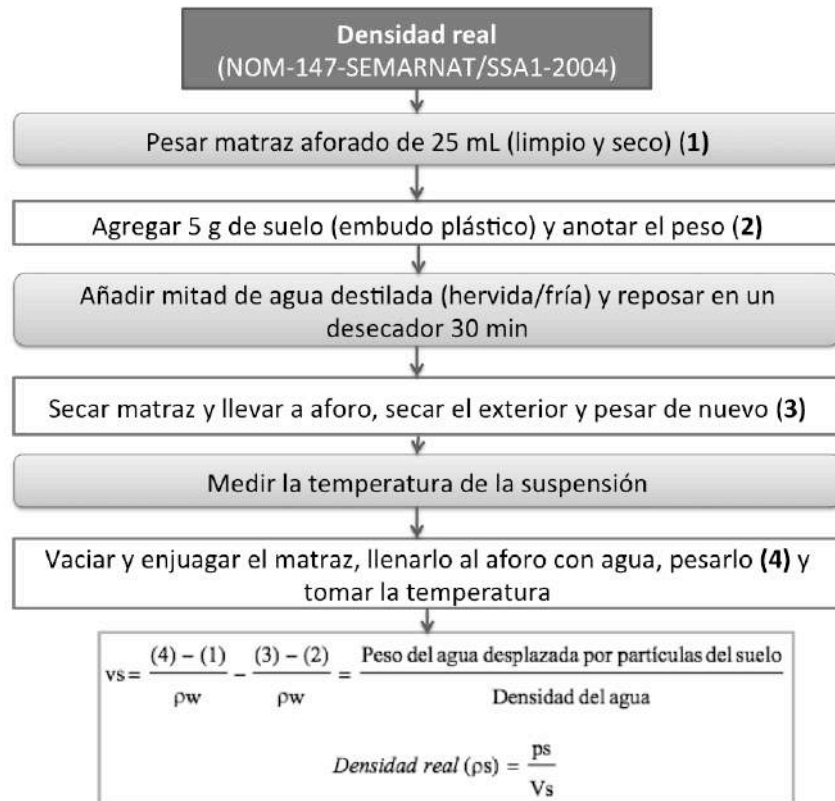
15.4.4 Diagrama de flujo para contenido total de carbonatos



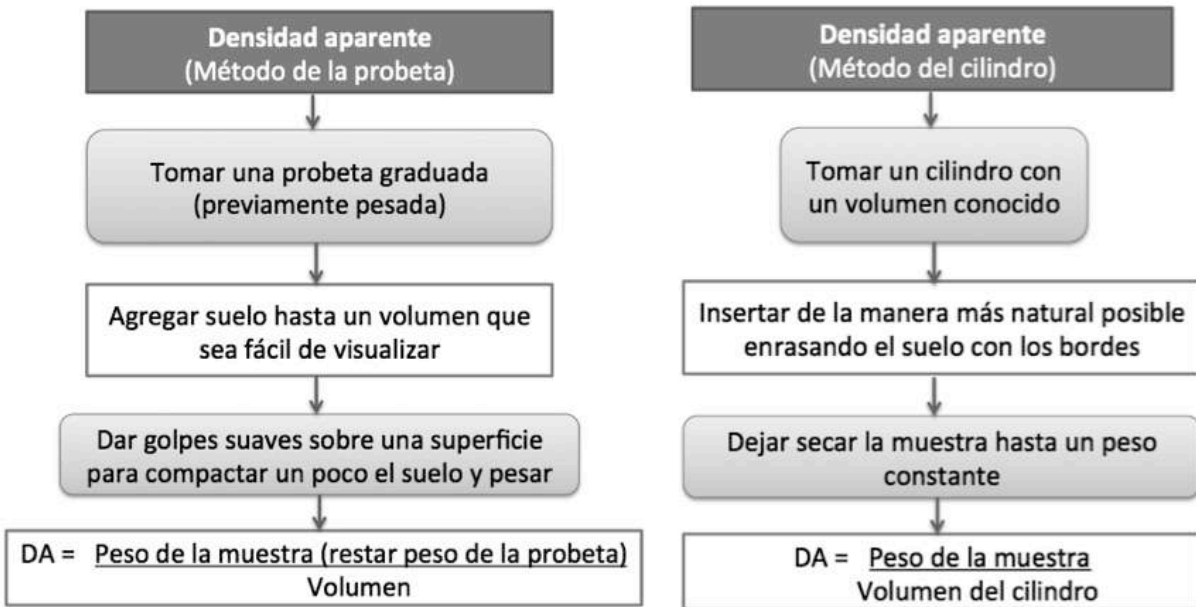
15.4.5 Diagrama de flujo para realizar análisis de pH y conductividad eléctrica



15.4.6 Diagrama de flujo para determinar densidad real



15.4.7 Diagrama de flujo para hacer densidad aparente



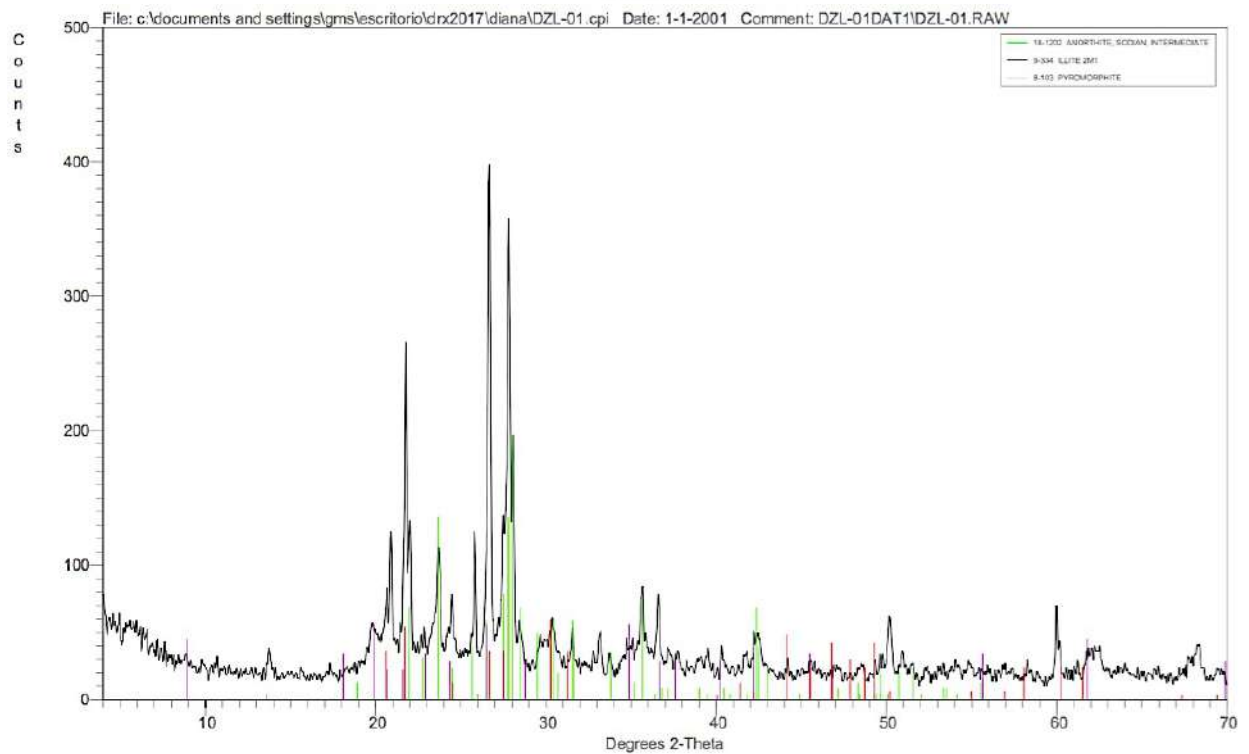
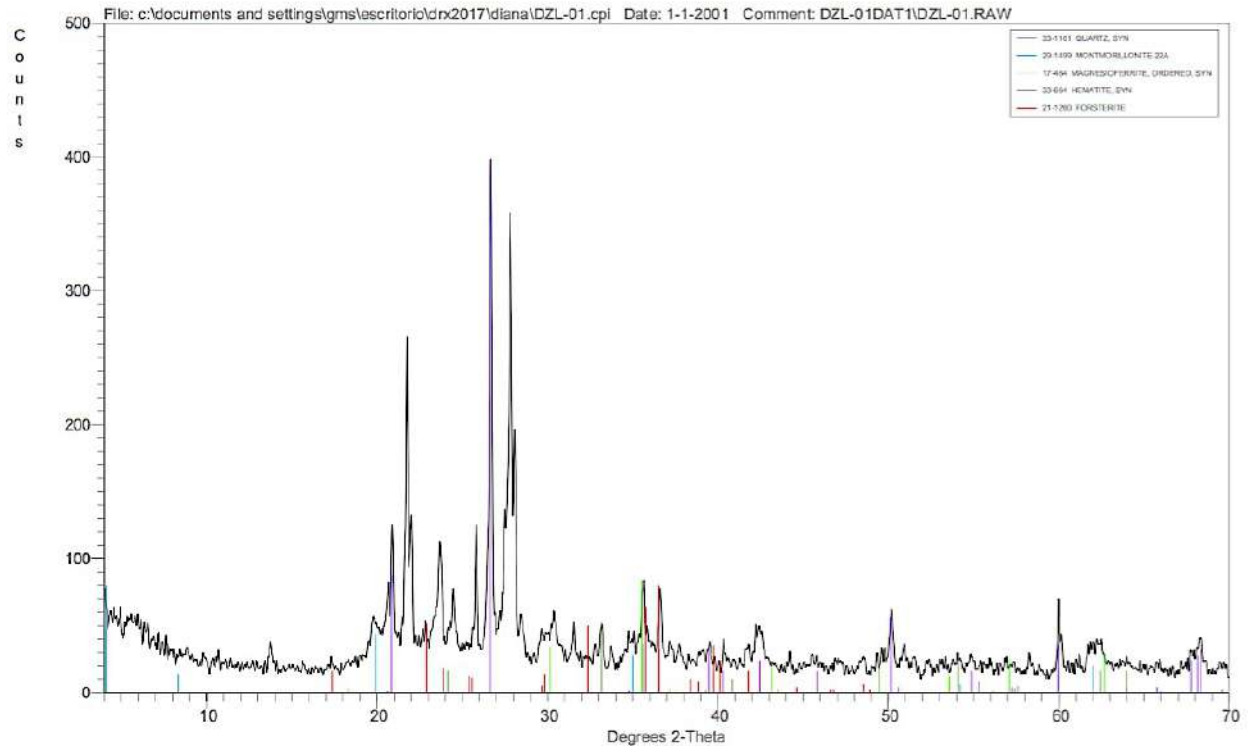
15.4.8 Diagrama de flujo para realizar digestión en horno de microondas



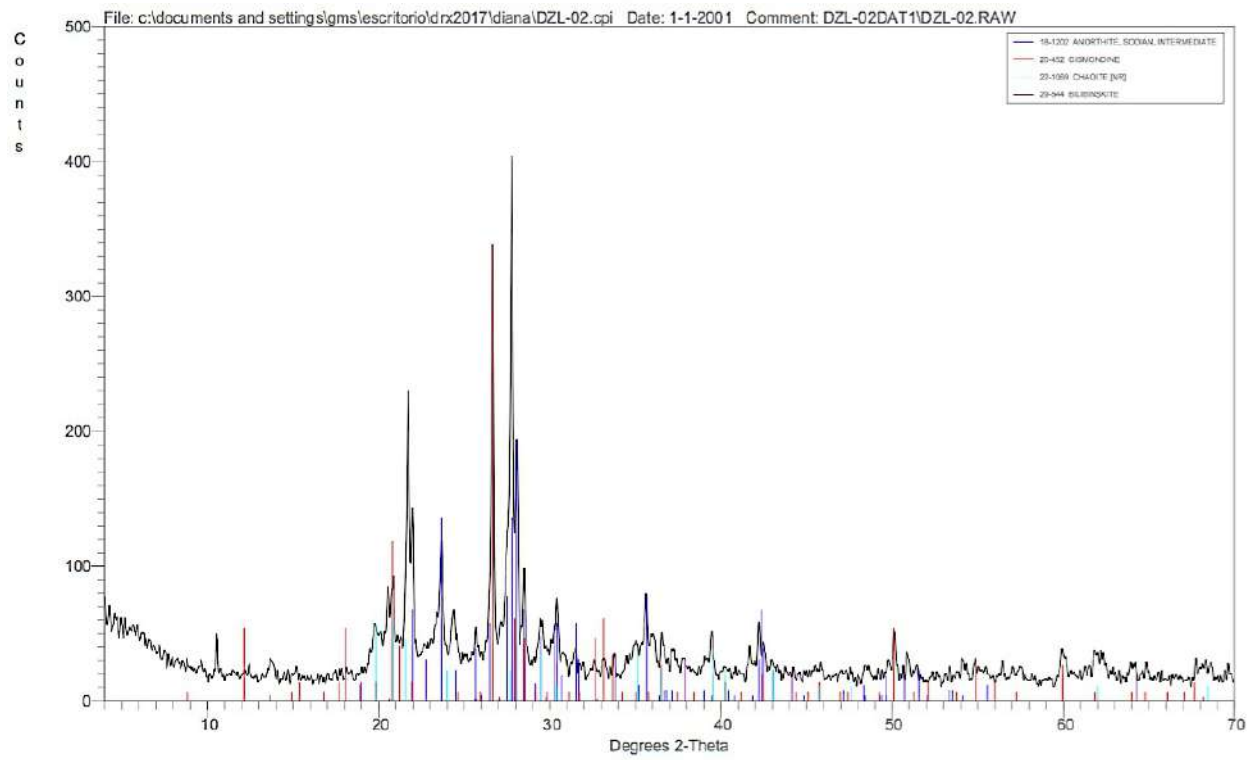
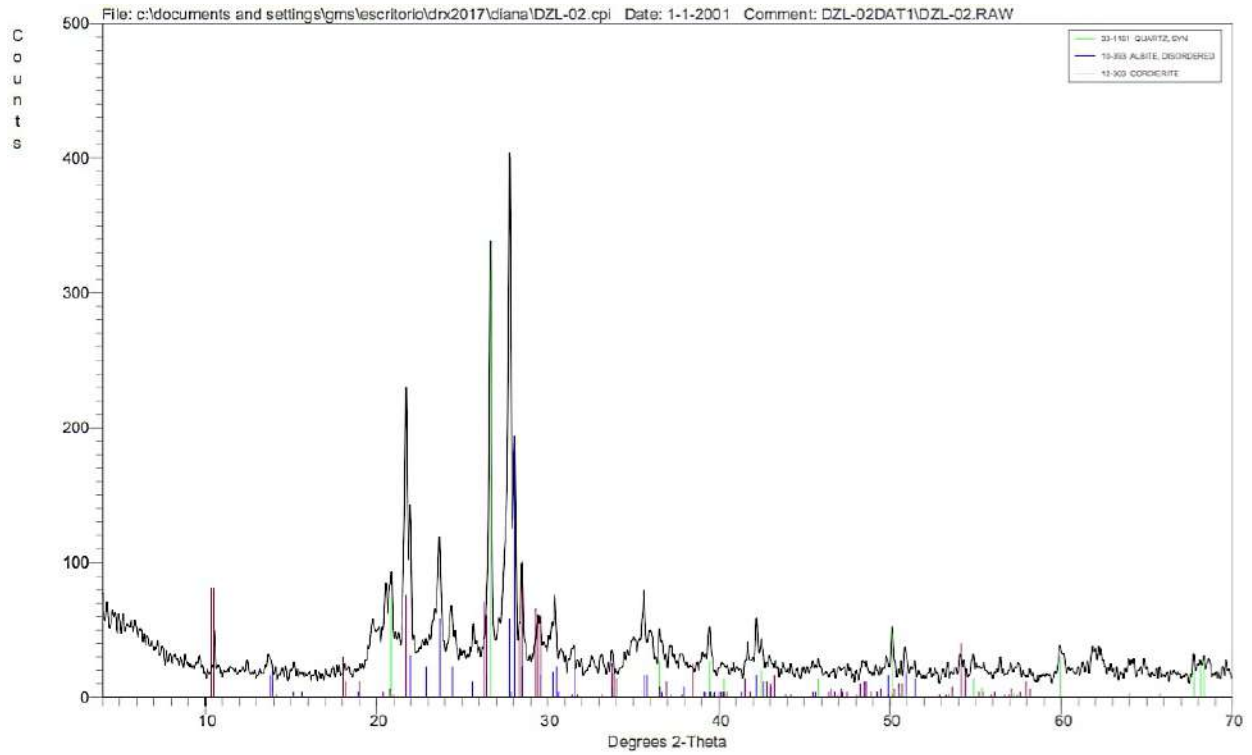
15.5 Diffractogramas

15.5.1 Zim 1

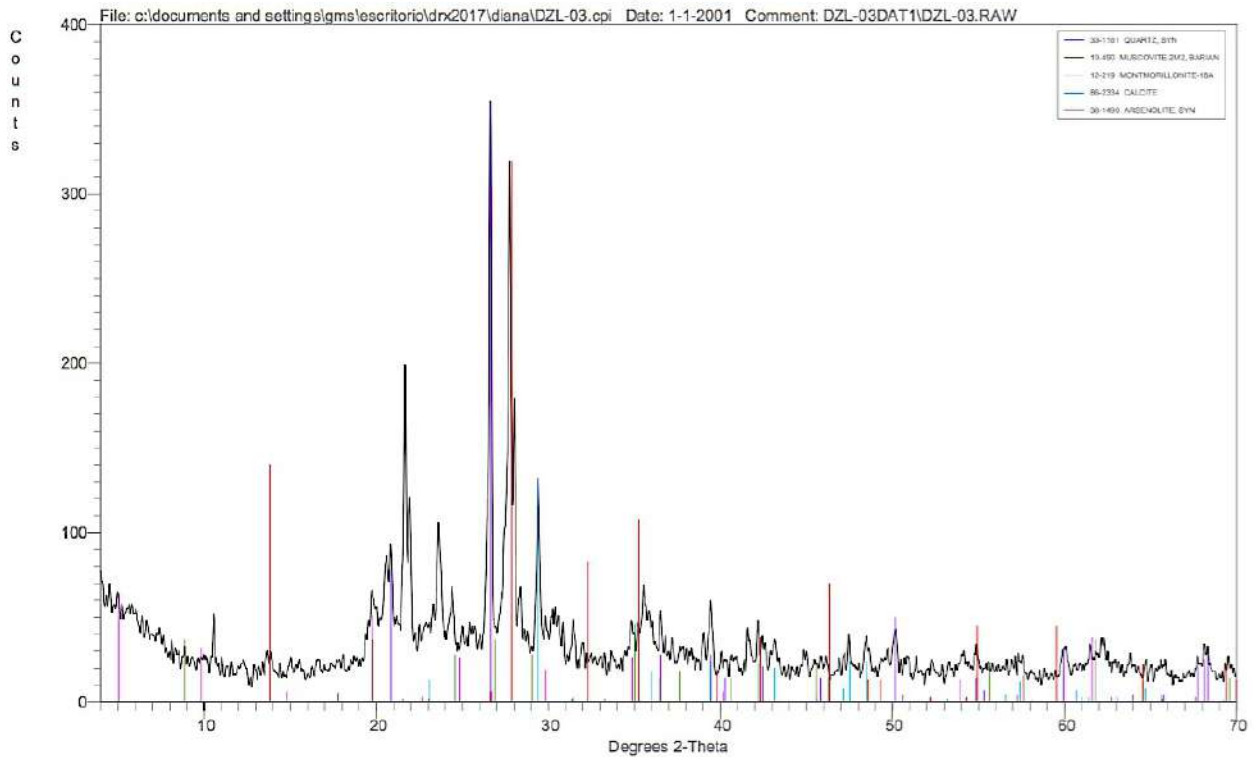
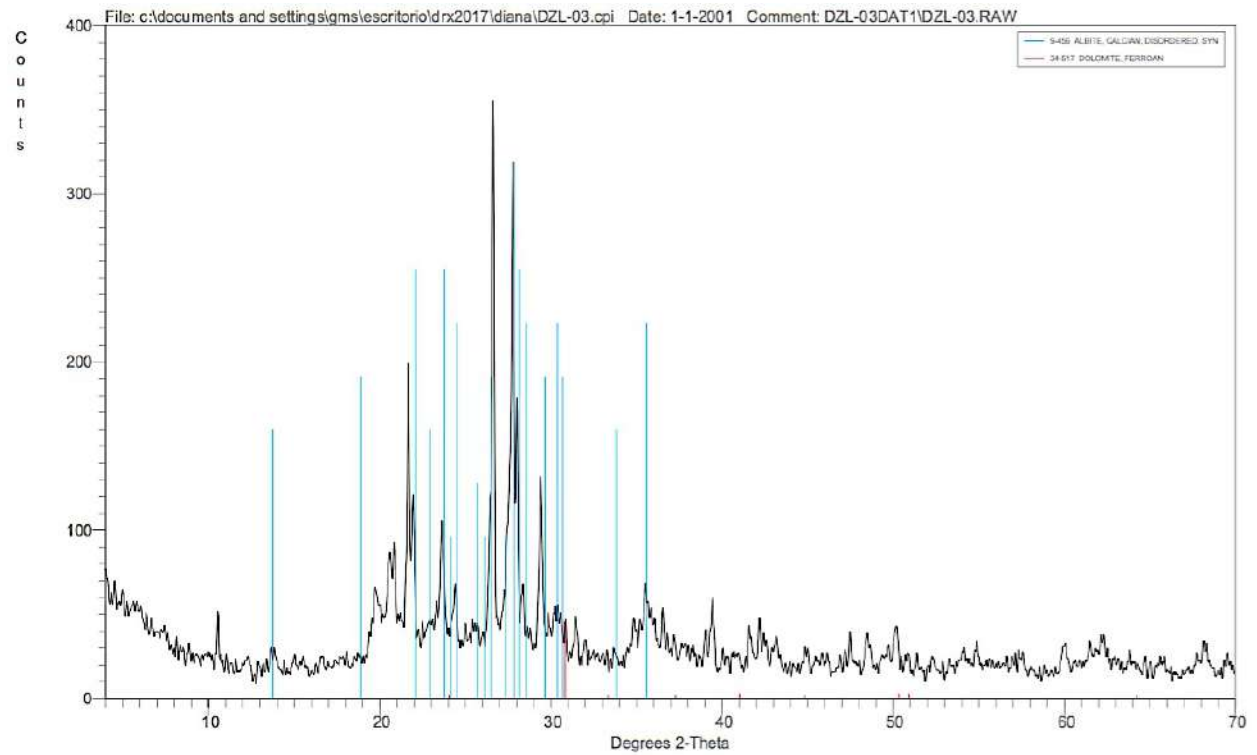
15.5.1.1 *Horizonte 1*



15.5.1.2 Horizonte 2

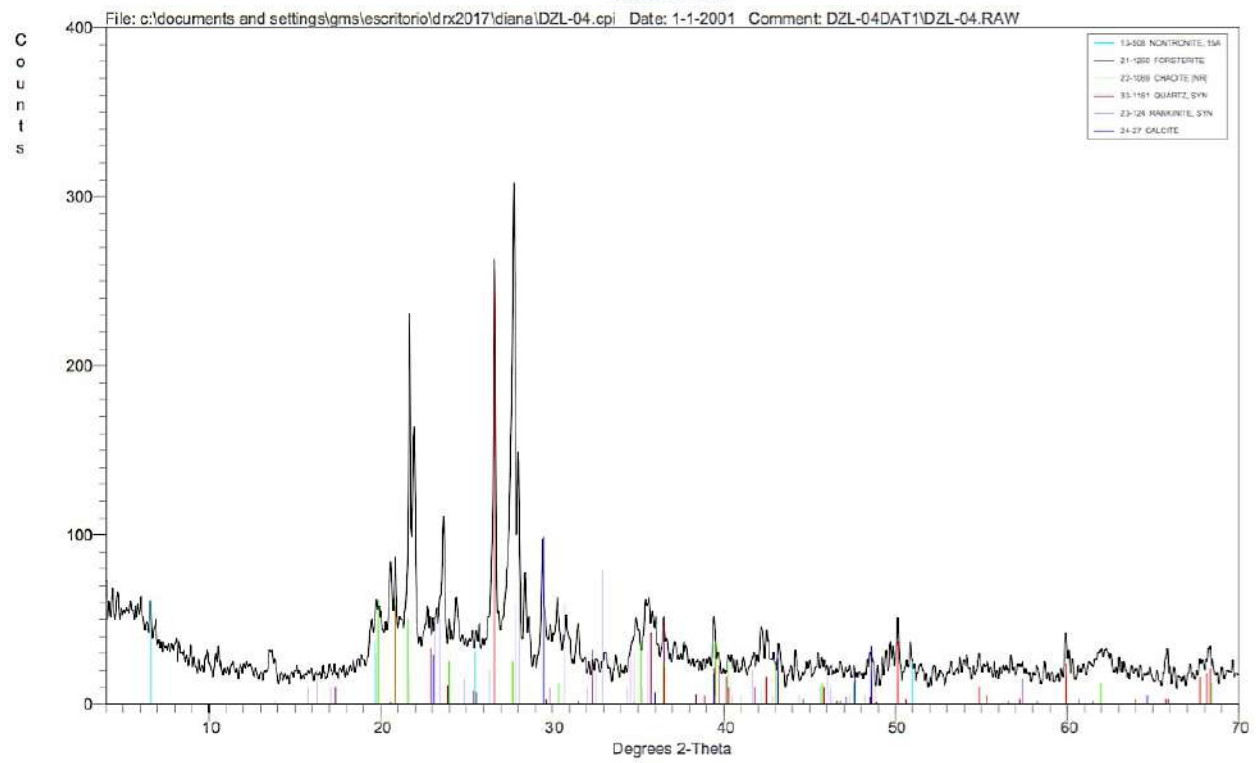
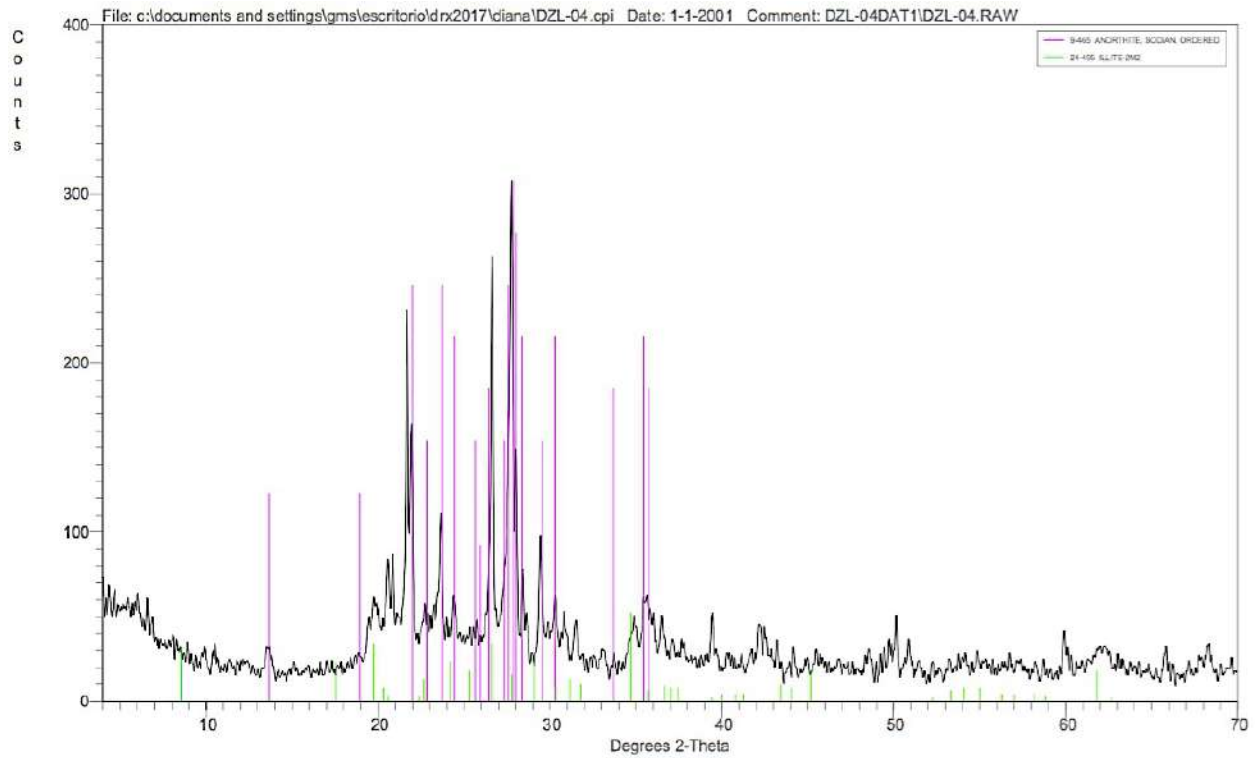


15.5.1.3 *Horizonte 3*

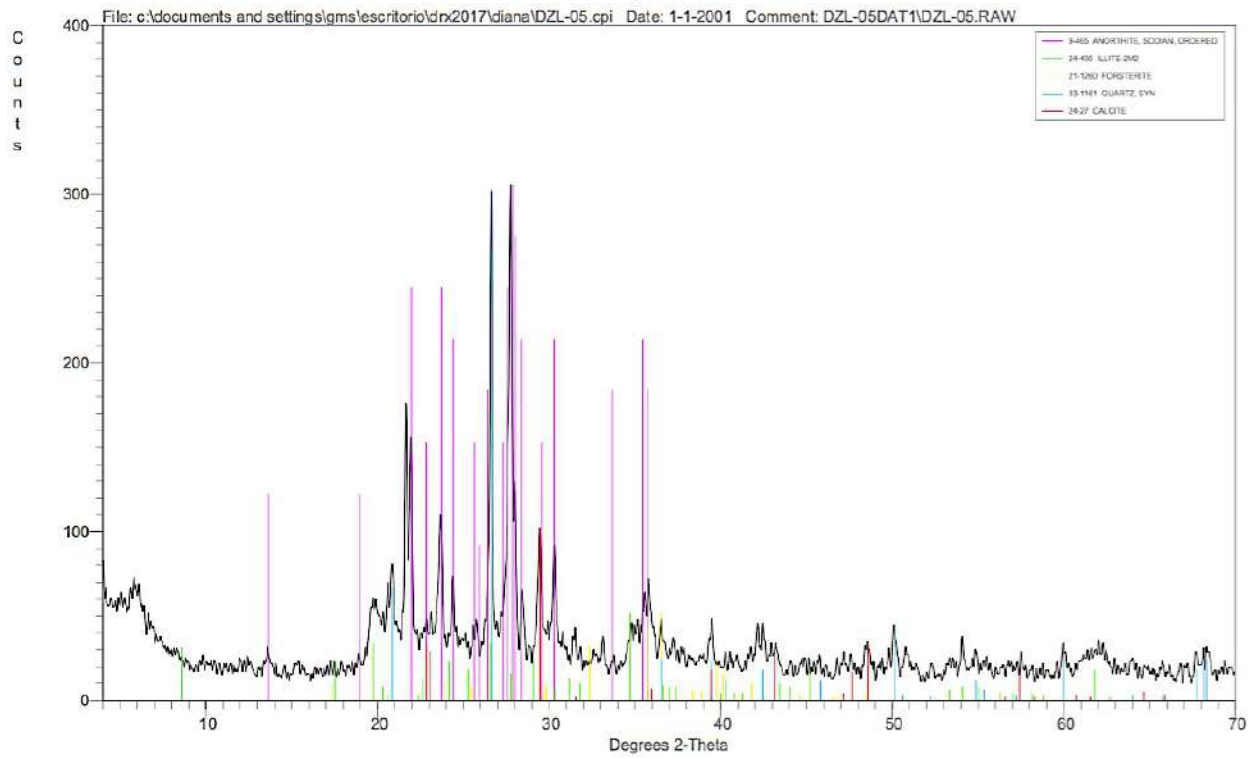
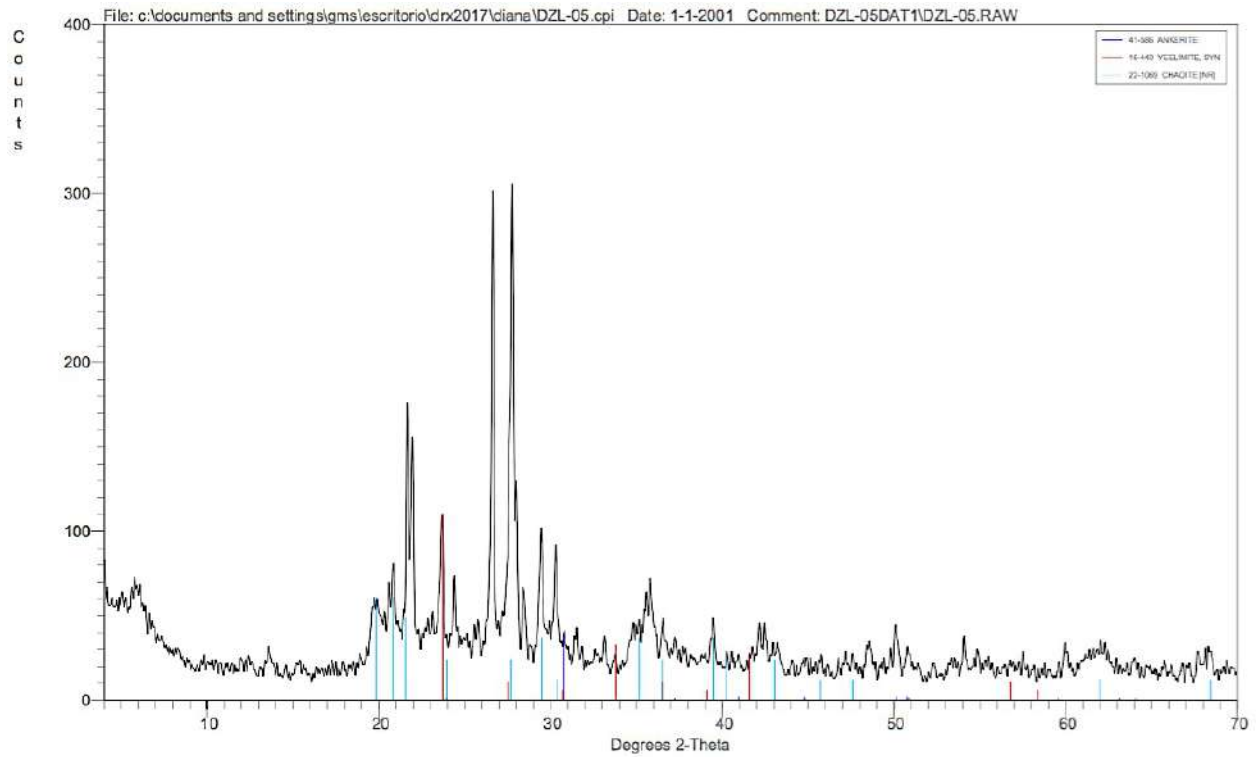


15.5.2 Zim 2

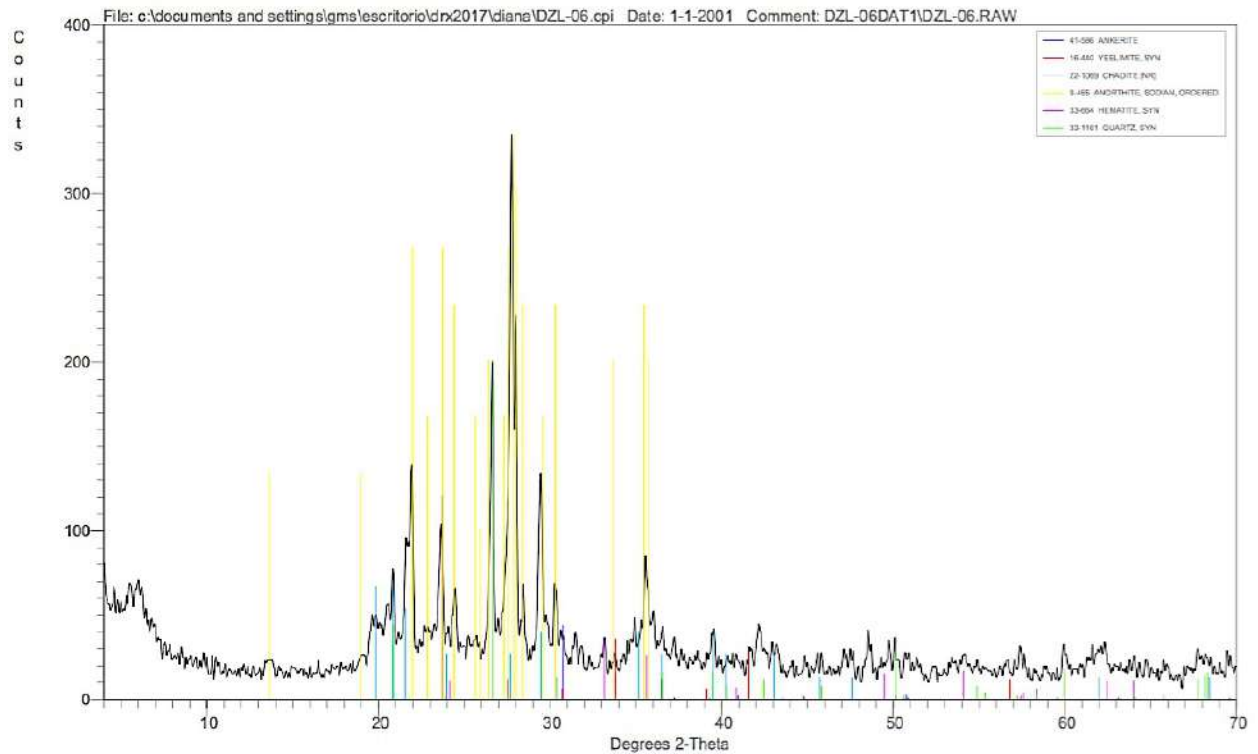
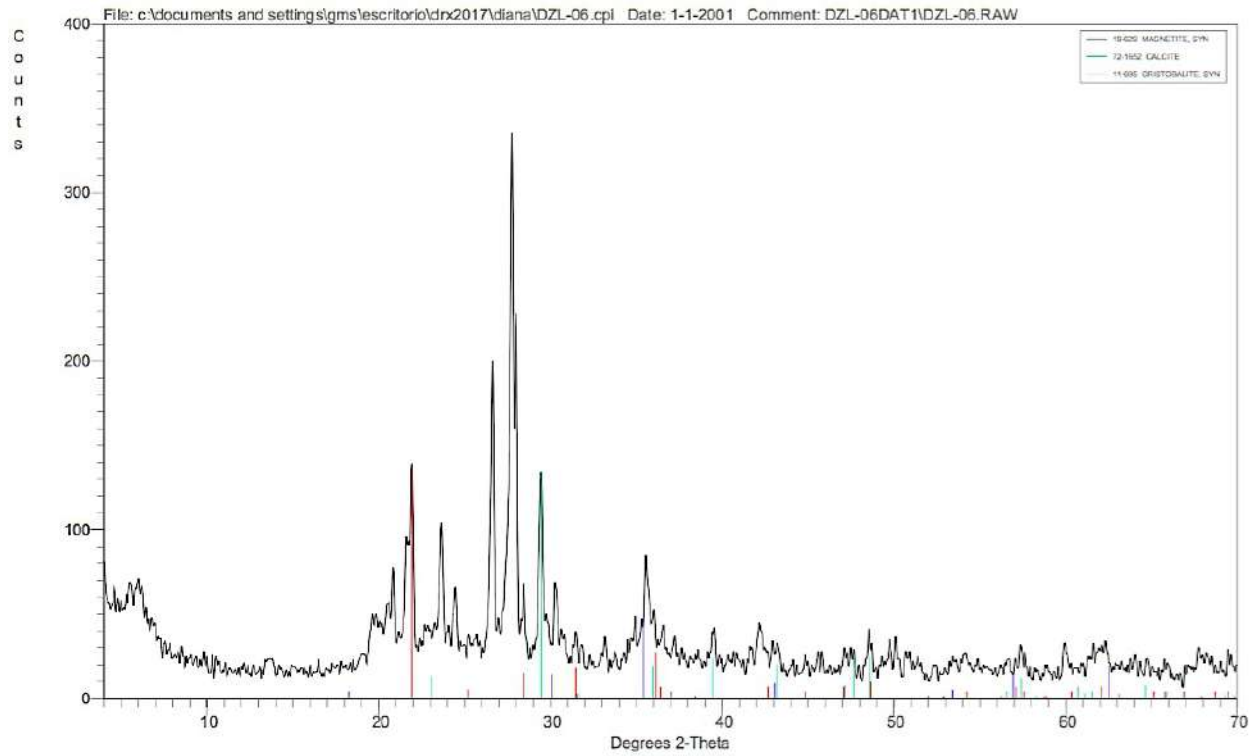
15.5.2.1 Horizonte 1



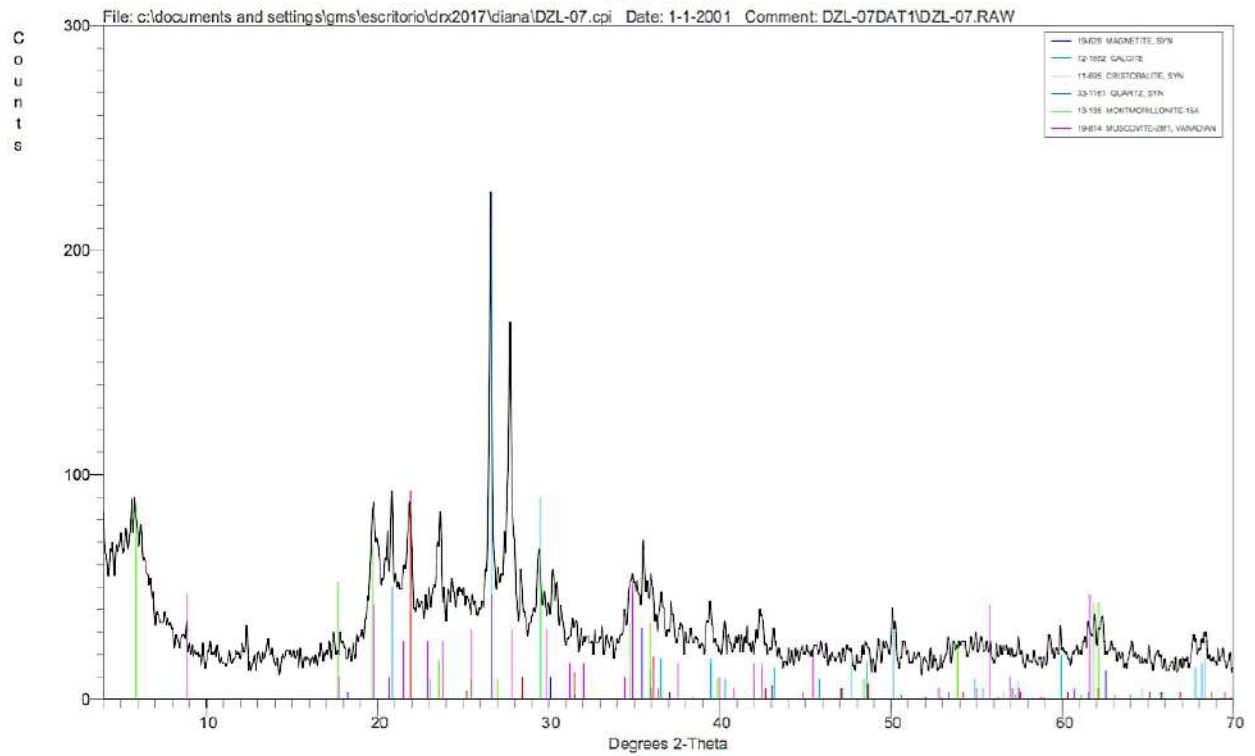
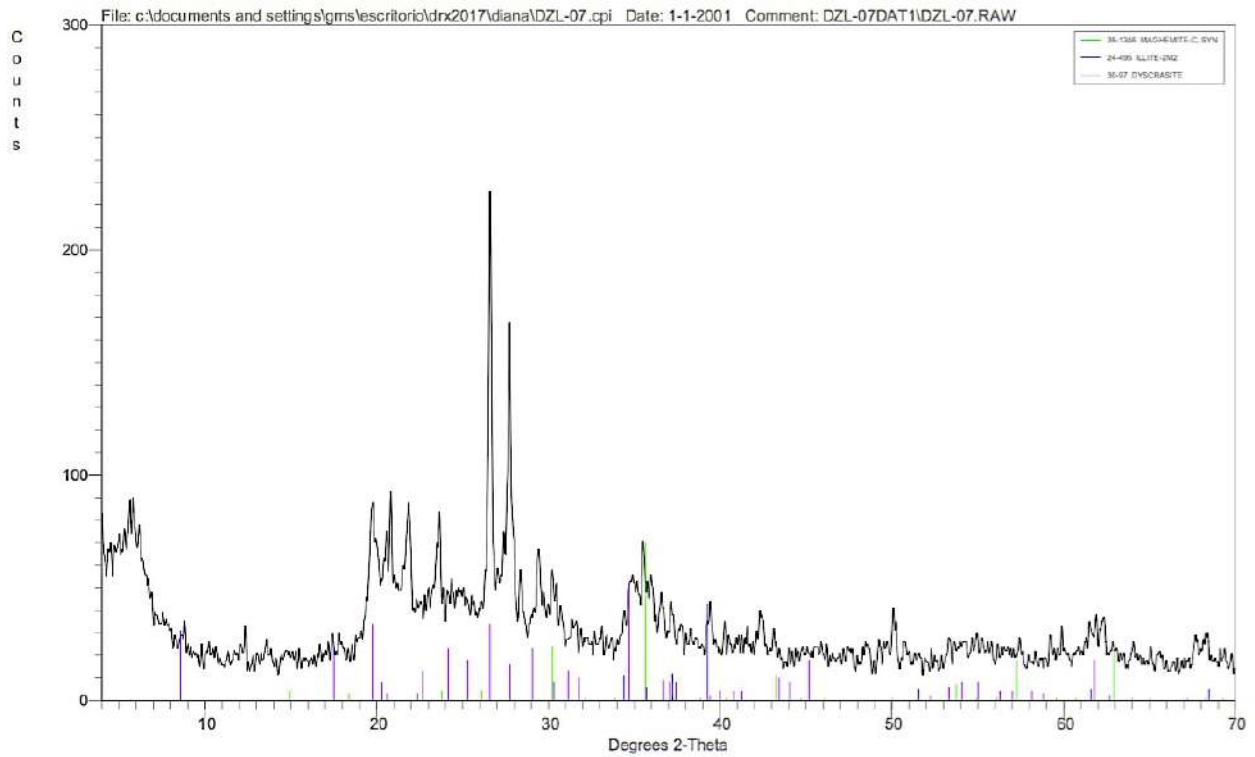
15.5.2.2 Horizonte 2



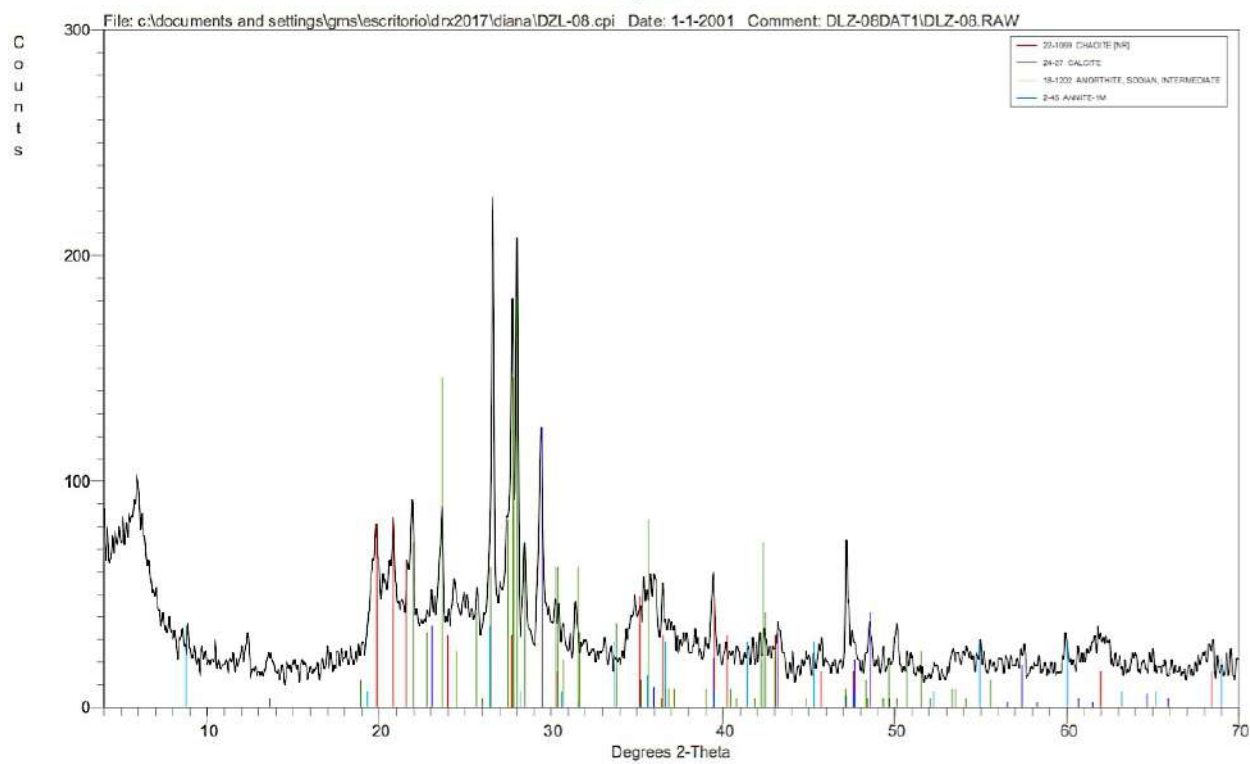
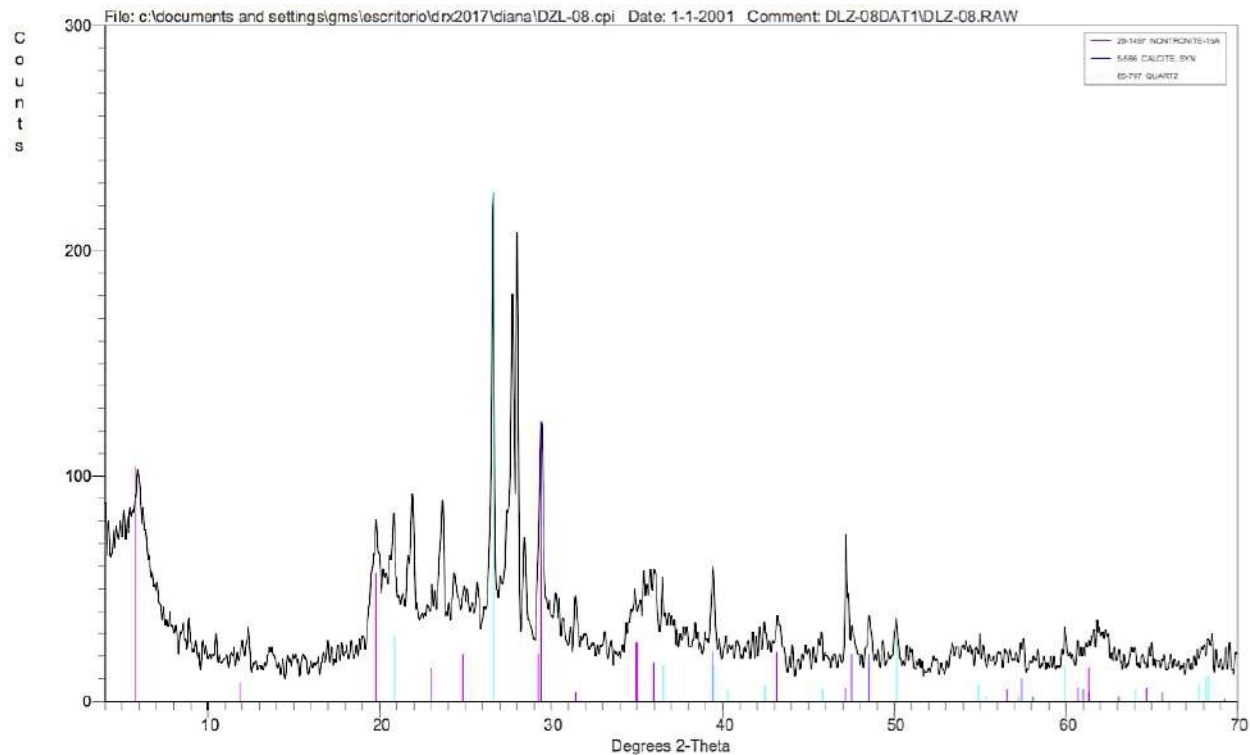
15.5.2.3 Horizonte 3

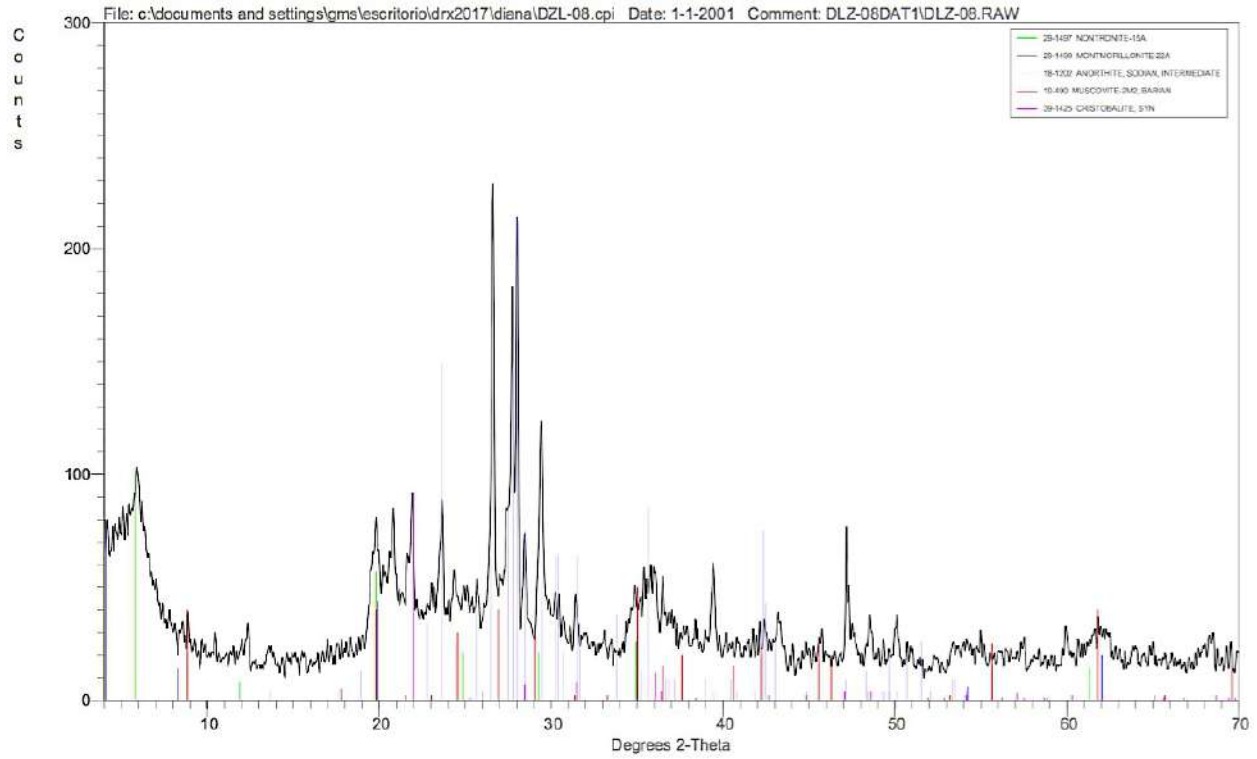


15.5.2.4 Horizonte 4

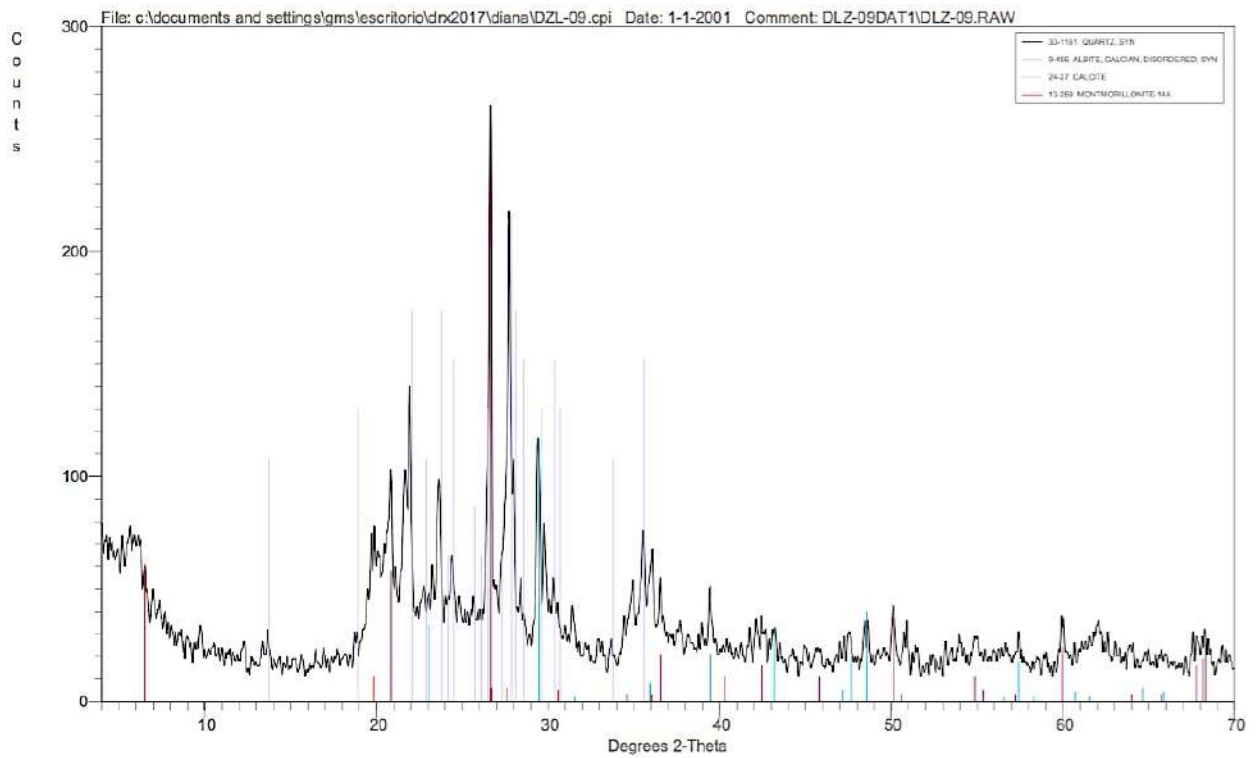


15.5.2.5 *Horizonte 5*

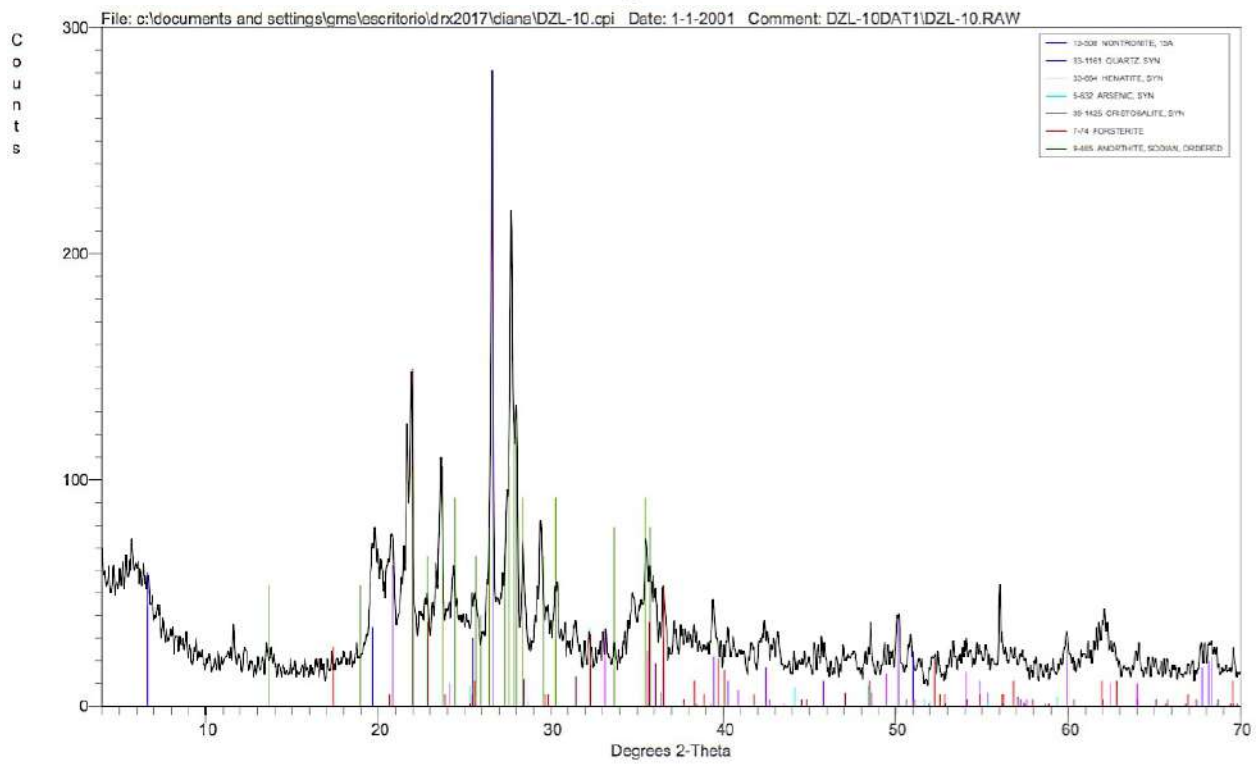
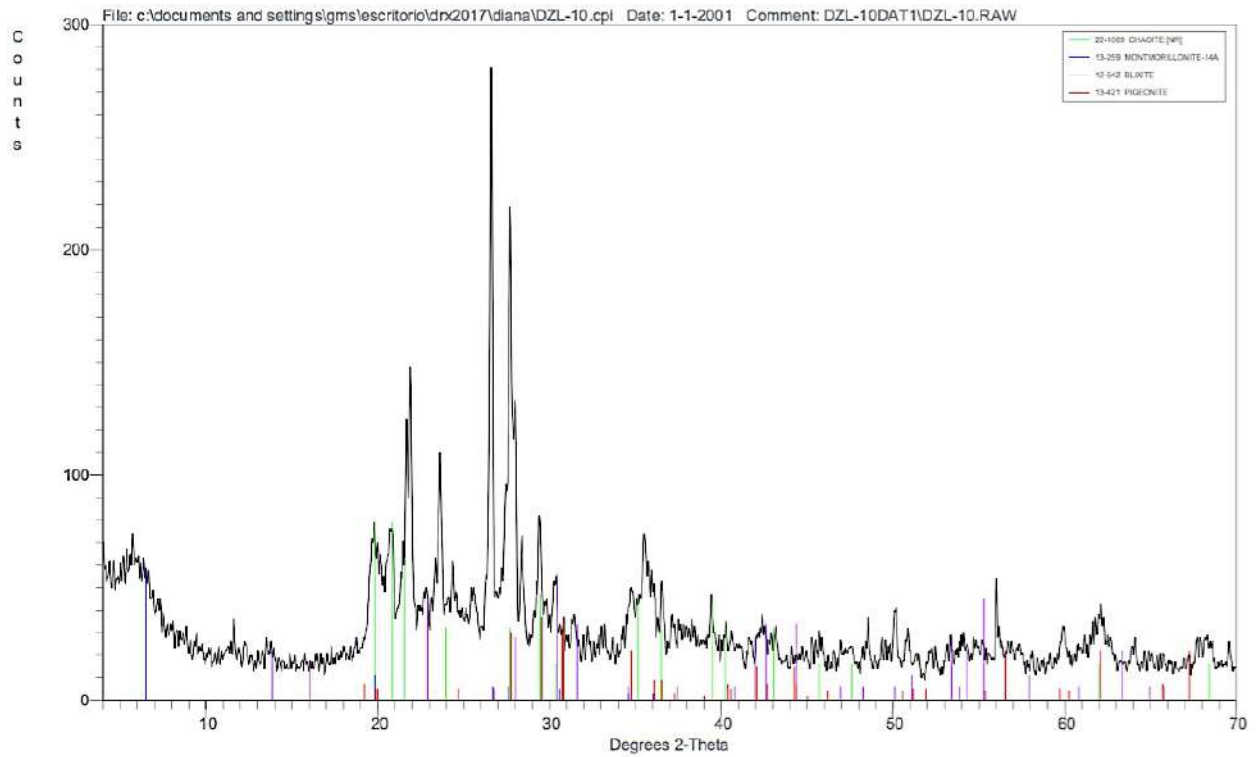




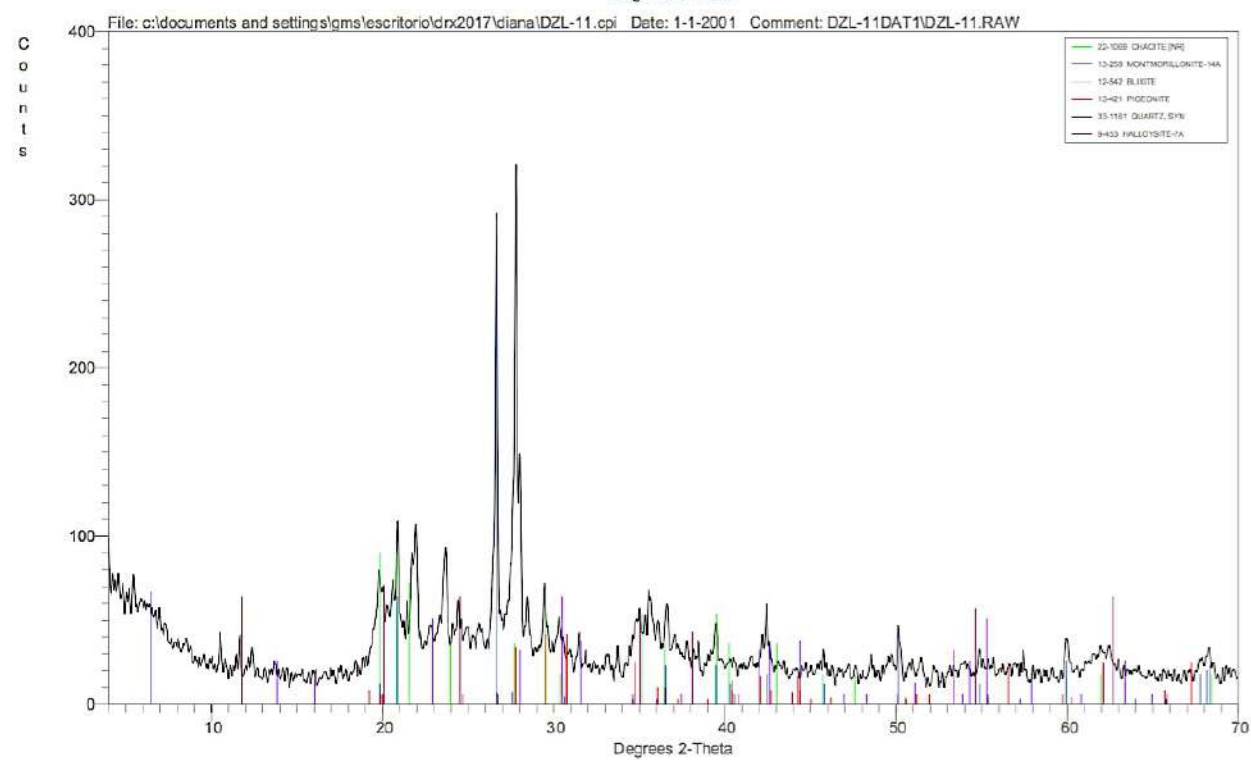
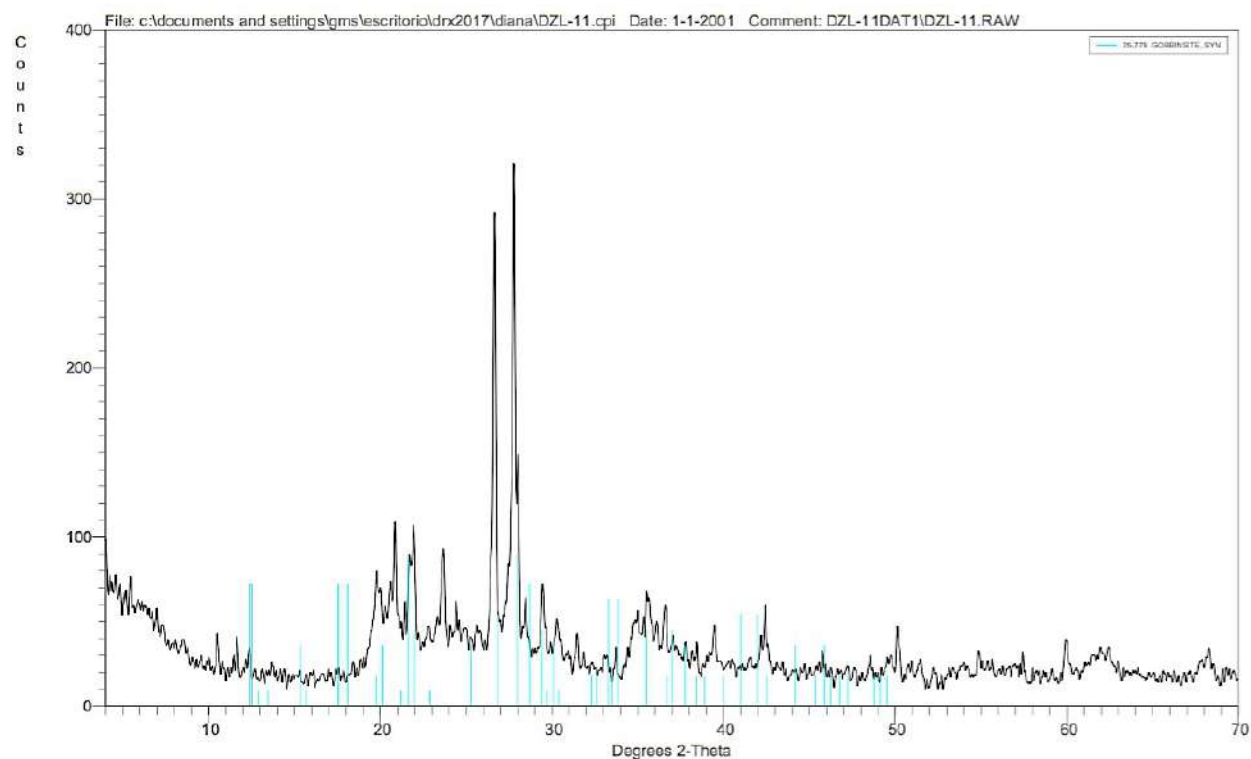
15.5.2.6 *Horizonte 6*



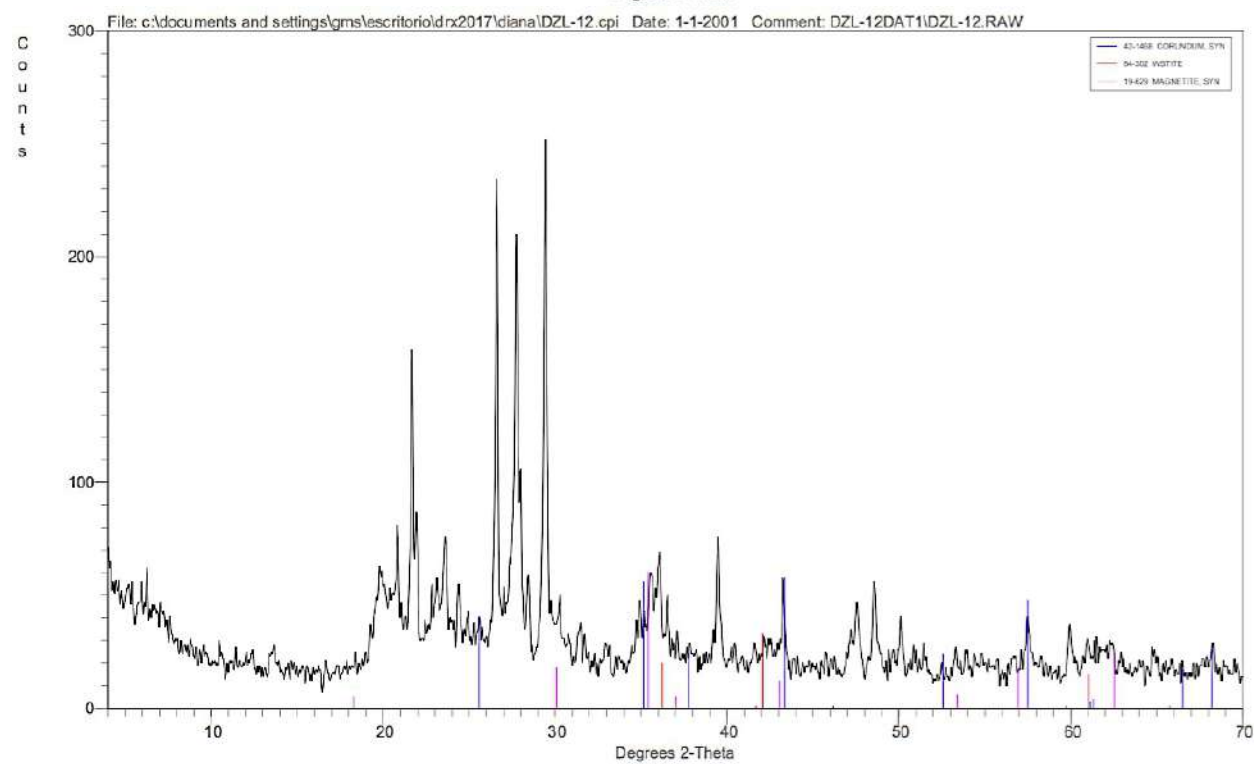
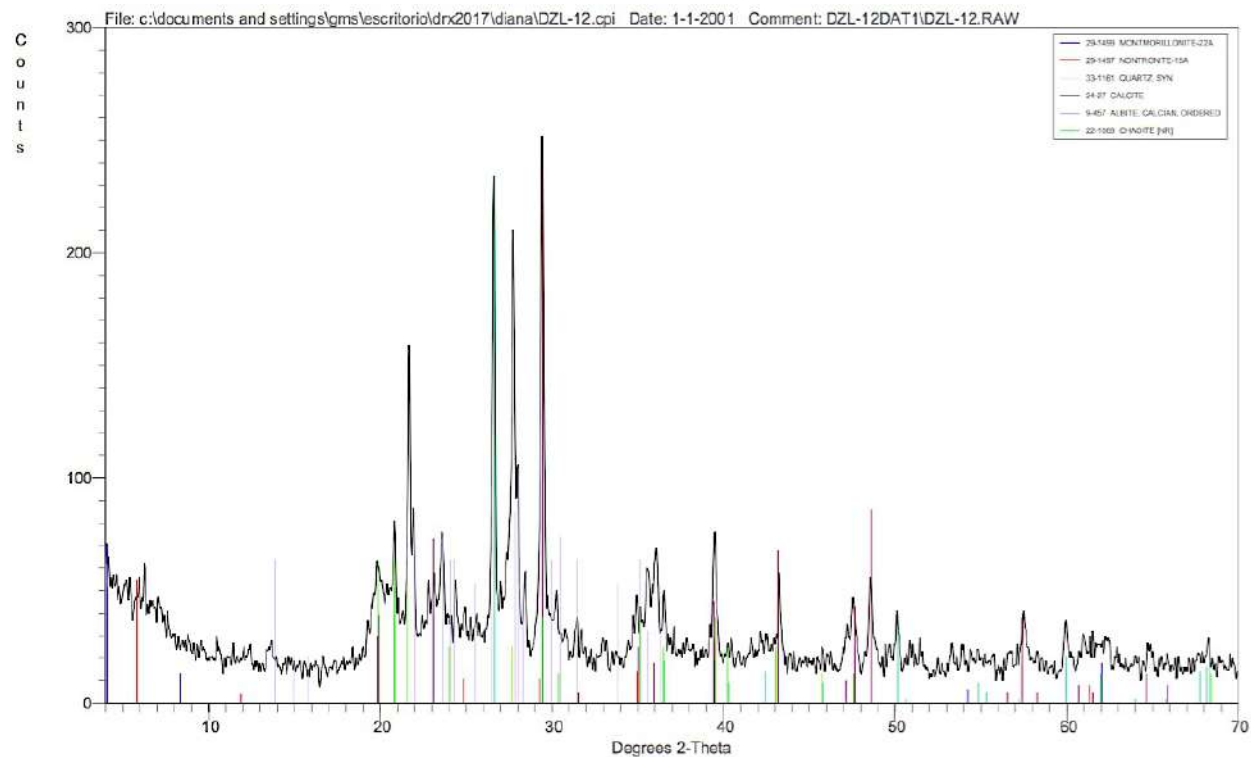
15.5.2.7 *Horizonte 7*



15.5.2.8 Horizonte 8

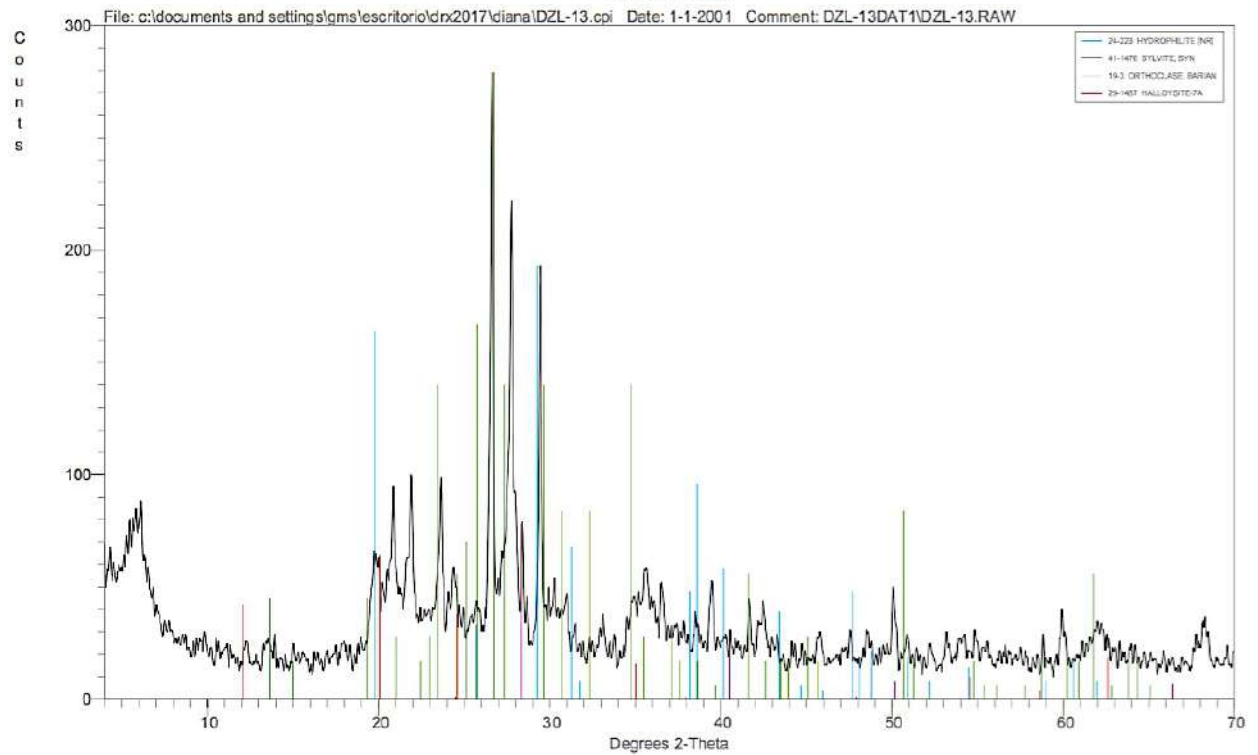
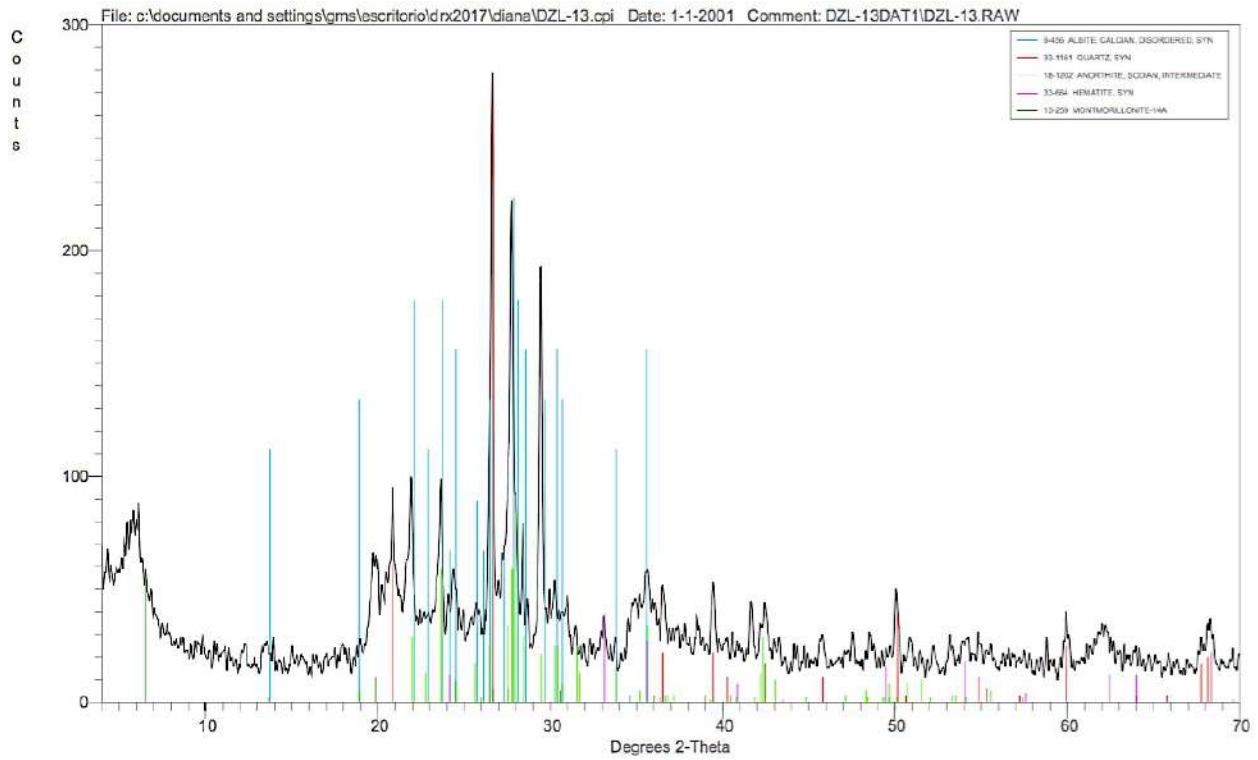


15.5.2.9 Horizonte 9

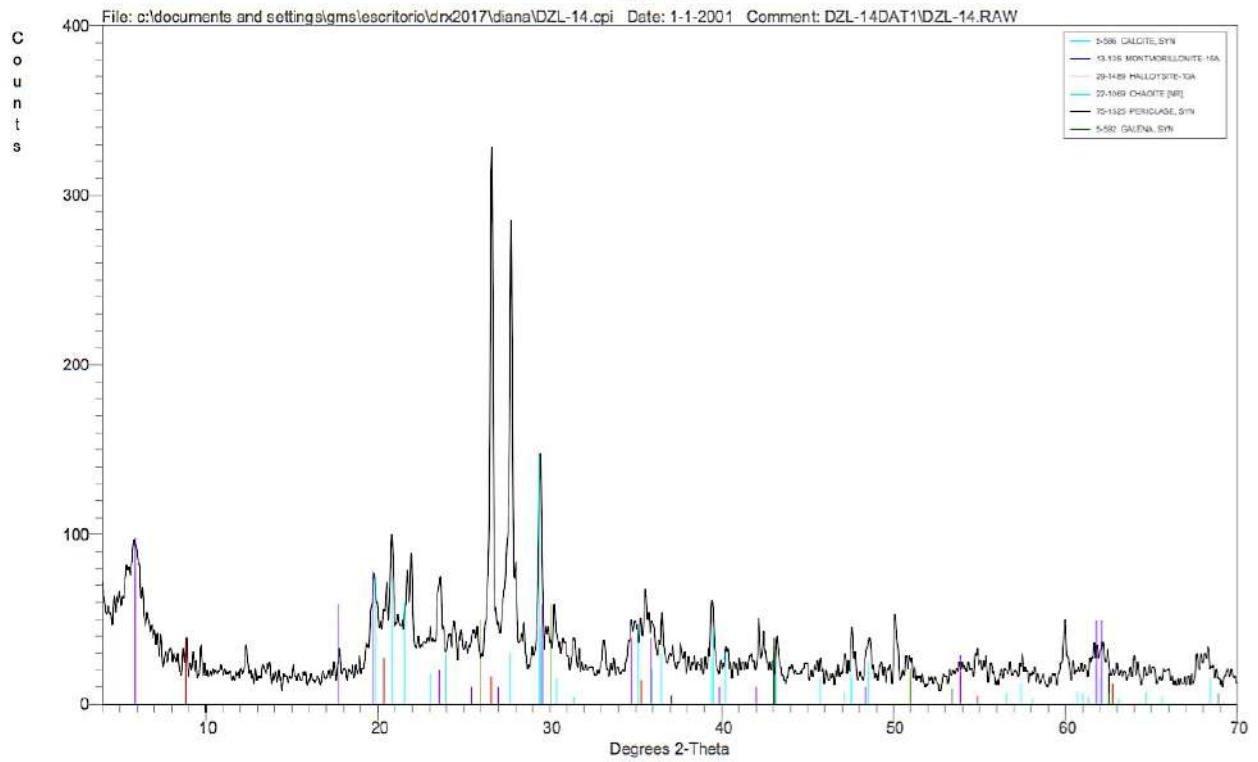
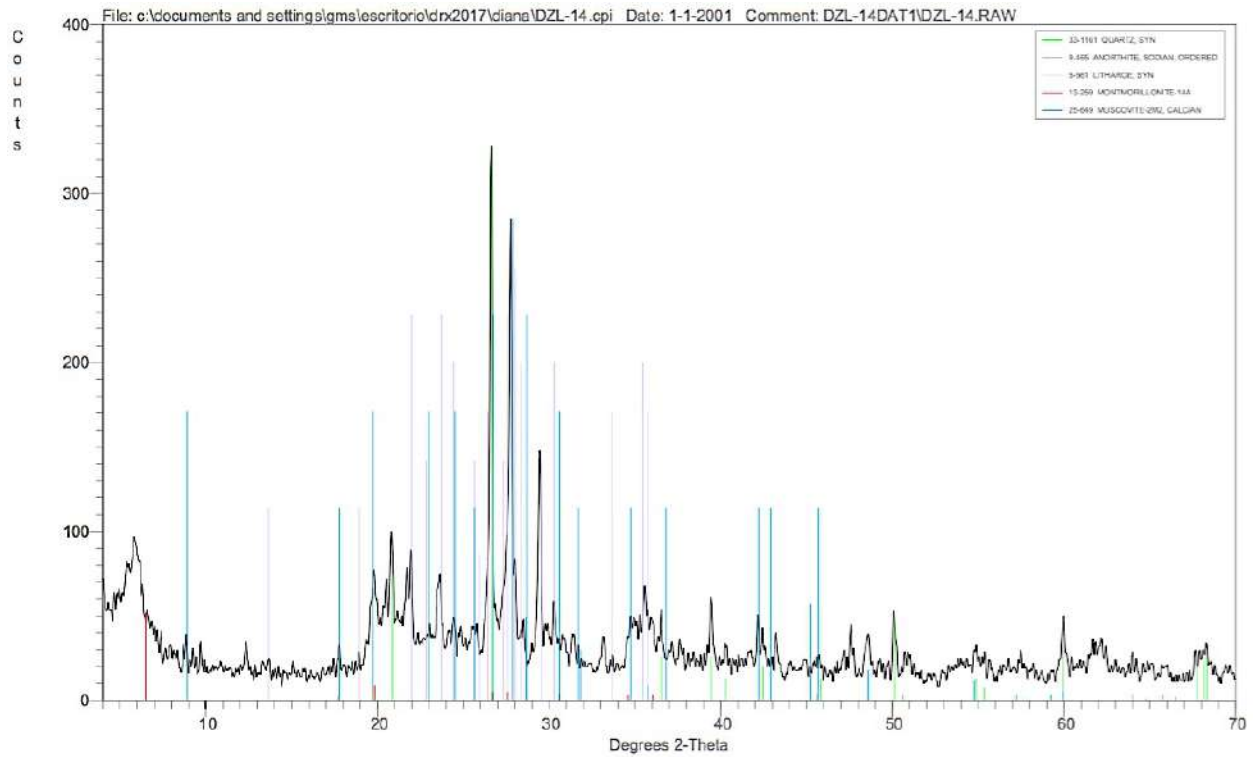


15.5.3 Zim 3

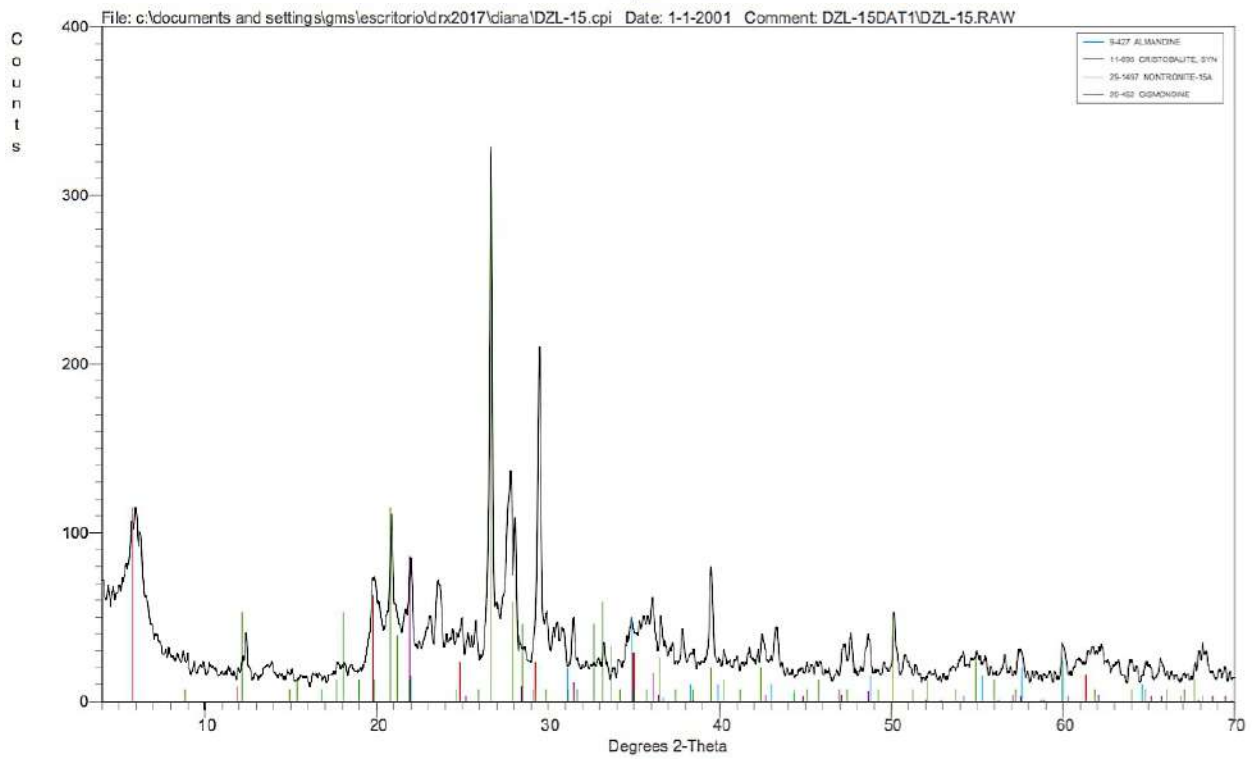
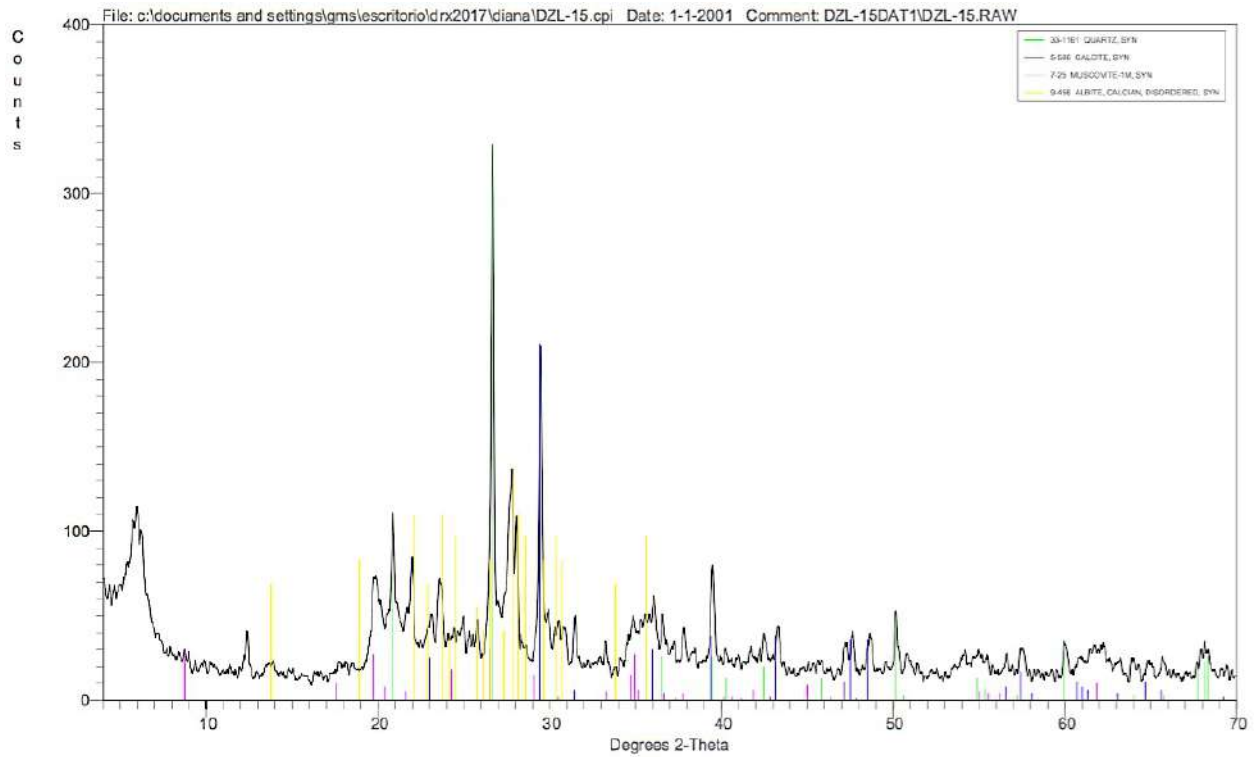
15.5.3.1 Horizonte 1



15.5.3.2 Horizonte 2

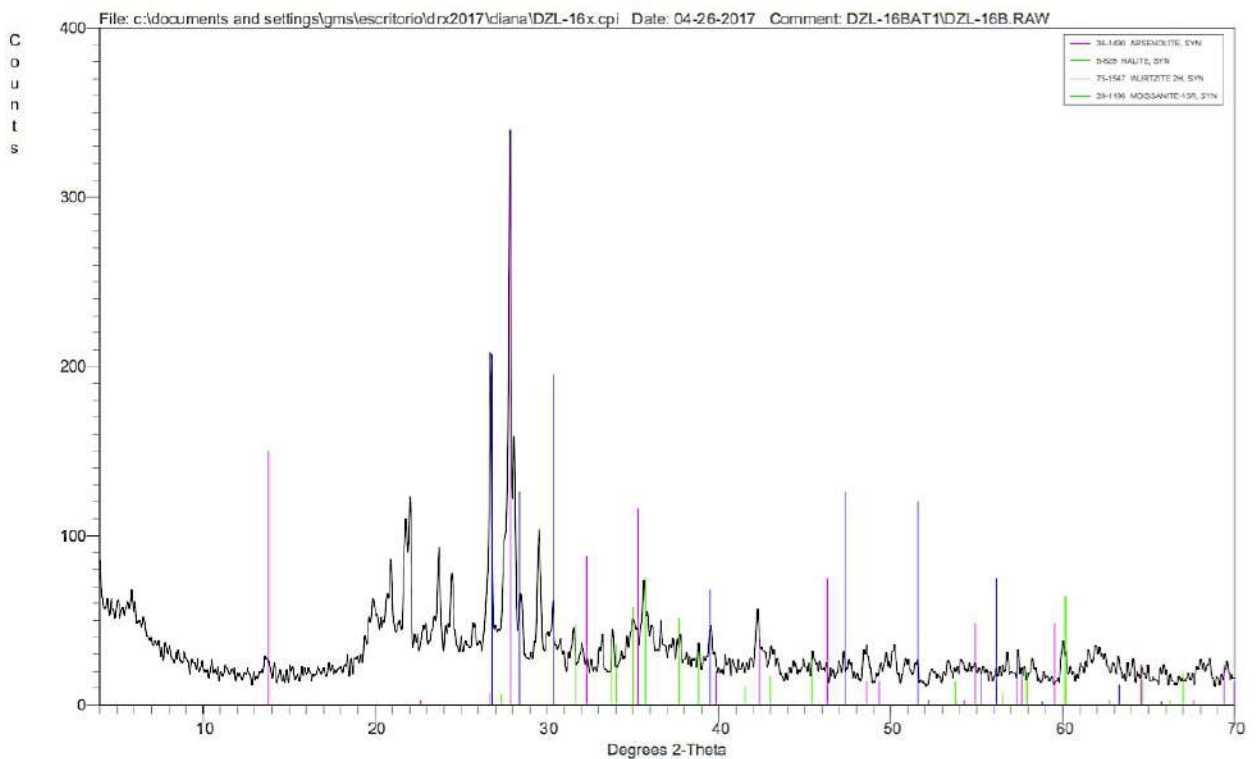
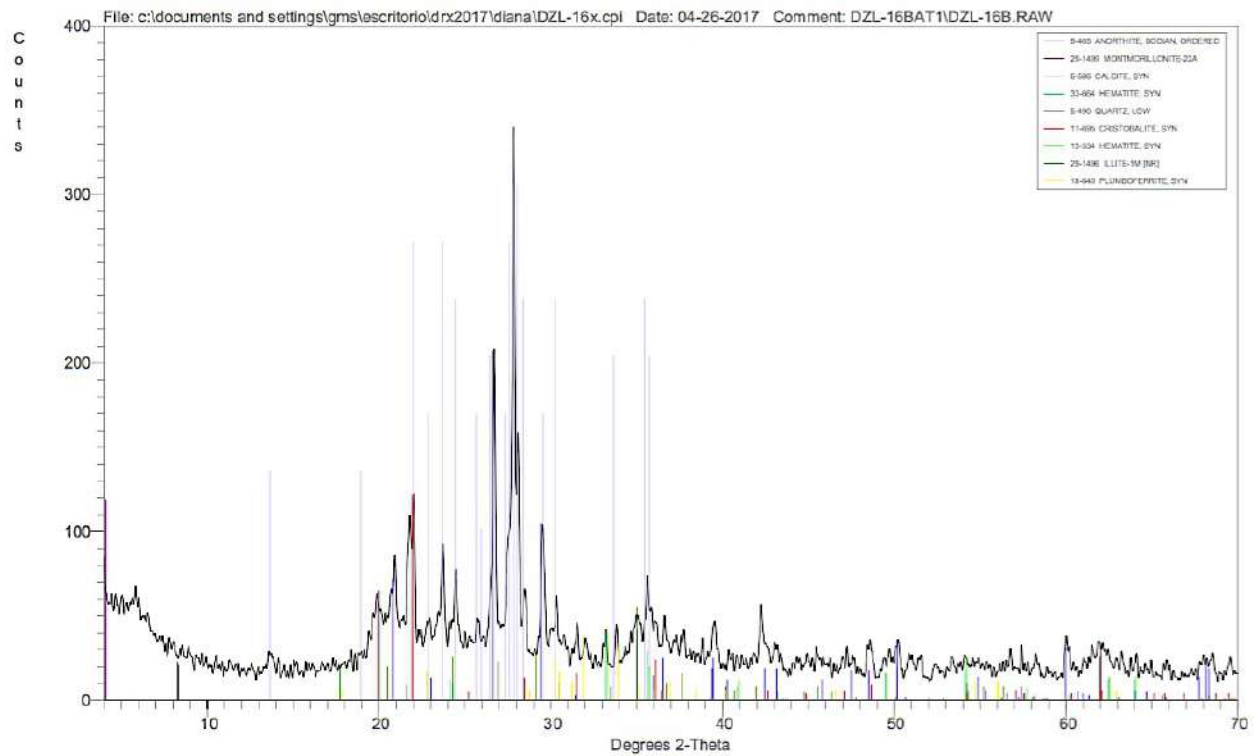


15.5.3.3 Horizonte 3

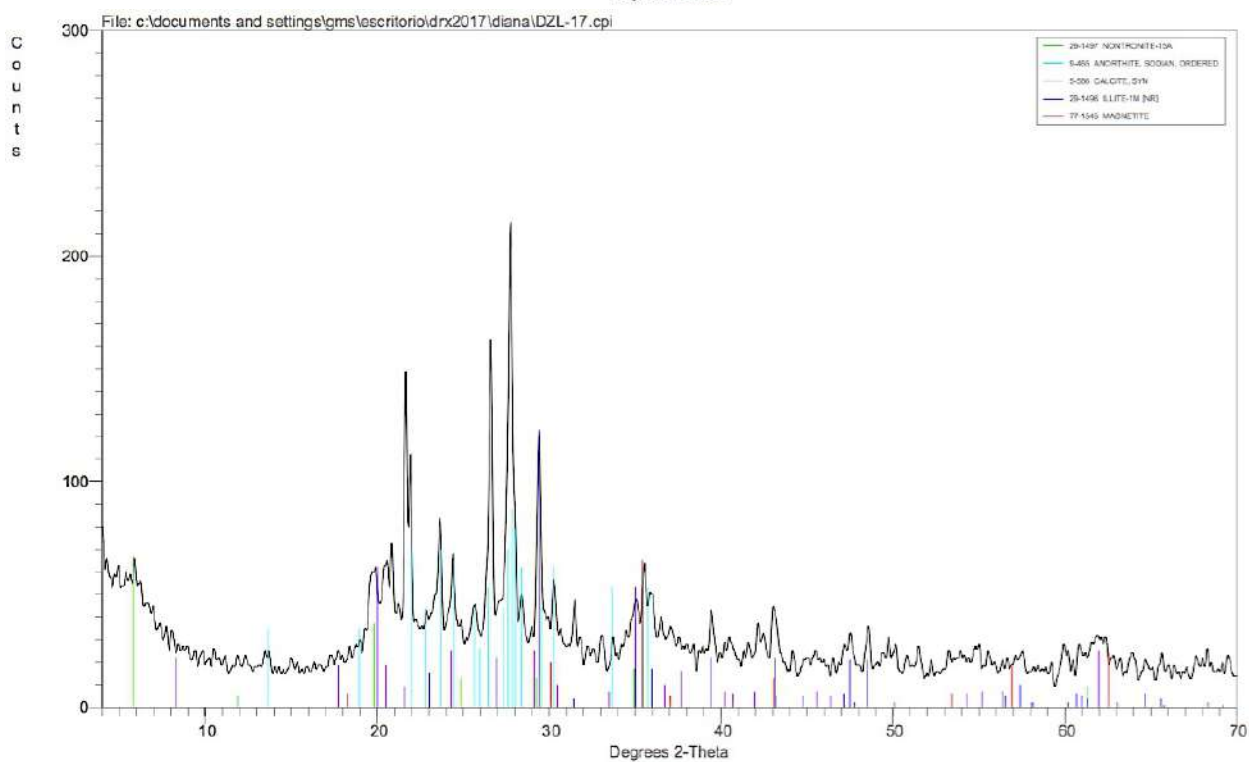
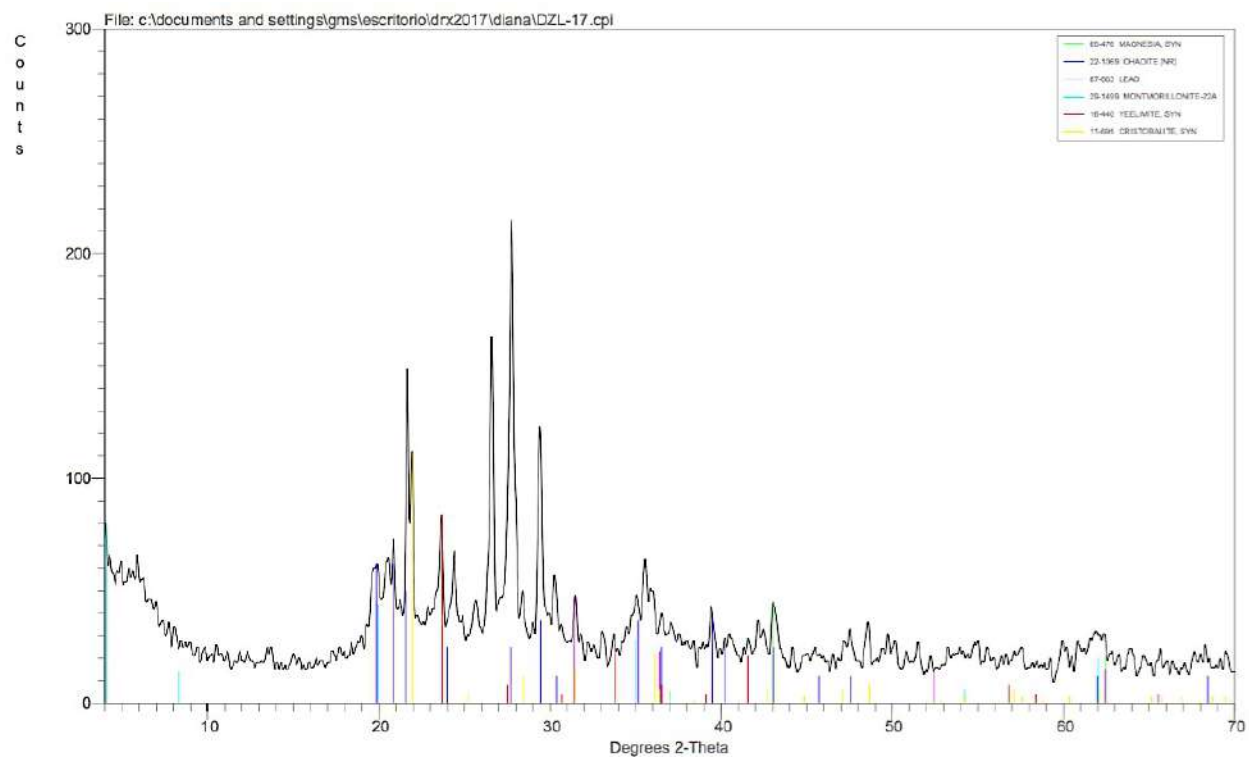


15.5.4 Zim 4

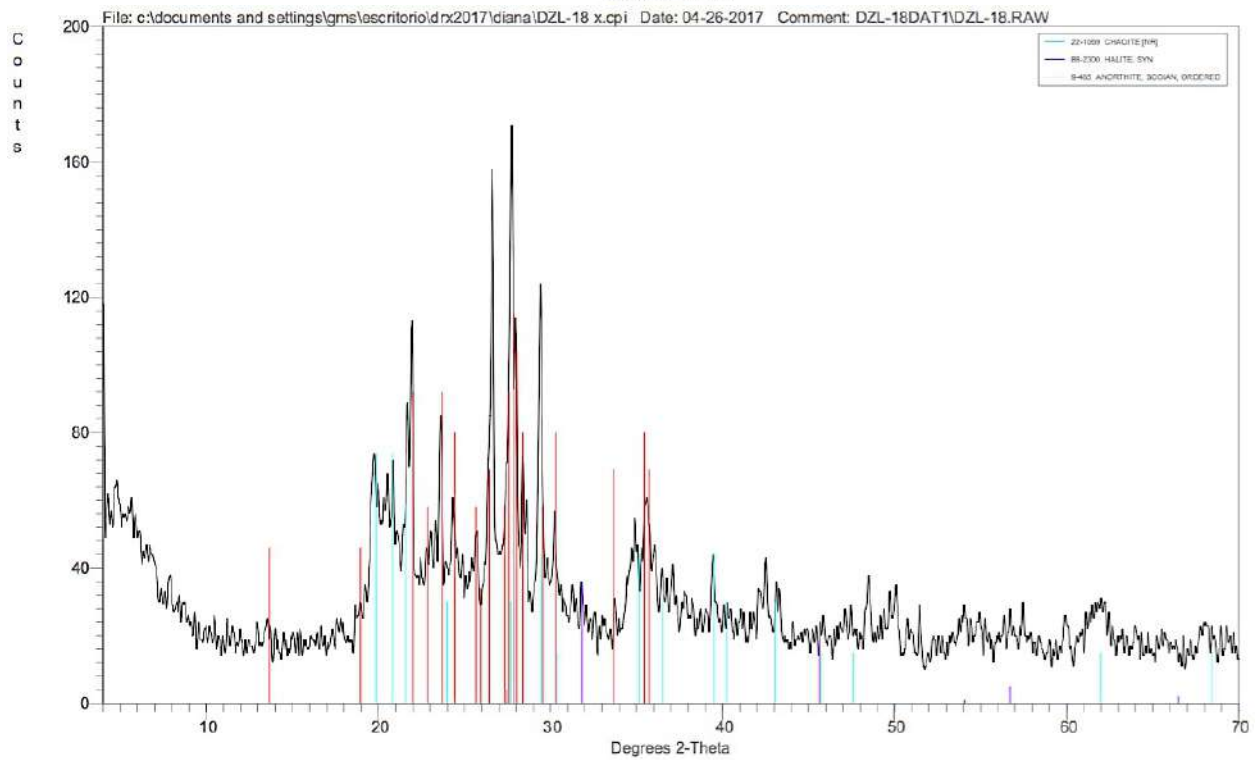
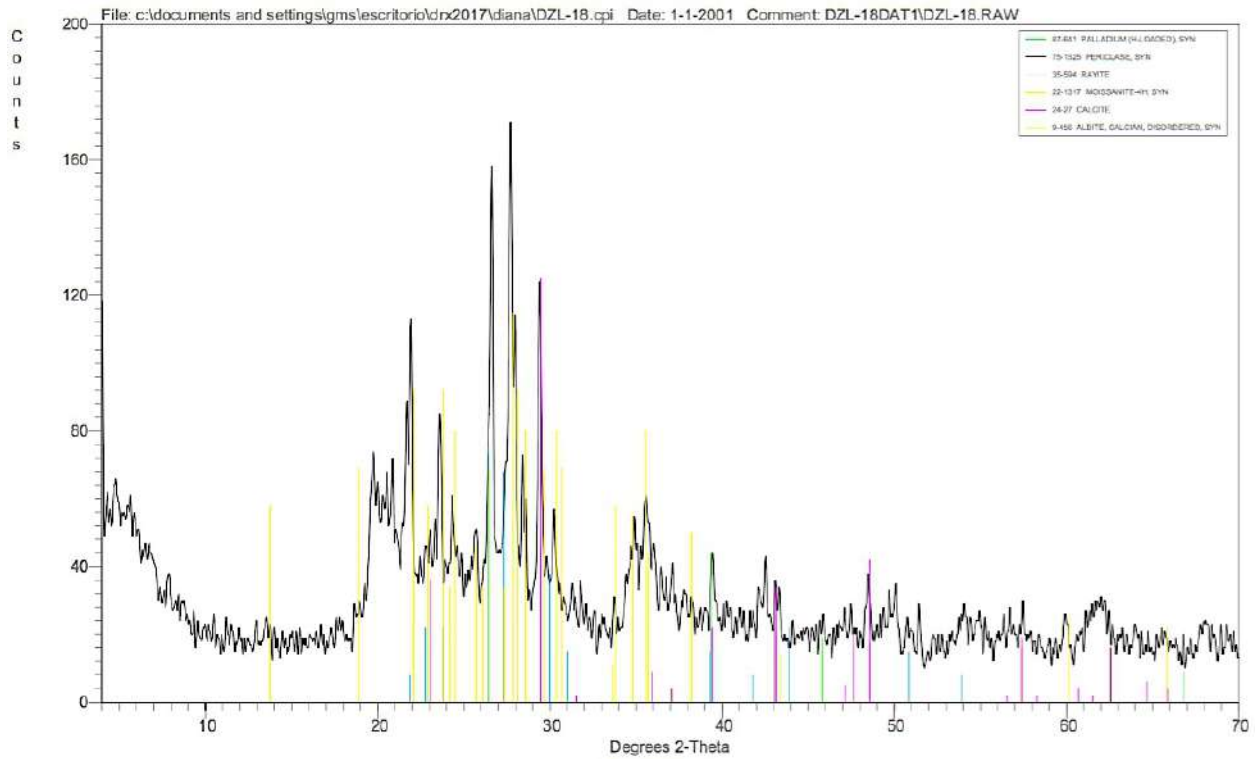
15.5.4.1 Horizonte 1



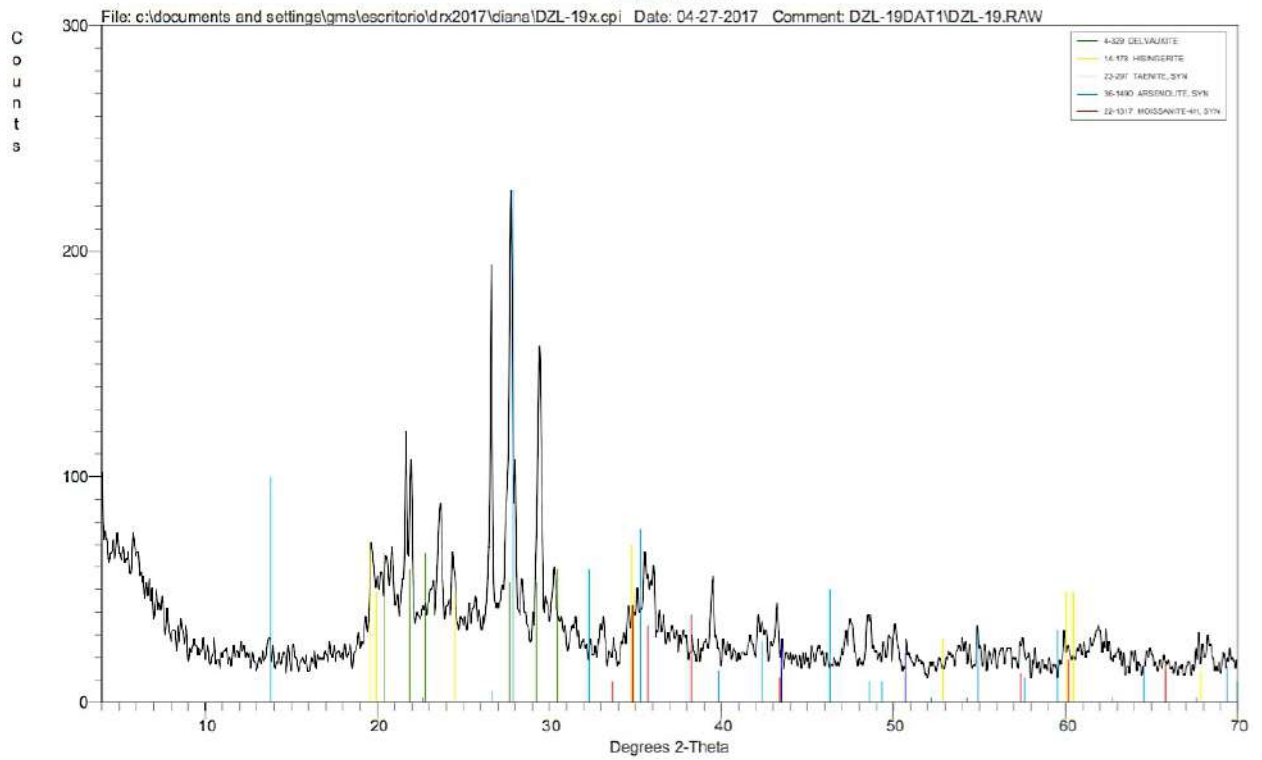
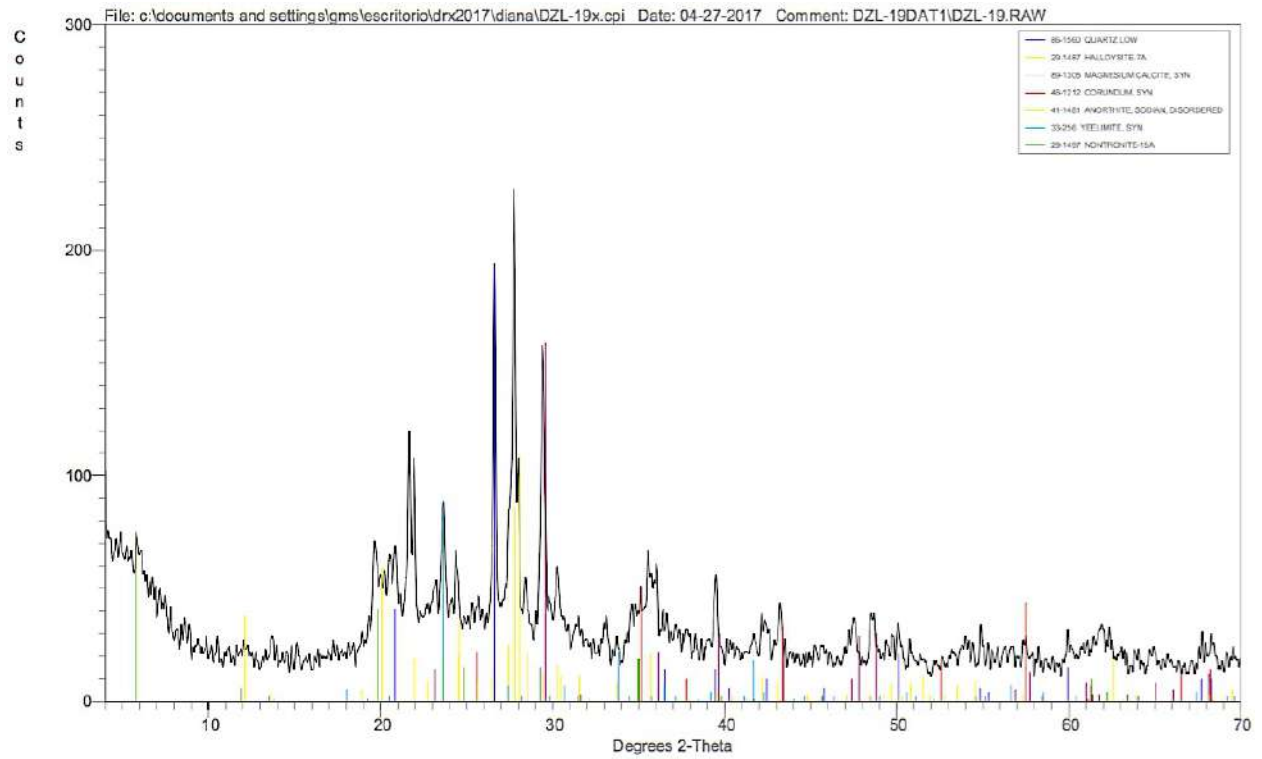
15.5.4.2 Horizonte 2



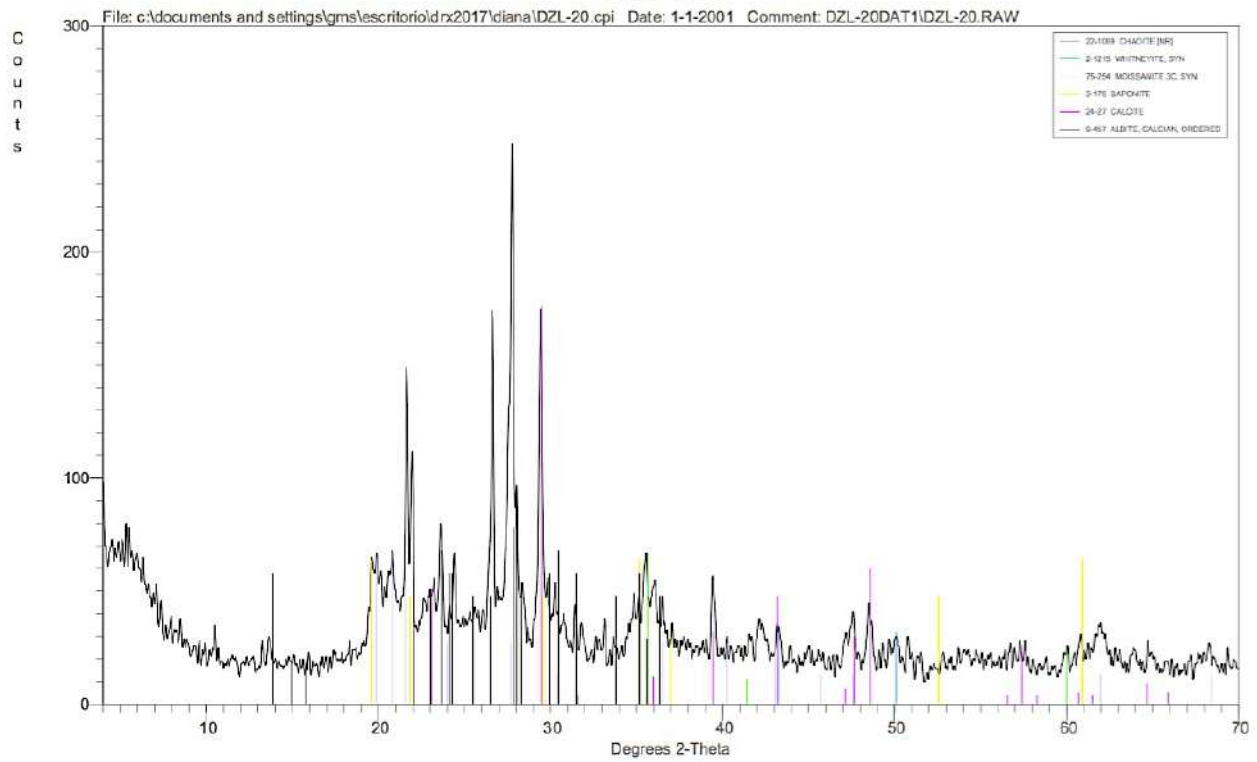
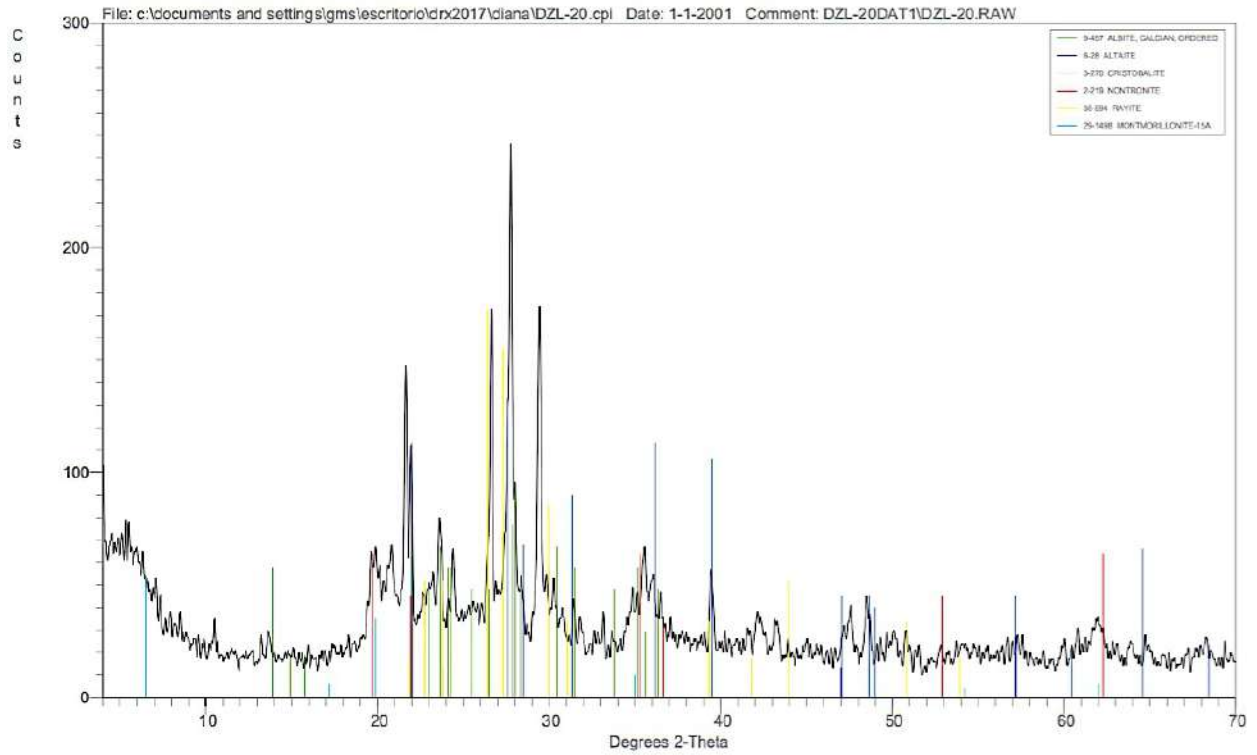
15.5.4.3 *Horizonte 3*



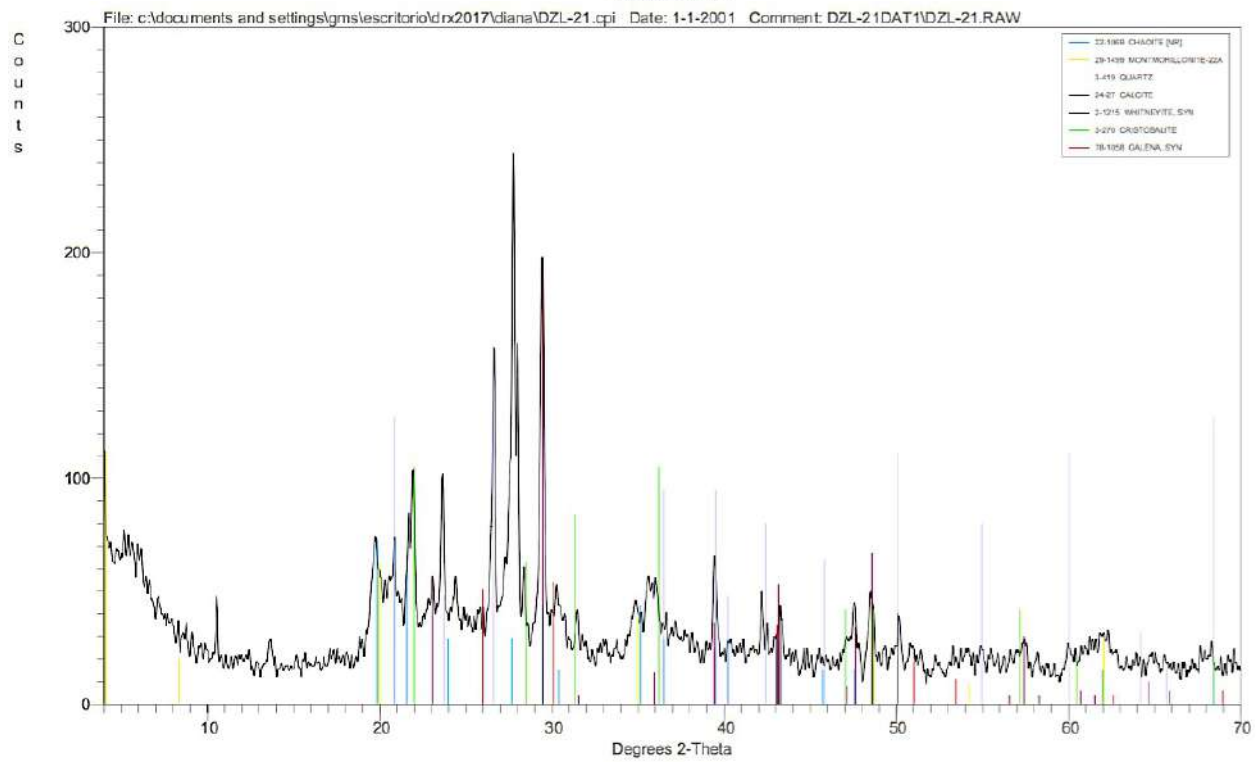
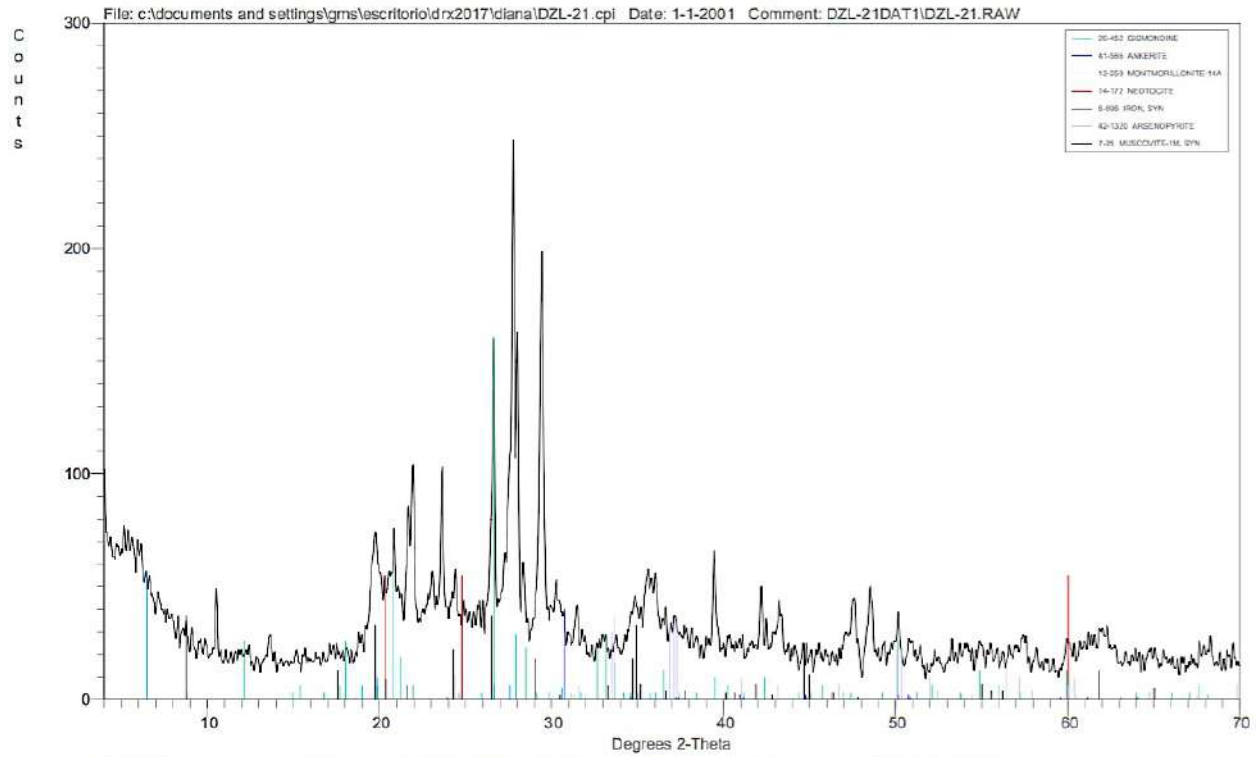
15.5.4.4 Horizonte 4



15.5.4.5 *Horizonte 5*

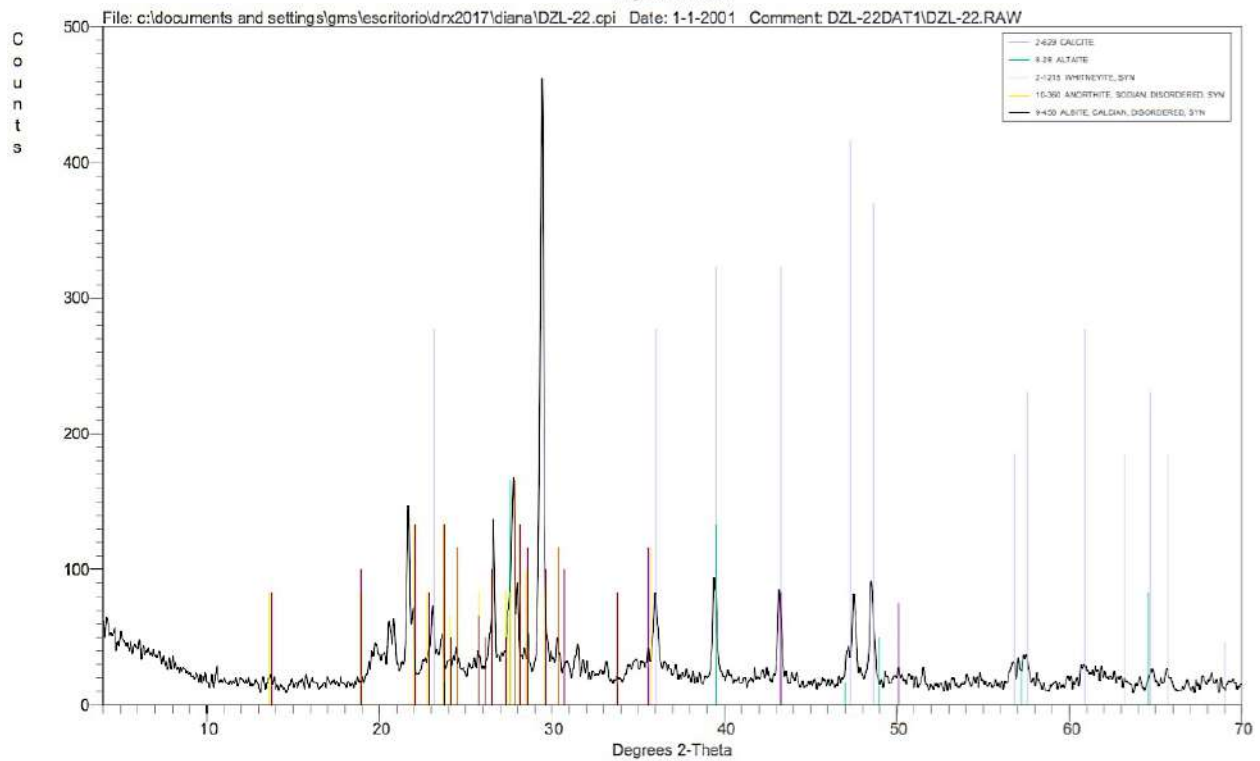
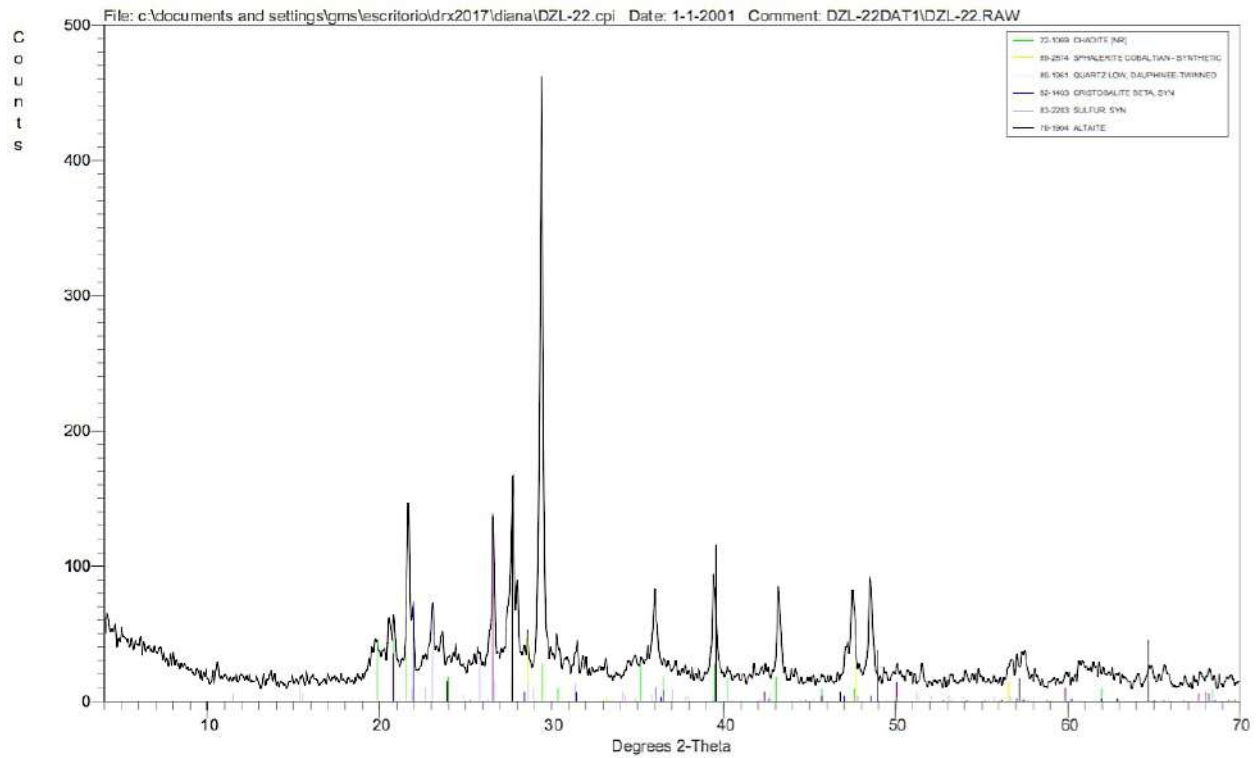


15.5.4.6 Horizonte 6

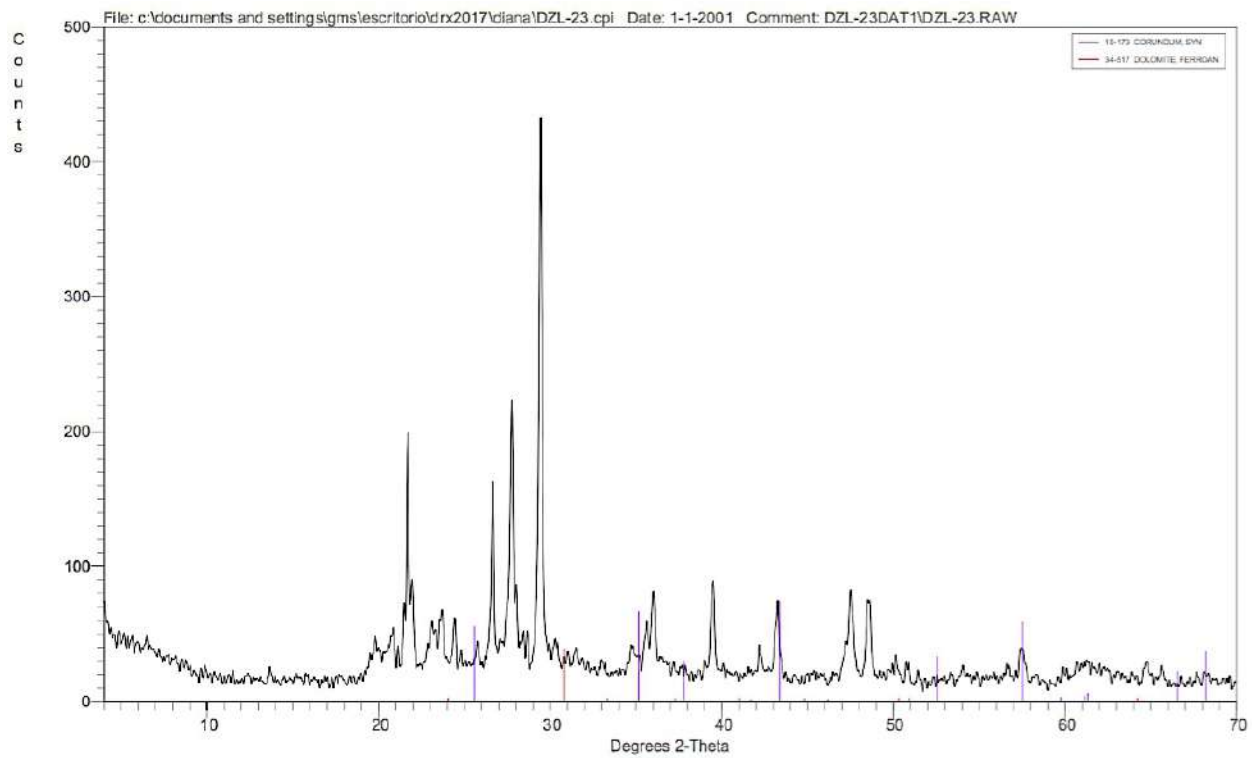
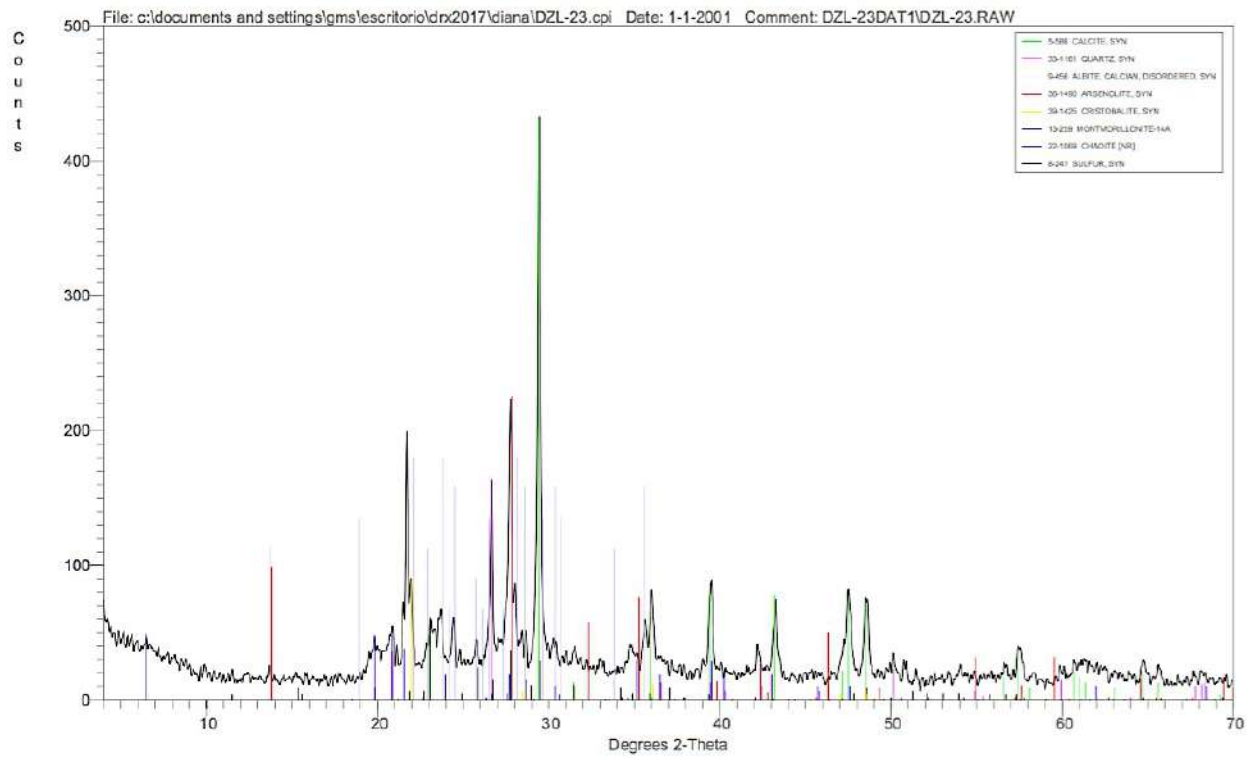


15.5.5 Zim 5

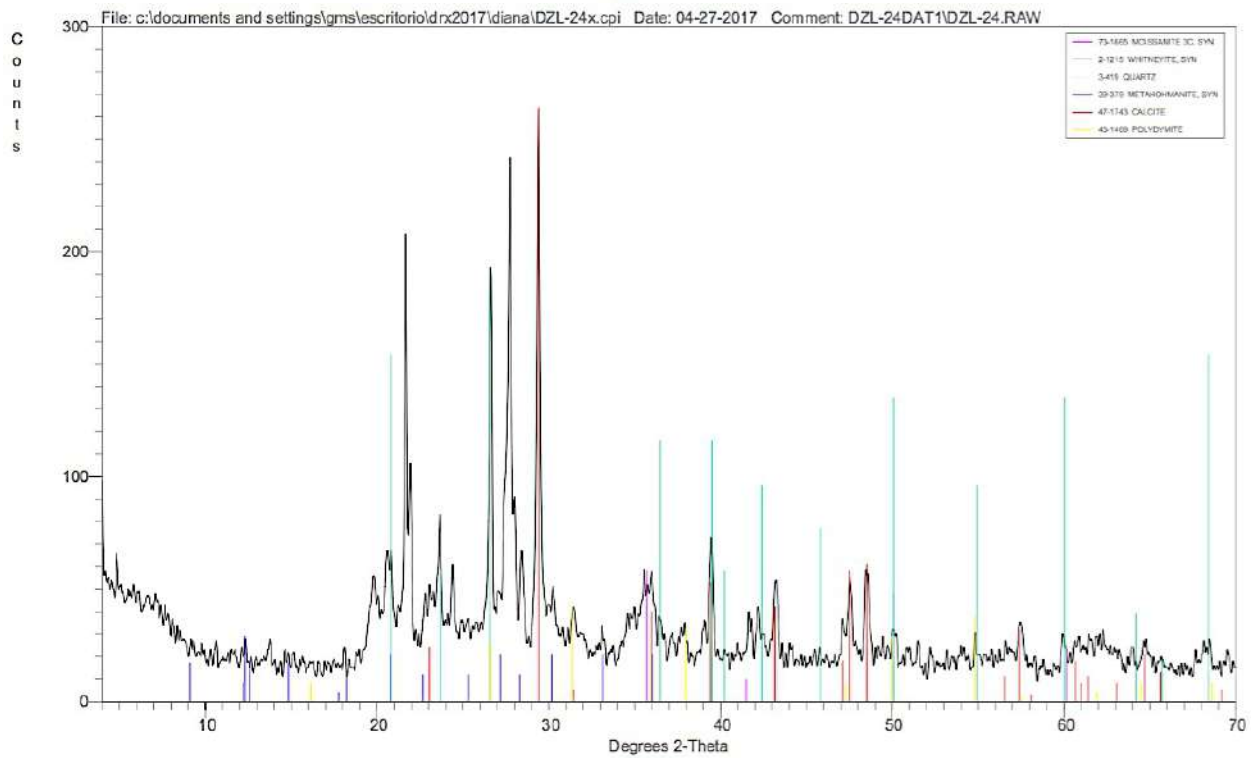
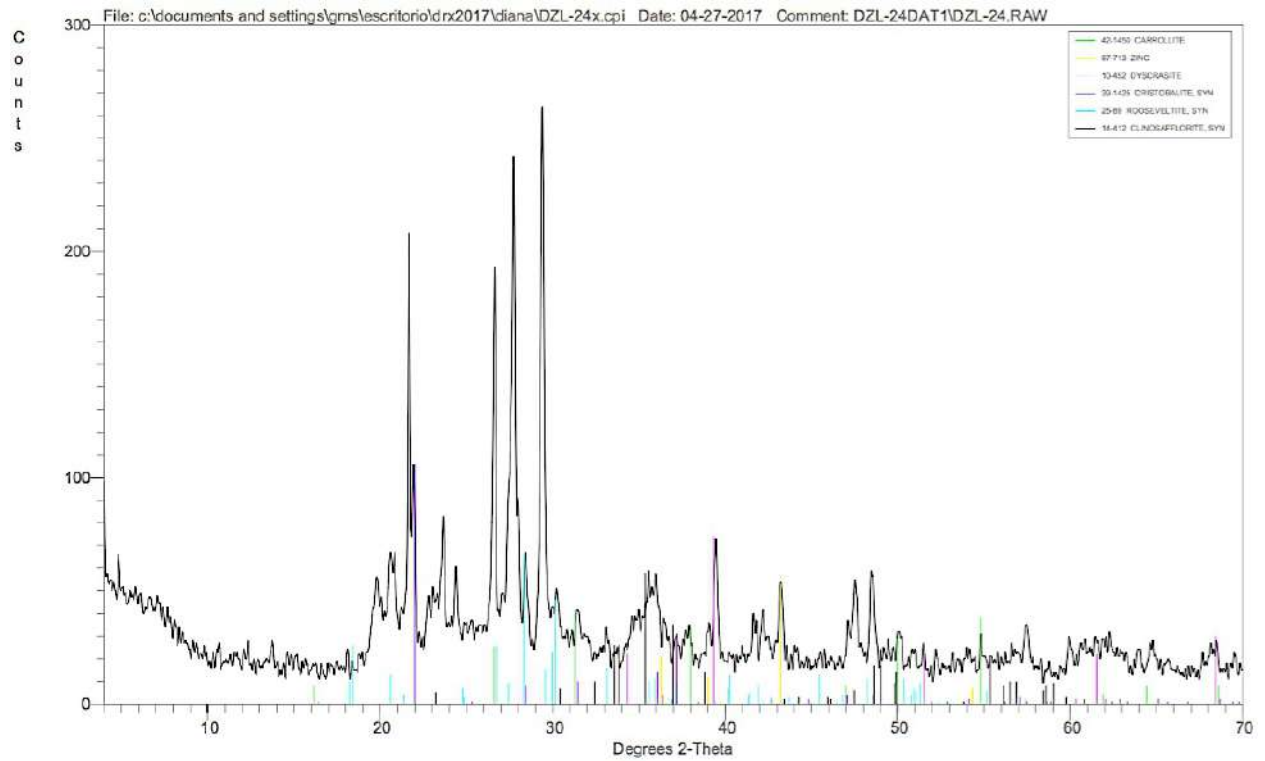
15.5.5.1 Horizonte 1



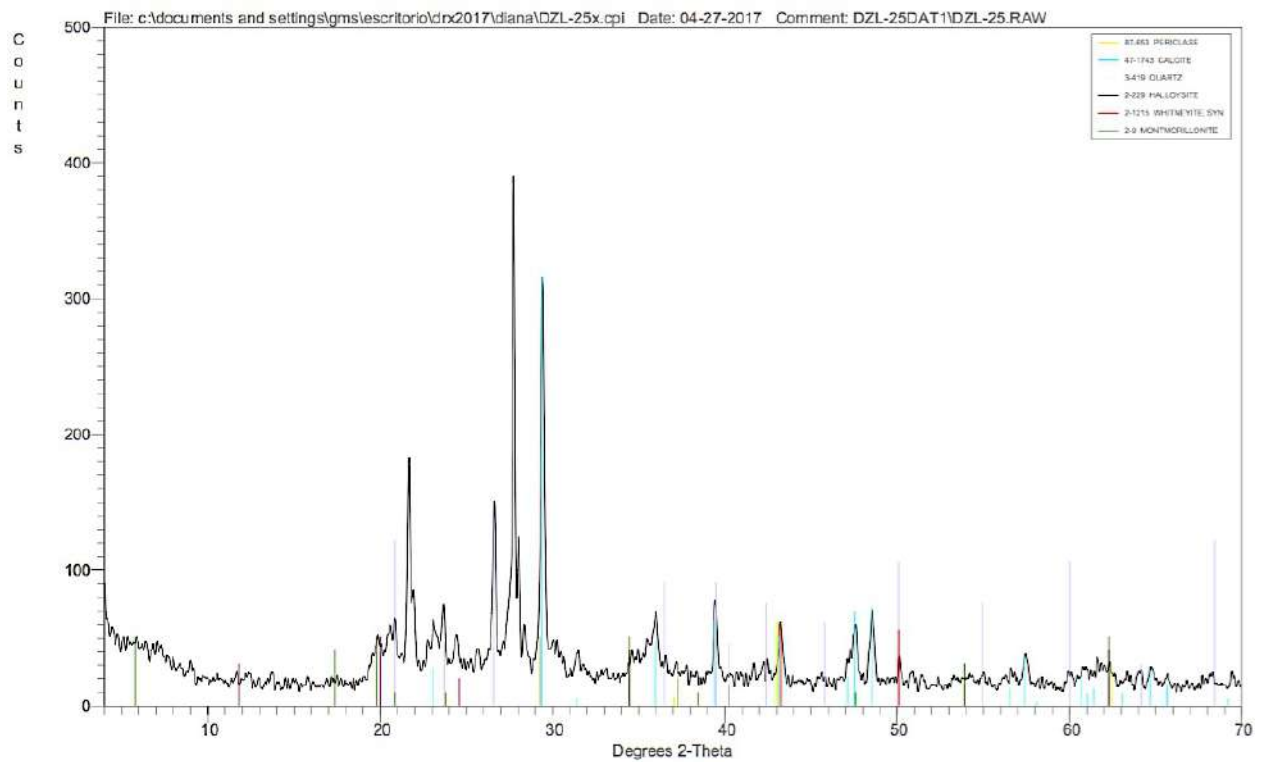
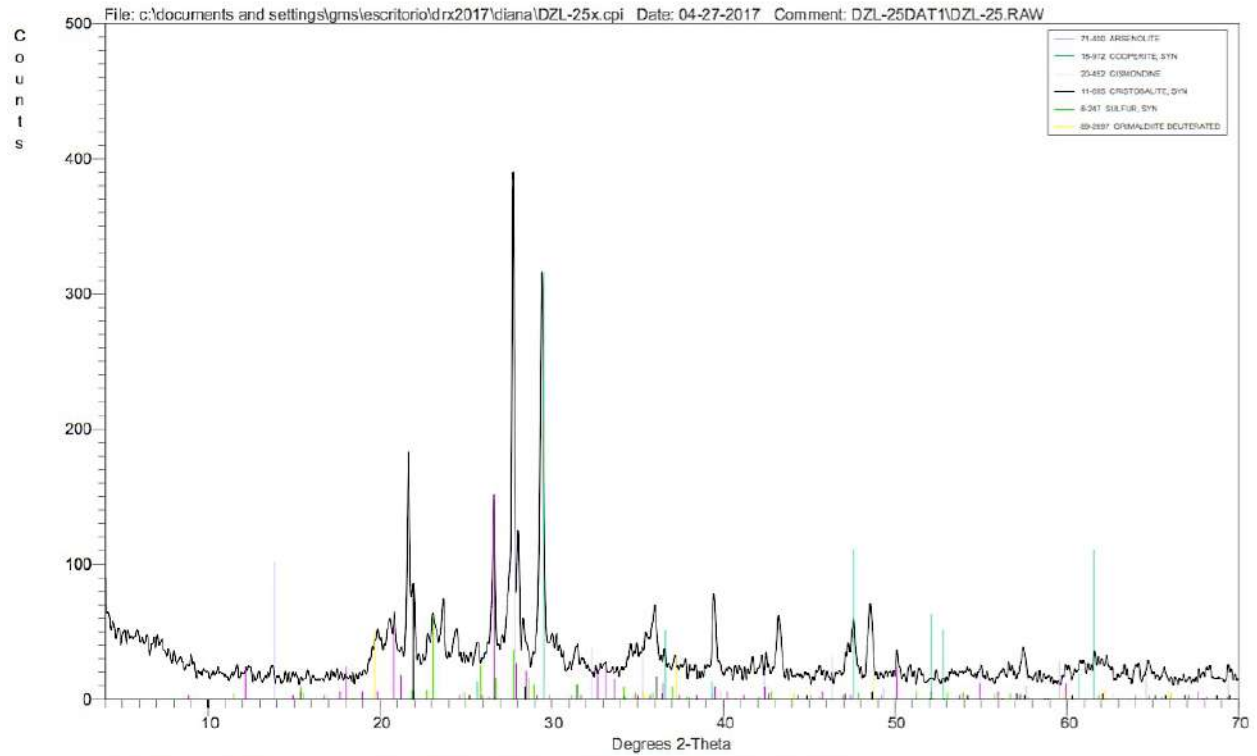
15.5.5.2 Horizonte 2



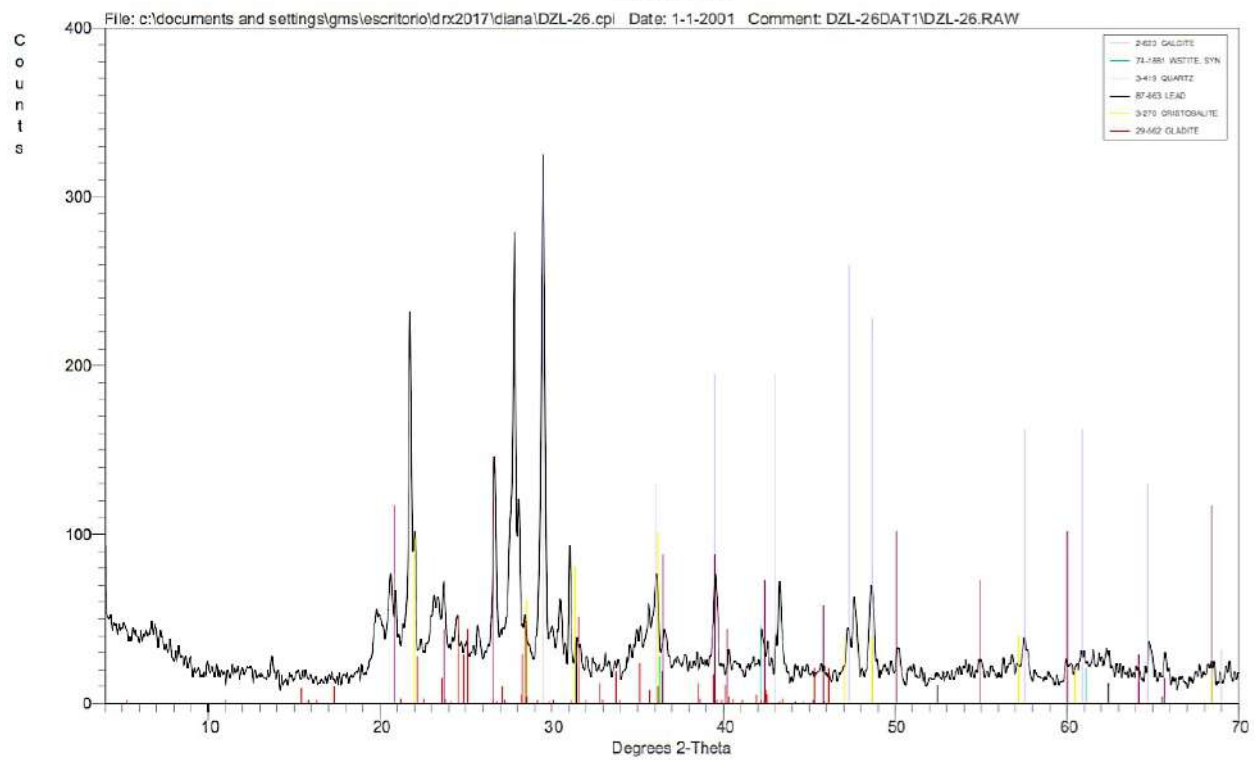
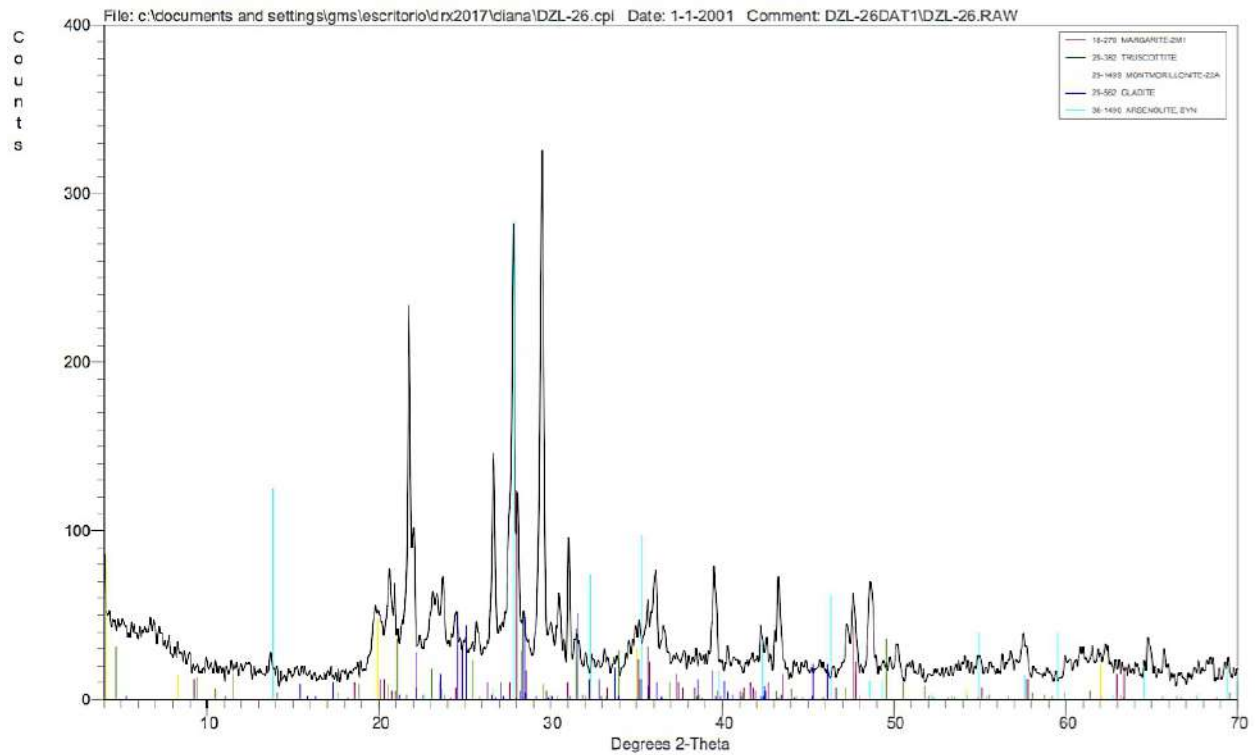
15.5.5.3 Horizonte 3



15.5.5.4 Horizonte 4

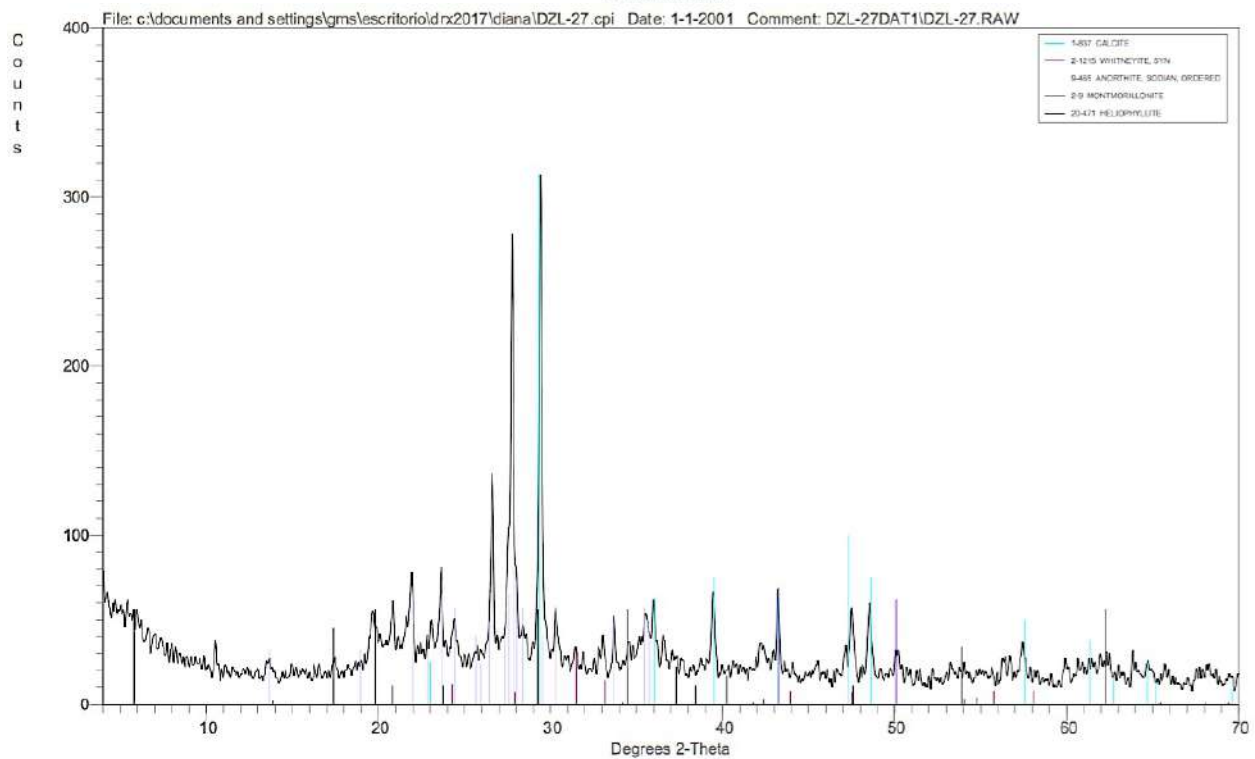
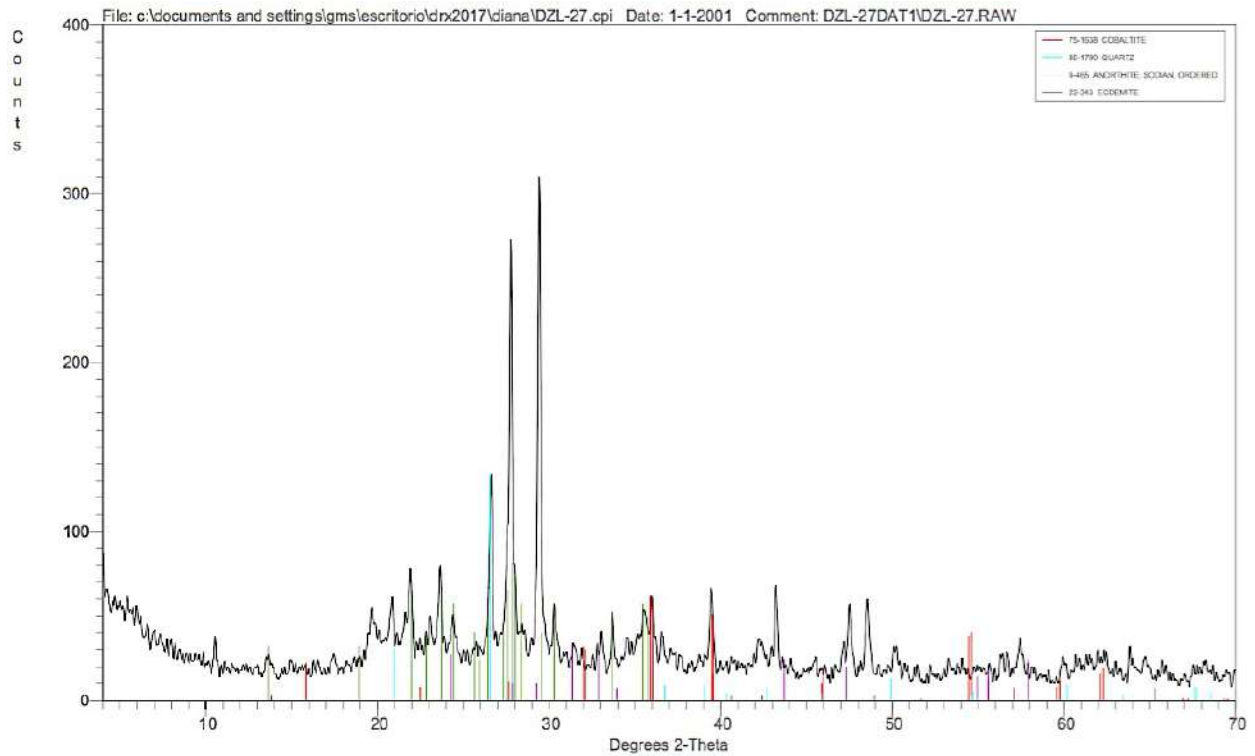


15.5.5.5 *Horizonte 5*

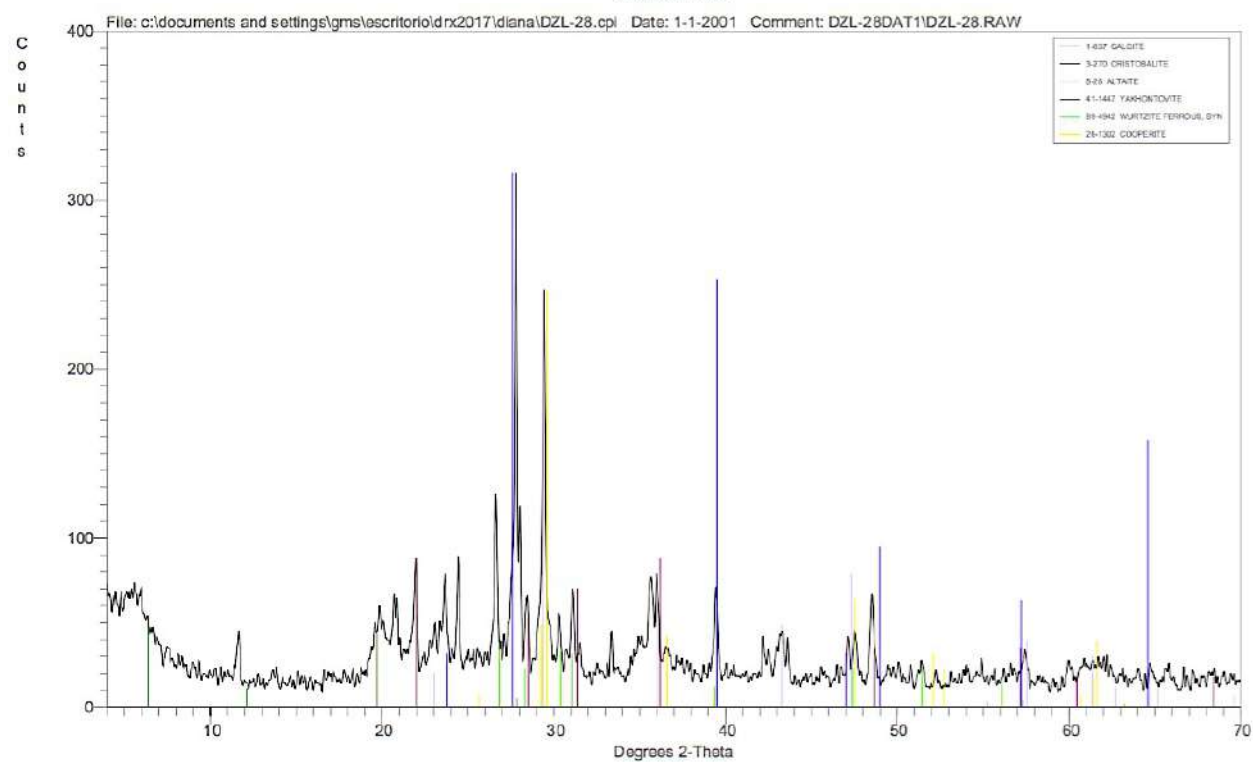
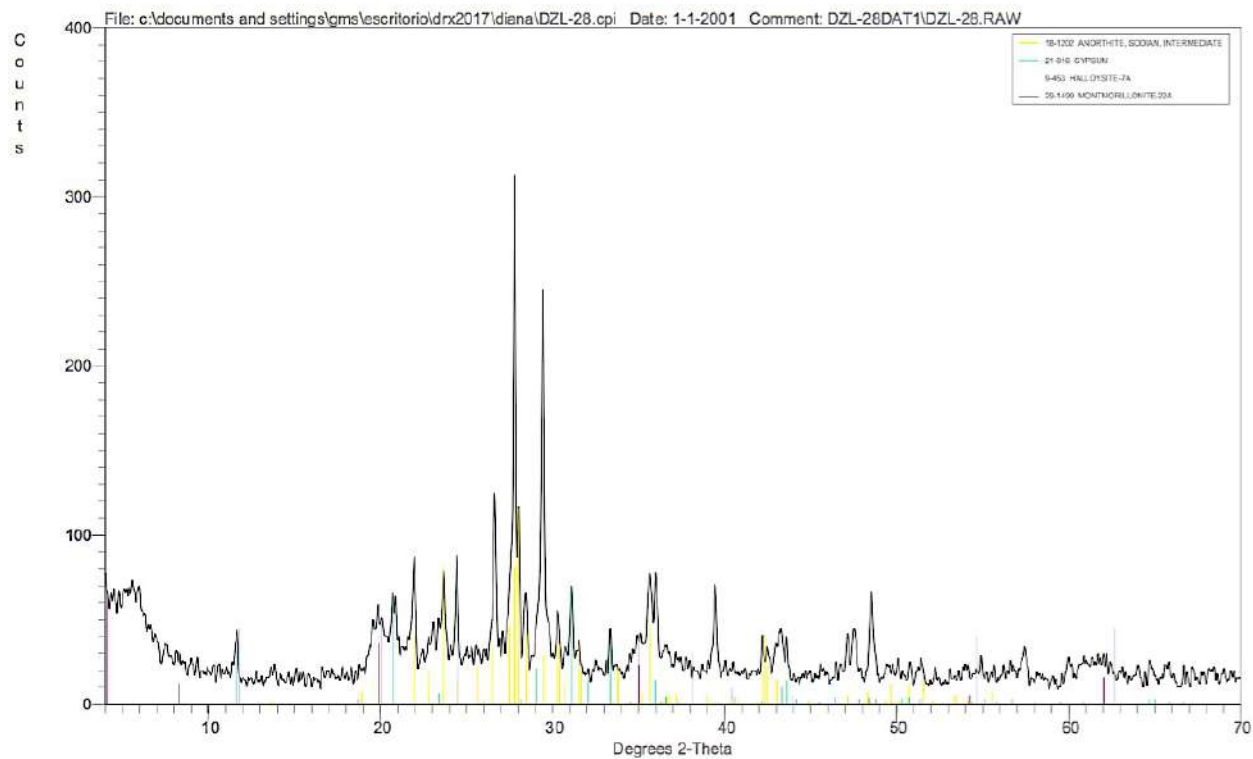


15.5.6 Zim 6

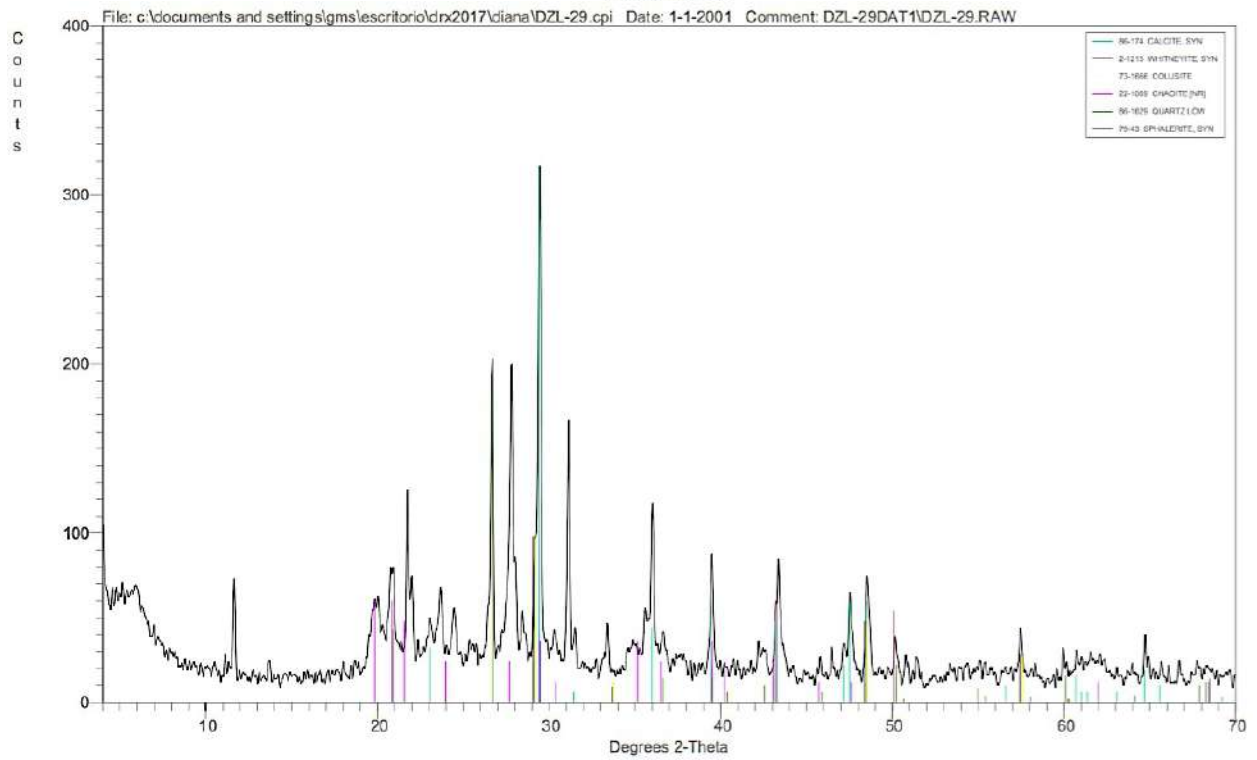
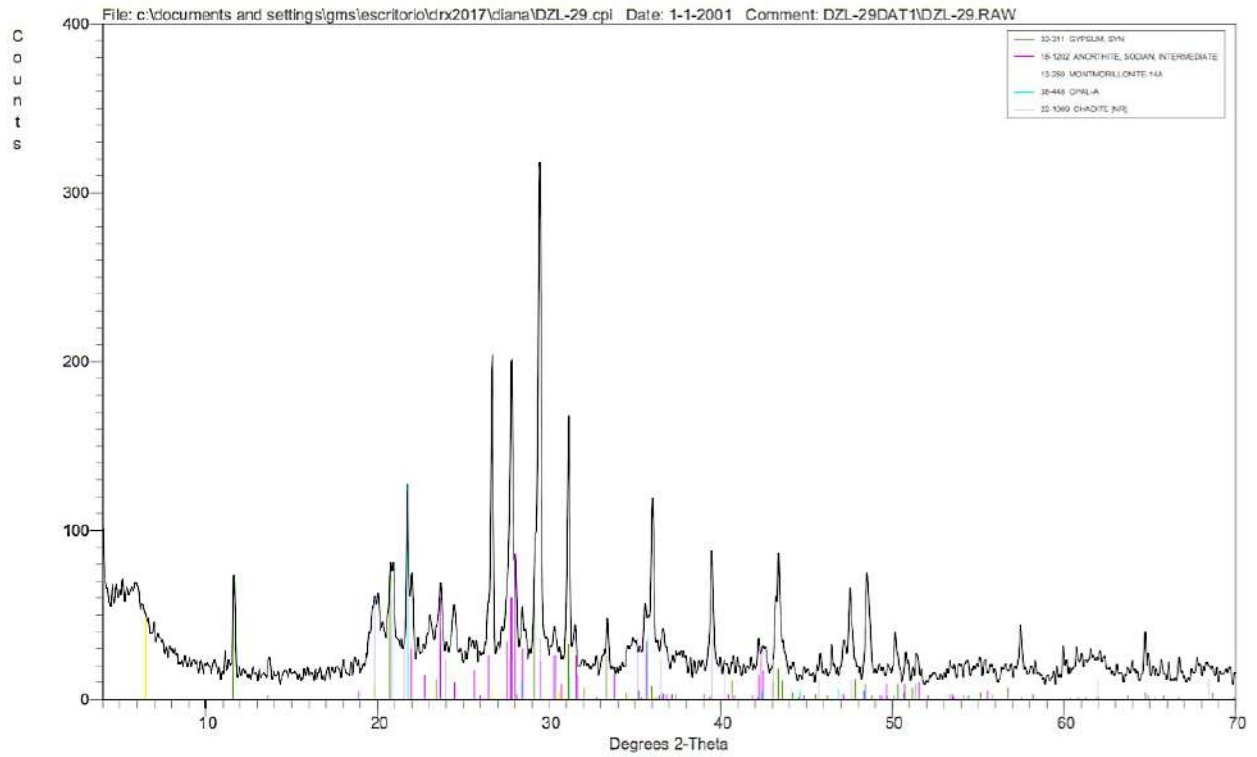
15.5.6.1 Horizonte 1



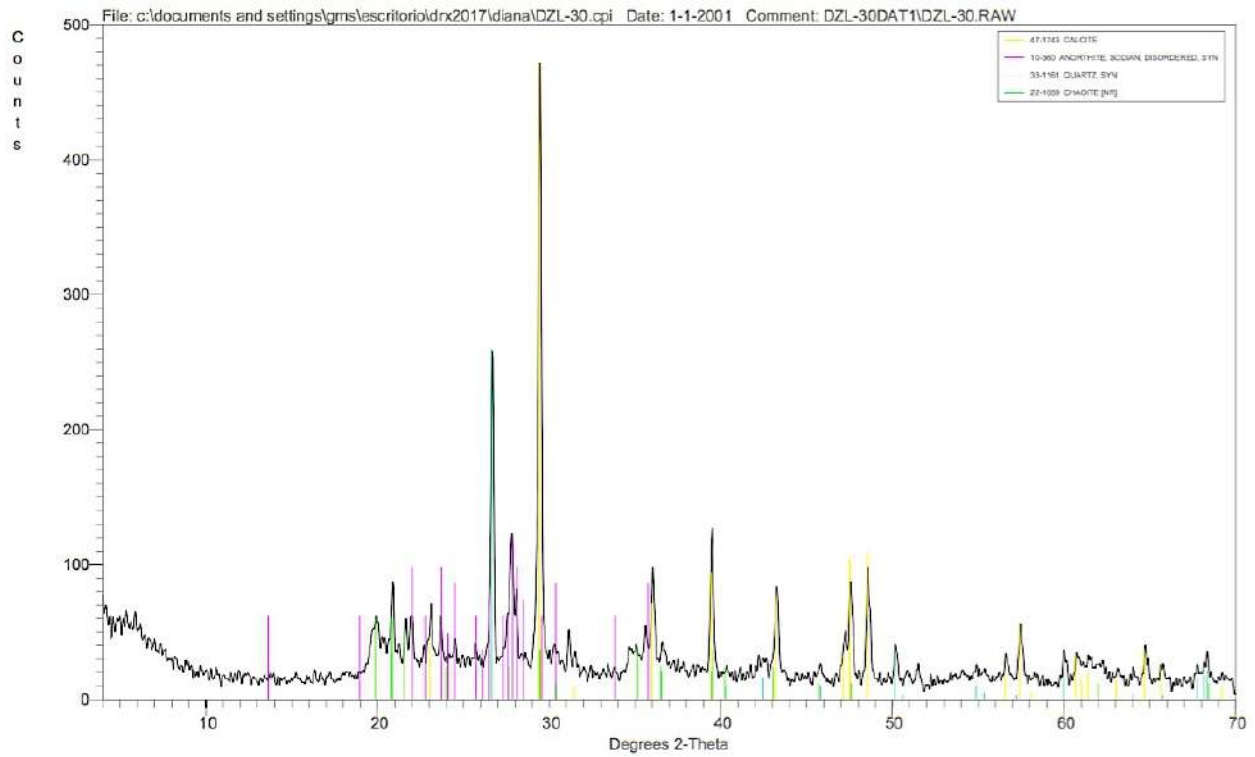
15.5.6.2 Horizonte 2



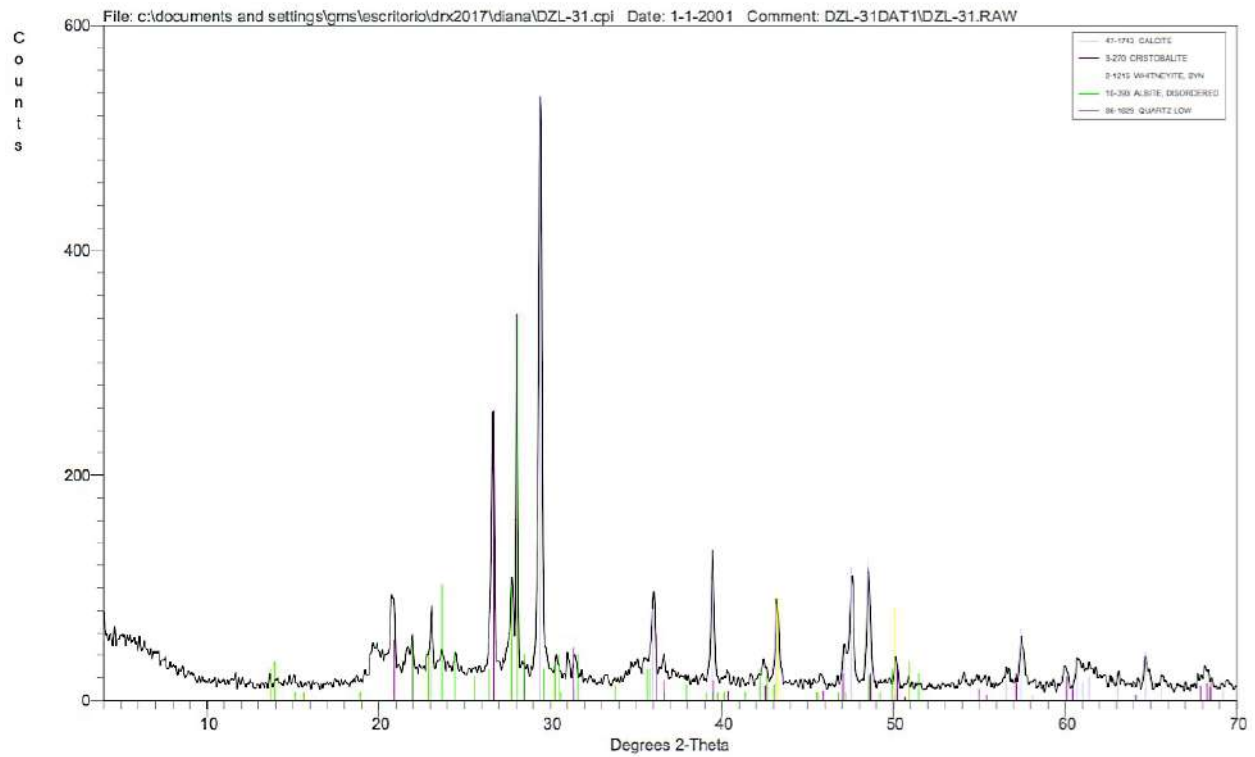
15.5.6.3 Horizonte 3



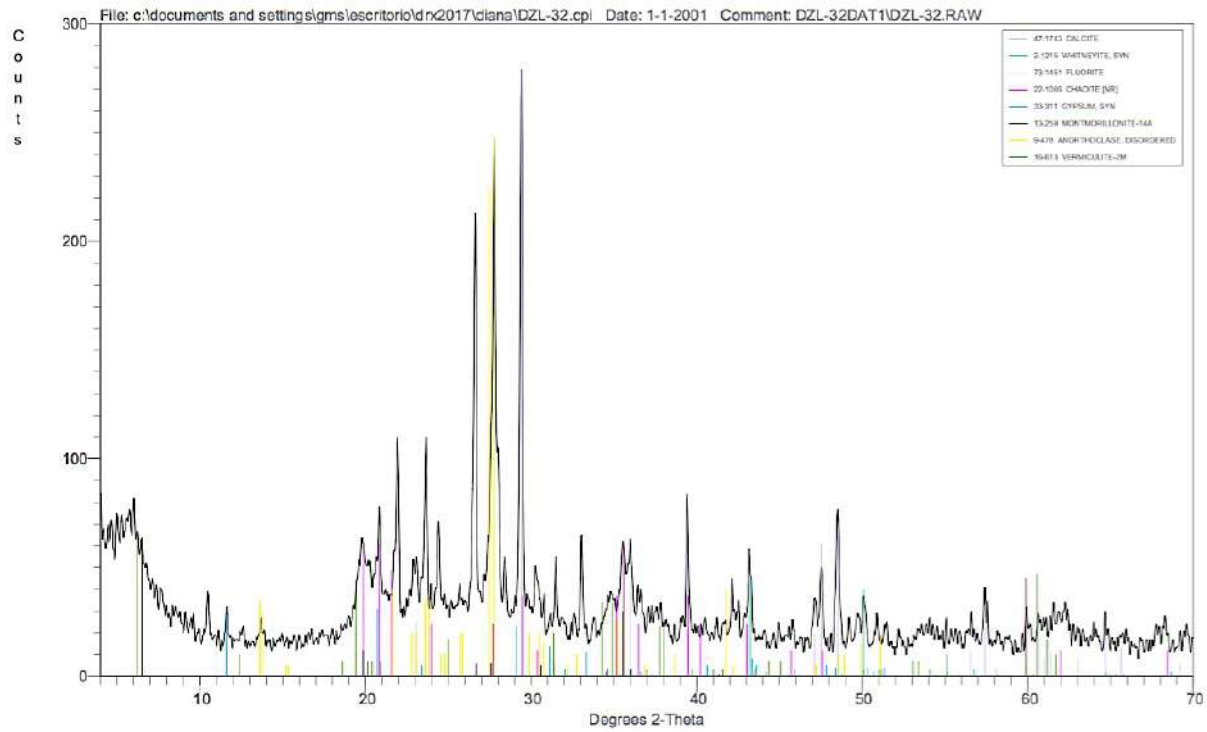
15.5.6.4 *Horizonte 4*



15.5.6.5 *Horizonte 5*

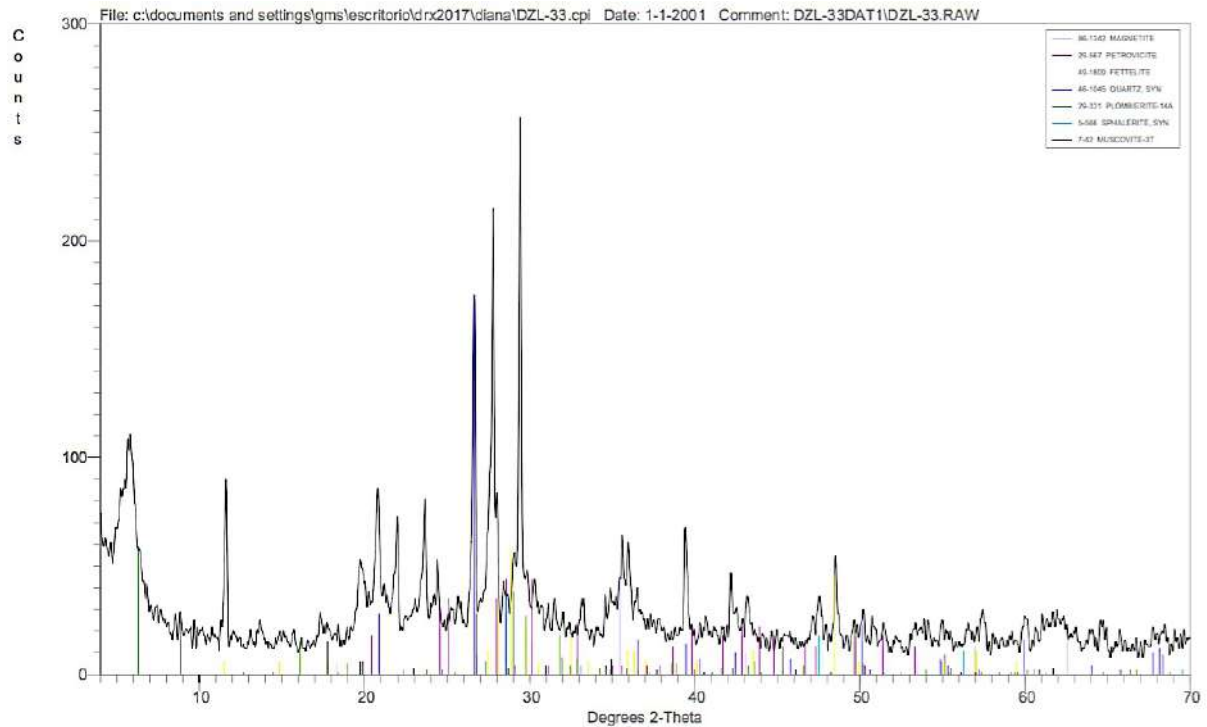


15.5.6.6 *Horizonte 6*

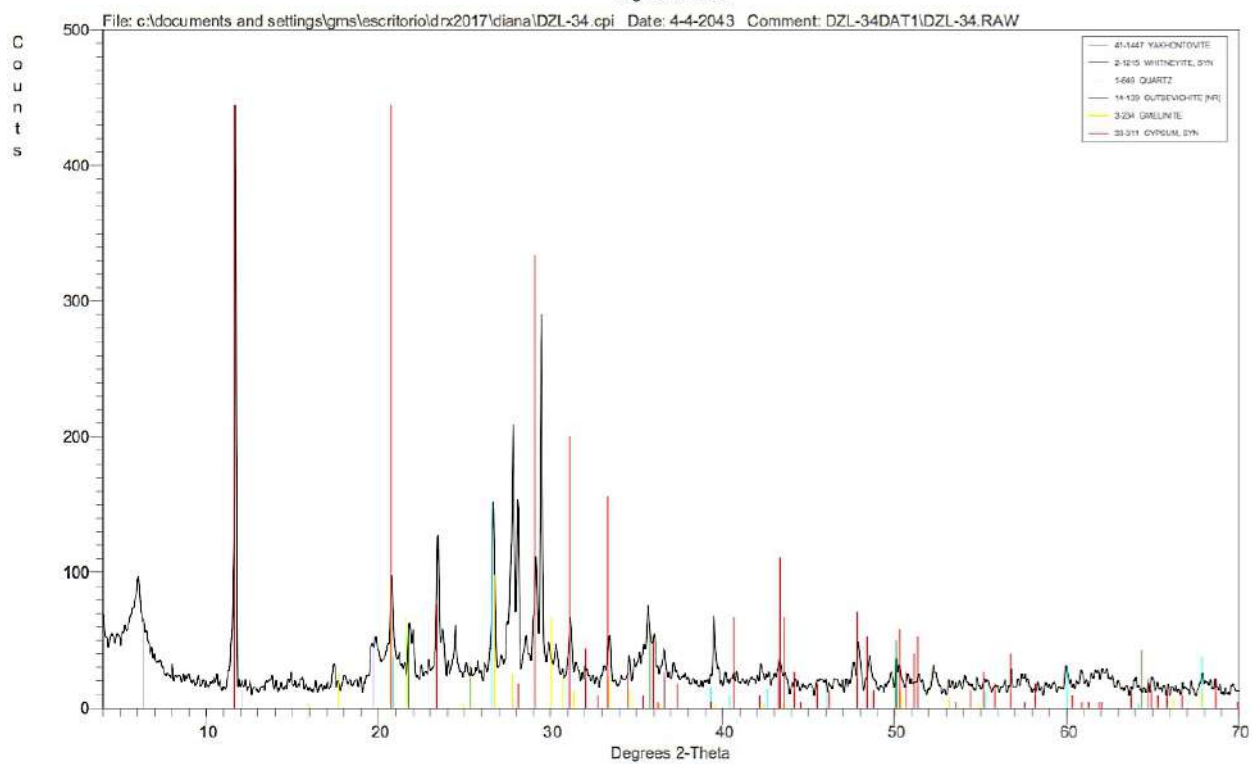
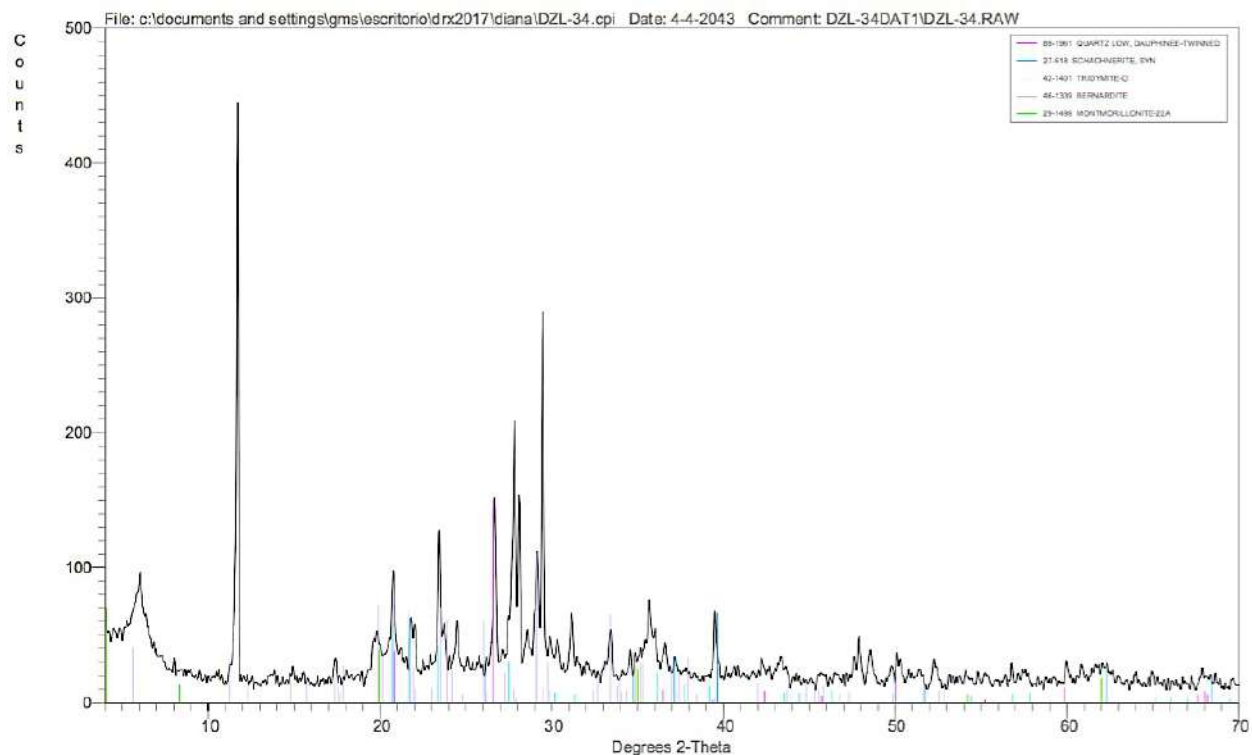


15.5.7 Zim 7

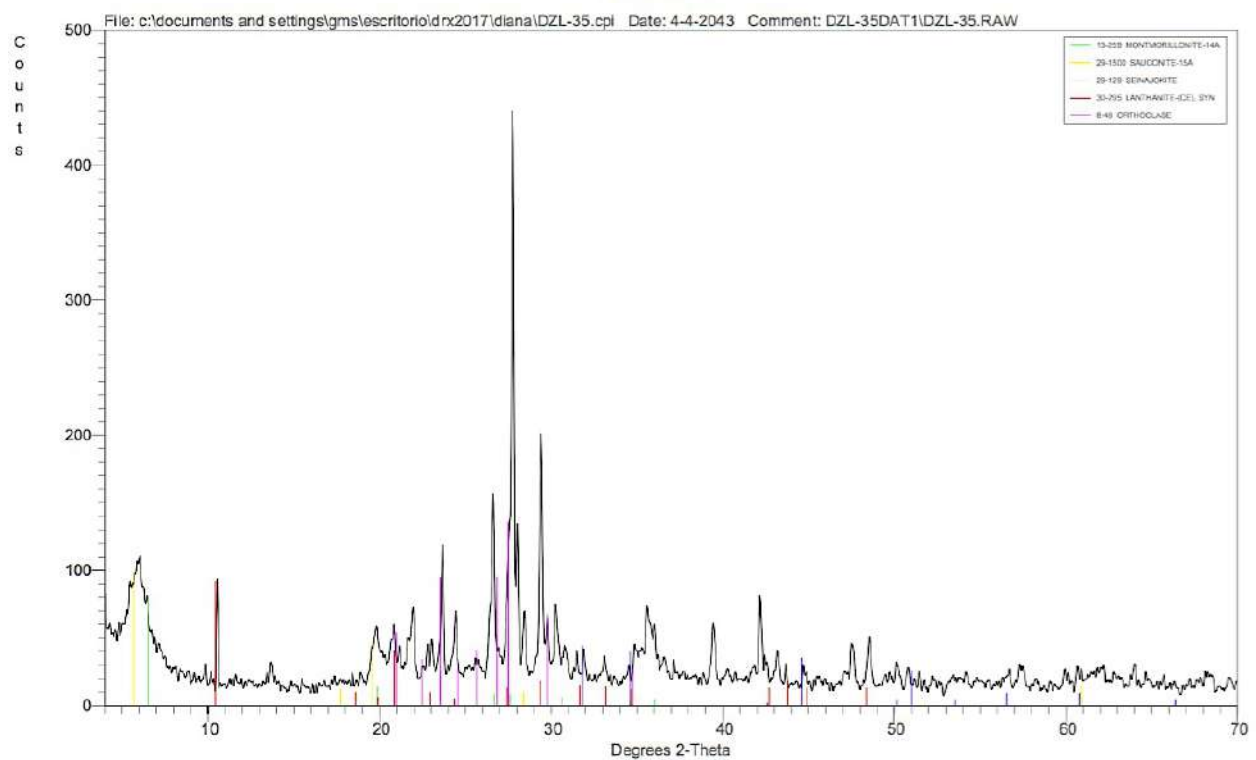
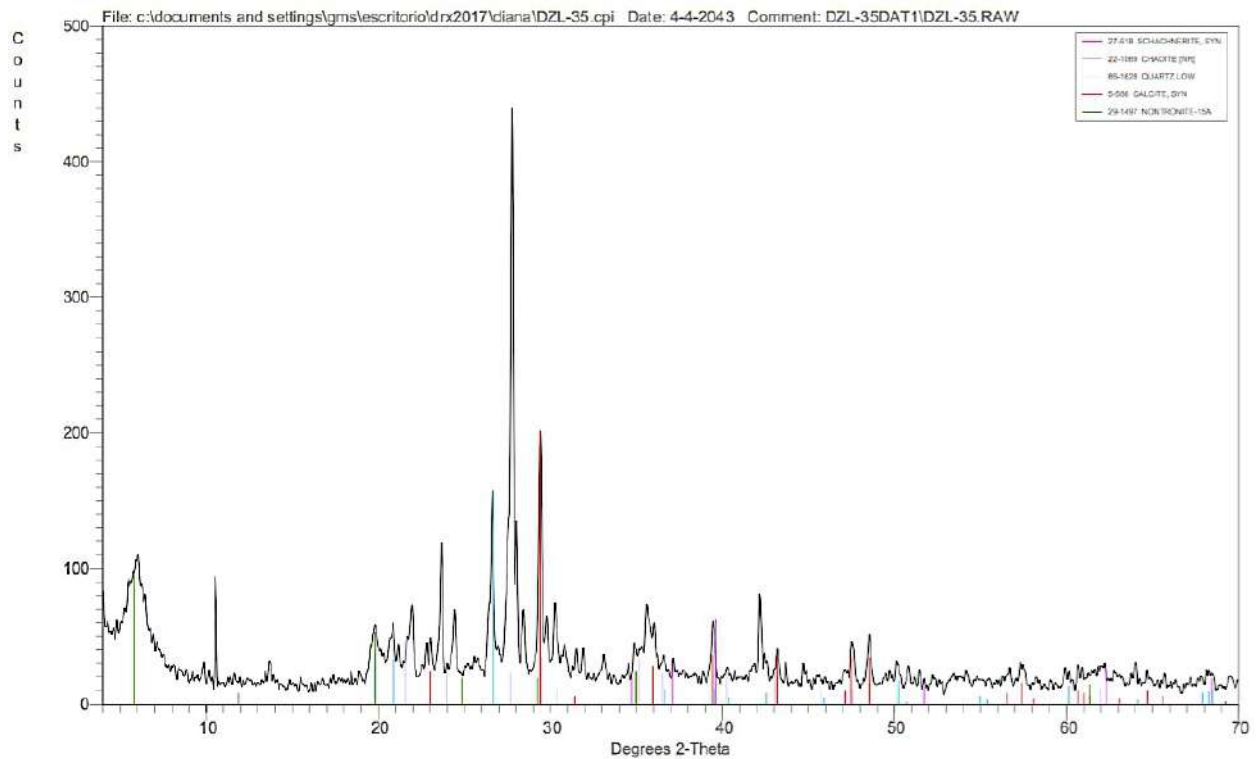
15.5.7.1 *Horizonte 1*



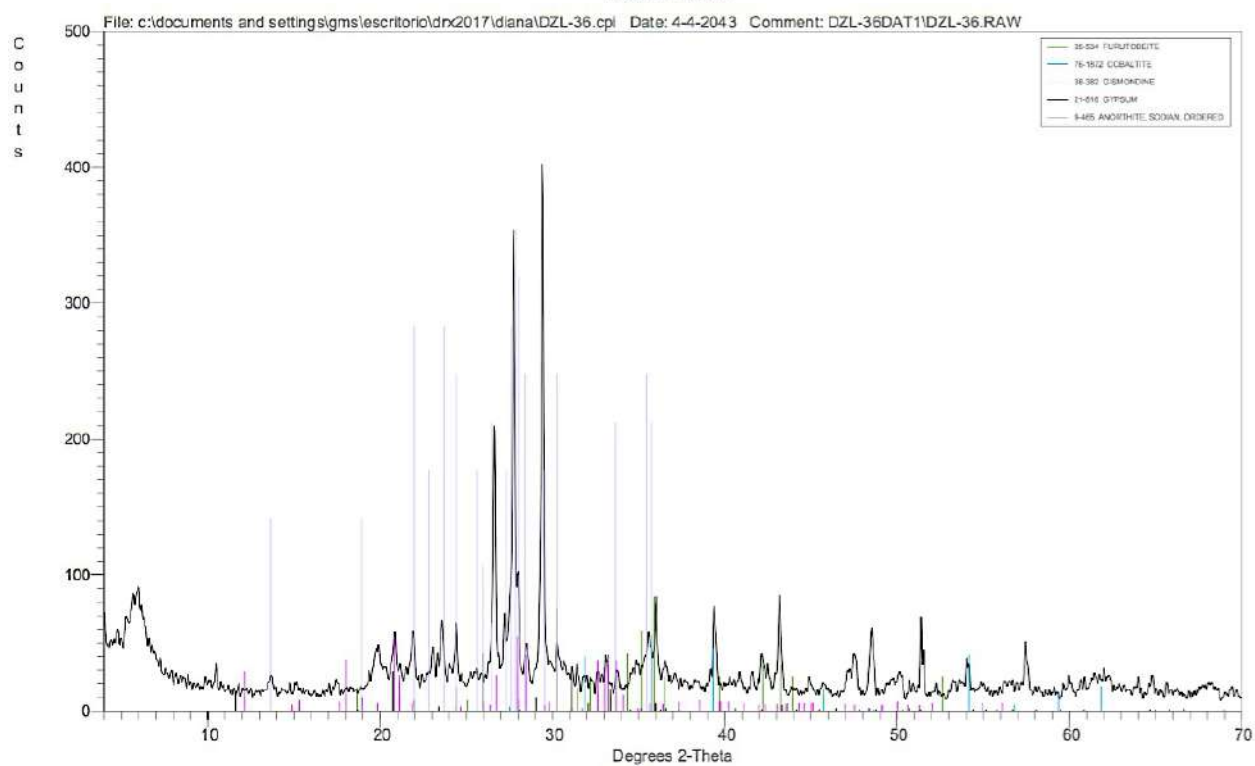
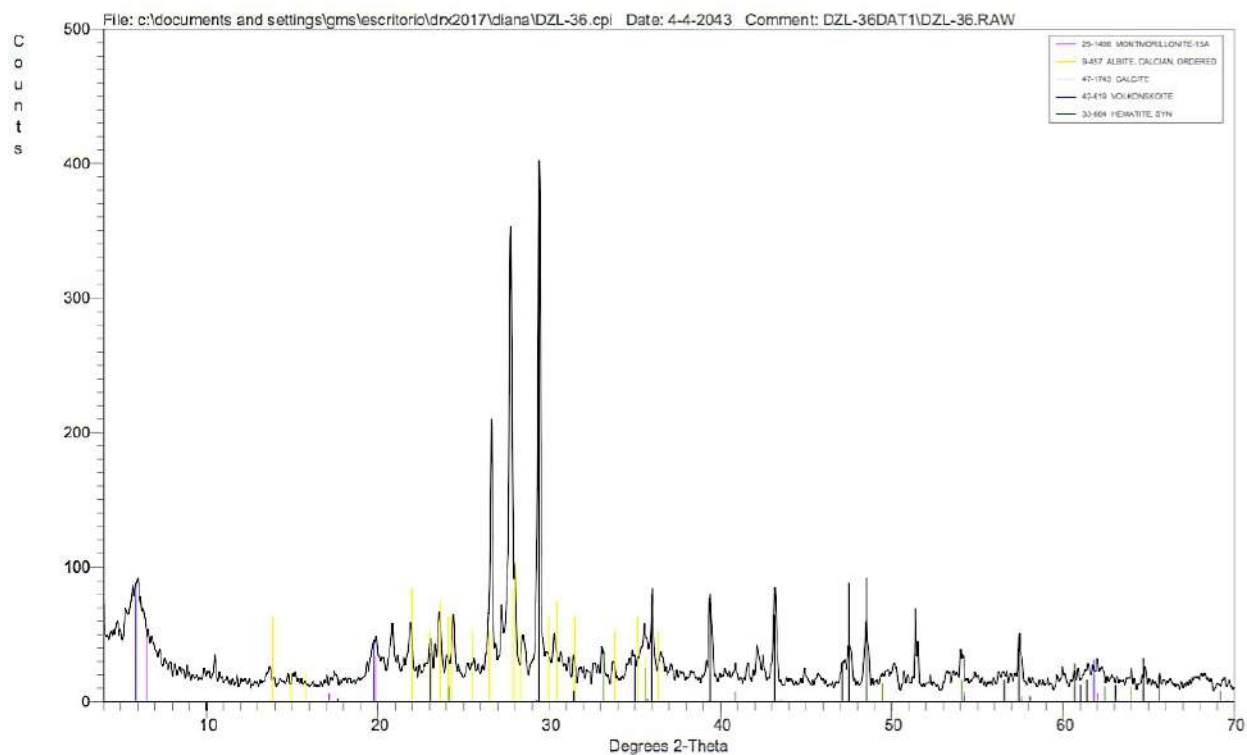
15.5.7.2 Horizonte 2



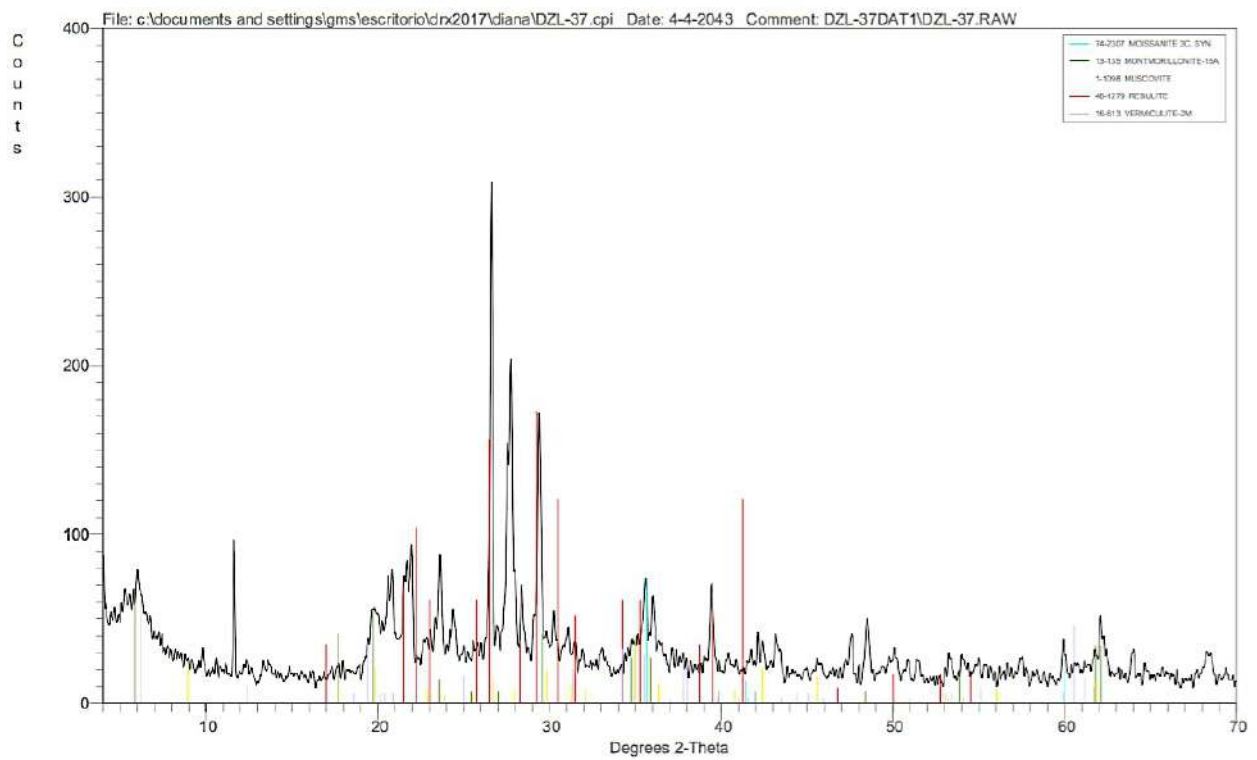
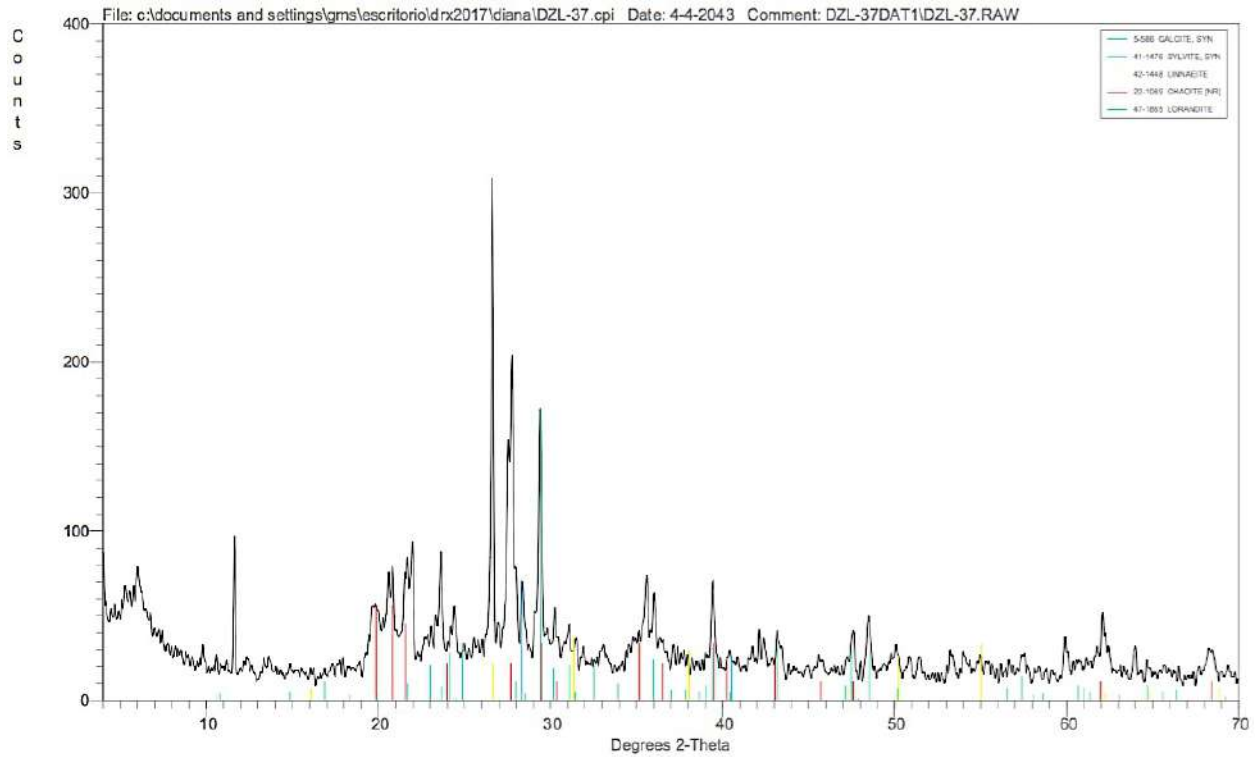
15.5.7.3 Horizonte 3



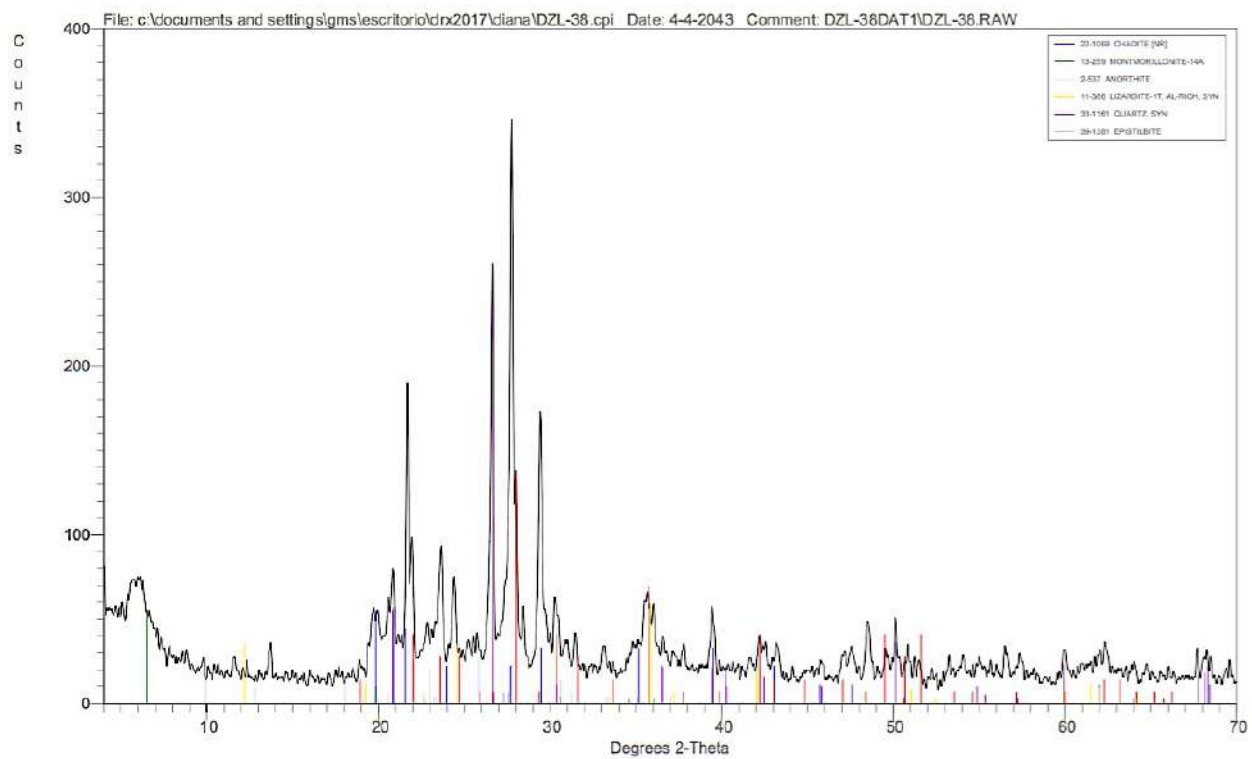
15.5.7.4 Horizonte 4



15.5.7.5 *Horizonte 5*



15.5.7.6 Horizonte 6



15.6 Descripción breve de minerales encontrados

MINERAL	FORMULA	DESCRIPCIÓN
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	La Albita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo tectosilicatos y dentro de ellos pertenece a los feldespatos denominados plagioclasas.
Almandina	$\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	Mineral pertenecientes al grupo de los granates, resultante del metamorfismo regional de sedimentos arcillosos y es mineral Índice del grado de metamorfismo.
Altaíta	PbTe	La altaíta es un mineral del grupo de los minerales sulfuros, químicamente un telurio de plomo. Aparece en filones hidrotermales asociados a depósitos de oro y telurio. Asociado al cuarzo y a distintos sulfuros metálicos.
Ankerita	$\text{CaFe}^{2+}(\text{CO}_3)_2$	La ankerita es un mineral del grupo de los carbonatos. Su génesis es hidrotermal y metasomática; y suele aparecer junto a dolomita, siderita y cuarzo. Se explota como mena de hierro, aunque es de escasa riqueza.
Annita	$\text{KFe}^{2+}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Annita es un mineral de filosilicato en la familia de las micas y miembro extremo de hierro del grupo de mica biotita, el análogo rico en hierro de la flogopita rica en magnesio.
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	La anortita es un mineral que constituye una variedad de plagioclasa y es un aluminosilicato de calcio.
Anortoclasa	PbTe	La anortoclasa es un feldespato de la serie de los feldespatos alcalinos algo más sódico que potásico que sólo aparece en rocas volcánicas.
Arsenico	As	Un elemento químico de la tabla periódica que pertenece al grupo de los metaloides, también llamados semimetales, se puede encontrar de diversas formas, aunque raramente se encuentra en estado sólido.
Arsenolita	As_2O_3	Su nombre hace referencia al elemento arsénico, que constituye el 75% en peso de este mineral. Este mineral se forma por oxidación de otros sulfuros que contienen arsénico en filones hidrotermales; también puede producirse en incendios de minas o en las vetas de carbón quemado.
Arsenopirita	FeAsS	Contiene el 46% de arsénico, 34,3% de hierro y un 19,7% de azufre, junto a otros minerales. Sulfuros y sulfosales.
Azufre	S	El Azufre es un elemento nativo, no está combinado generalmente con otros elementos; es decir, en la naturaleza se encuentra en estado libre. Se forma principalmente en yacimientos de origen sedimentario y volcánico.
Bernardita	FeAsS	Sulfuros y sulfosales.
Bilibinskita	$\text{Au}_3\text{Cu}_2\text{PbTe}_2$	Sulfuros y sulfosales.
Blixita	$4(\text{Pb}_{1.95})_4(\text{Ca}_{0.02})_4(\text{O}_{1.27})_4(\text{OH})_{0.41}4(\text{Cl}_{1.02})$	Grupo de los Haluros, presente en dolomita rica en hausmannita y manganofilita en un yacimiento tipo skarn de Fe-Mn metamorfoseado.
Brucita	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	La brucita es un hidróxido de magnesio, de la clase de los llamados minerales óxidos. Se forma a partir de la alteración mineral de las periclasas en las rocas de mármol, apareciendo en las limolitas que se forman en dicho proceso.
Calcita	CaCO_3	Es un mineral formado por carbonato cálcico. Sus cristales se encuentran en la mayoría de los depósitos sedimentarios o bien como mineral de sustitución formado posteriormente en otros ambientes, aunque lo más común es que aparezca sin ser visibles sus cristales como material masivo formando rocas calizas, donde es el componente fundamental y casi único mineral de esta roca.

Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Mineral de arcilla que forma parte del grupo de minerales industriales, silicato estratificado.
Carrollita	CuCo_2S_4	Mineral de la clase de los minerales sulfuros. Aparece en depósitos de minerales metálicos asociados con procesos hidrotermales. Es un mineral importante como mena del metal cobalto.
Chaoita	C	O carbono blanco, es un mineral descrito como un alótropo de carbono cuya existencia se disputa. Ocurre en gneis con grafito que ha sufrido un metamorfismo de choque.
Clinosafflorita	$(\text{Co},\text{Fe},\text{Ni})\text{As}_2$	Sulfuros y sulfosales. Sulfuros metálicos.
Cobaltita	CoAsS	Mineral sulfuroso compuesto por cobalto, arsénico y azufre. Contiene hasta un 10% de hierro y cantidades variables de níquel. Estructuralmente se asemeja a la pirita, con uno de los átomos de azufre sustituido por un átomo de arsénico.
Colusita	$\text{Cu}_{12}\text{VAs}_3\text{S}_{16}$	Sulfuros y sulfosales. Origen hidrotermal, asociado a filones.
Cooperita	PtS	Mineral de la clase de los sulfuros. La cooperita es un mena importante de platino que se encuentra en ultramáficos, gabros, dunitas y cromititas, típicamente en capas; también se encuentra en yacimientos masivos de calcopirita-pirrotita y en placeres aluviales.
Cordierita	$(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	Mineral ciclo silicato de hierro, magnesio y aluminio, con enlaces sencillos, sin aniones complejos aislados, se suele encontrar en rocas argílicas que hayan sufrido un metamorfismo regional o de contacto y asociada con otros minerales como los granates o la antofilita.
Corindón	Al_2O_3	Mineral formado por óxido de aluminio. Es característico de entornos ricos en aluminio y pobres en silicio. Es mineral accesorio en rocas de metamorfismo regional o de contacto (Mármoles, esquistos o gneises).
Cristobalita	SiO_2	De la clase de los minerales óxidos. Puede formarse mediante metamorfismo de contacto de arenisca, desarrollado durante la diagénesis, recristalizado en rocas sedimentarias silíceas.
Cuarzo	SiO_2	Mineral compuesto de sílice. Es el segundo mineral más común de la corteza terrestre. Destaca por su dureza y resistencia a la meteorización en la superficie terrestre.
Delvauxita	$4(\text{PO}_4, \text{SO}_4)_2(\text{OH})_8 \cdot 4-6\text{H}_2\text{O}$	Mineral de la clase de los fosfatos, aplica a los fosfatos férricos hidratados mal definidos.
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio. Se produce una sustitución por intercambio iónico del calcio por magnesio en la roca caliza.
Discrasita	Ag_3Sb	Mineral del grupo de los sulfuros. Es una de las menas de plata menos frecuentes. Se halla junto con minerales del arsénico y del antimonio.
Ecdemita	$\text{Pb}_6\text{Cl}_4(\text{As}_2\text{O}_7)$	Composición extraña. Génesis secundaria en yacimientos metamórficos de hierro-manganeso y en escombros de plomo.
Epistilbita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_6\text{O}_{16} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	También llamado orizita, es un mineral de la clase de los tectosilicatos, dentro de estos del grupo de las zeolitas. Aparece rellenando el interior de cavidades y fisuras en rocas de lava de basaltos, y más rara vez en rocas metamórficas tipo gneises; en todas ellas se forma por génesis hidrotermal en cavidades, asociada a la calcita y otras zeolitas.
Esfalerita	ZnS	O blenda es un mineral compuesto por sulfuro de zinc. La esfalerita es una de las principales menas de cadmio, indio, galio y germanio, que aparecen en pequeñas proporciones sustituyendo al zinc.
Fettelita	$[\text{Ag}_6\text{As}_2\text{S}_7][\text{Ag}_1]$	O sanguinita es un mineral de la clase de los minerales sulfuros. Es

	${}_0\text{HgAs}_2\text{S}_8]$	un sulfuro y arseniuro de metales como la plata y el mercurio. Es un mineral raro; los ejemplares de este mineral con abundante mercurio suelen encontrarse en vetas hidrotermales de cuarzo-calcita-prehnita, que cortan a rocas volcánicas de gabro-diorita de la edad de la orogenia hercínica.
Fluorita	CaF_2	Es un mineral del grupo III (halogenuros). La fluorita es empleada como una fuente de flúor que puede emplearse, por ejemplo, en la fluoración del agua potable. En la industria es empleado como fundente en la fundición de hierro y del acero.
Forsterita	Mg_2SiO_4	La forsterita es un mineral de la clase de los nesosilicatos, y dentro de esta pertenece al llamado grupo del olivino. Aparece con cierta frecuencia en rocas ígneas de tipo ultramáfico. También en rocas metamórficas del tipo mármoles dolomíticos.
Furutobeita	$(\text{Cu,Ag})_6\text{PbS}_4$	Mineral de la clase de los sulfuros .
Galena	PbS	Químicamente se trata de sulfuro de plomo aunque puede tener cantidades variables de impurezas. Así, su contenido en plata puede alcanzar el 1%. Se encuentra de forma cristalina o maciza. Se halla tanto en rocas metamórficas como en depósitos volcánicos de sulfuros, en los últimos a menudo acompañada por minerales de cobre.
Gismondina	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$	Mineral de la clase de los tectosilicatos, y dentro de esta pertenece al llamado grupo de las zeolitas. Es un aluminosilicato de calcio. Es una zeolita comparativamente poco frecuente, que se encuentra habitualmente en cavidades de distintos tipos de rocas volcánicas, asociada a otras zeolitas, como la philipsita-Ca. También aparece en fisuras de rocas calcosilicatadas, formada por acción hidrotermal.
Gladita	$\text{PbCuBi}_5\text{S}_9$	Origen Hidrotermal. Sulfuros y sulfosales.
Gmelinita	$(\text{Si}_8\text{Al}_4)\text{O}_{24} \cdot 11\text{H}_2\text{O}$	Es una serie de tres minerales con el mismo nombre, de la clase de los tectosilicatos y dentro de estos del "grupo de las zeolitas". Aparece en rocas tipo basalto y pegmatitas, por alteración secundaria debida a la acción de fluidos que circulan enriquecidos en sodio. Minerales a los que normalmente aparece asociado son: otras zeolitas, calcita, aragonito y cuarzo.
Gobbinsita	$\text{Na}_5(\text{Si}_{11}\text{Al}_5)\text{O}_{32} \cdot 11\text{H}_2\text{O}$	Grupo de zeolita. Silicatos (germanatos). Formados en fluidos ricos en sodio, en basaltos y rocas volcánicas.
Grimaldita	$\text{CrO}(\text{OH})$	Óxidos (hidróxidos, vanadatos V [5,6], arsenitos, antimonitas, bismutitos, sulfitos, selenitos, teluritos, yodatos). Encontrado en algunos desechos de procesamiento de las fábricas de cromita.
Gutsevichita	$\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Fosfatos, arsenatos y vanadatos. Cristalización amorfa.
Halita	NaCl	La halita, sal gema o sal de roca es un mineral sedimentario, el cual se puede formar por la evaporación de agua salada, en depósitos sedimentarios y domos salinos. Está asociada con silvita, carnalita y otros minerales. Su composición química es cloruro de sodio.
Halloysita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	De la clase de los filosilicatos. Químicamente es un aluminosilicato hidroxilado. El material está constituido por aluminio (20,90%), silicio (21,76%) e hidrógeno (1,56%). La halloysita se forma generalmente por la alteración hidrotermal de minerales aluminio-silicatos.
Heliophyllita	$\text{Pb}_6\text{Cl}_4(\text{As}_2\text{O}_7)$	Oxihaluros, hidroxihaluros y haluros dobles relacionados. Mineral secundario.
Hematita	Fe_2O_3	Es la forma mineral del óxido férrico. La hematita constituye

		la mena más importante de hierro.
Hisingerita	$\text{Fe}^{3+}_2 \text{Si}_2\text{O}_5 (\text{O H})_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Mineral, filossilicato de hierro (III) secundario brillante, de color negro o marrón oscuro, que se ha formado por la meteorización o alteración hidrotermal de otros minerales de silicato y sulfuro de hierro
Hidrofilita	CaCl_2	Mineral de la clase de los minerales haluros. Es un cloruro hidratado de calcio.
Illita	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}$	Mineral de la clase 9 silicatos, según la clasificación de Strunz, del grupo de las micas. Es una arcilla no expansiva, micácea. La illita es un filossilicato o silicato laminar.
Hierro	Fe	Este metal de transición es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre y, entre los metales, solo el aluminio es más abundante; y es el primero más abundante en masa planetaria, el núcleo concentra la mayor masa de hierro, equivalente a un 70 %.
Lantanita	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})_2(\text{C O}_3)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mineral de la clase de los carbonatos . Contiene elementos de serie de los lantánidos , con cerio (Ce) como elemento dominante. Es un mineral secundario poco frecuente, formado normalmente por la alteración y la meteorización de minerales que contienen elementos de tierras raras .
Litargirio	PbO	Mineral de la clase de los minerales óxidos cuya fórmula química corresponde al óxido de plomo. Aparece como mineral secundario en yacimientos de otros minerales del plomo como producto de la alteración de estos.
Lizardita	$\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	Las serpentinas constituyen un grupo de minerales que se caracterizan por no presentarse en forma de cristales, excepto en el caso de pseudomorfismo. Son productos de alteración de ciertos silicatos magnésicos, especialmente olivino, piroxenos y anfíboles. Usado para obtención de hierro acerado, en la talla de esculturas y como sustrato para el cultivo de plantas hiper acumuladoras de níquel.
Lorandita	TlAsS_2	Mineral de la clase de los minerales sulfuros. Aparece como mineral secundario en zonas de alteración hidrotermal, típico de baja temperatura. Aunque es un mineral raro, es el mineral de talio de más amplia distribución por todo el mundo.
Magnesia	MgO	Compuesto químico mineral sólido higroscópico blanco que se produce en la naturaleza como periclasa y es una fuente de magnesio. El óxido de magnesio se produce por la calcinación del carbonato de magnesio o del hidróxido de magnesio.
Magnesioferrita	$\text{MgFe}^{3+}_2\text{O}_4$	Es un mineral de la clase de los minerales óxidos, y dentro de esta pertenece al llamado "grupo de la espinela".
Magnetita	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$	Es un mineral de hierro constituido por óxido ferroso-diférrico, accesorio en casi todas las rocas básicas, formado por diferenciación magmática o metamorfismo de contacto. Puede tener también origen hidrotermal y sedimentario.
Margarita	$\text{CaAl}_2(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2$	Mineral de la clase de los Silicatos, subgrupo Filossilicatos y dentro de ellos pertenece a las micas frágiles. Es un hidroxilisicato de calcio y aluminio. Aparece en rocas metamórficas, asociado al metamorfismo regional, principalmente en pizarras cloríticas y micasquistos. En estas rocas, se forma como producto de alteración de corindón, andalucita y otros minerales del aluminio.
Maghemita	$\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3$	Una de las formas minerales del óxido de hierro (III). Es un mineral que se forma por meteorización u oxidación a baja temperatura de espinelas que contengan cationes de Fe^{2+} , habitualmente magnetita o magnetita titanífera.
Moissanita	SiC	La moissanita es un mineral del grupo IB (semimetales y no

		metales), según la clasificación de Strunz. Originalmente referido a un mineral raro descubierto por Henri Moissan, tiene por fórmula química sic, y varios polimorfos. Anteriormente, este material había sido sintetizado en el laboratorio y fue denominado carburo de silicio.
Montmorillonita	$(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}^1$	Mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las llamadas arcillas. Es un hidroxisilicato de magnesio y aluminio, con otros posibles elementos.
Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las micas aluminicas. Químicamente es un aluminosilicato de potasio y aluminio, que puede llevar magnesio, cromo y una gran variedad de otros elementos en sus numerosas variedades. La moscovita es componente mineral primario en muchas rocas ígneas de tipo ácido, como en granitos y pegmatitas.
Neotocita	$(\text{Mn,Fe,Mg})\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Silicatos, filosilicatos. Silicato hidratado con óxidos de Mn, Fe y Cu. Mineral secundario de a alteración de rodonita u otros magnesianosilicatos.
Nontronita	$(\text{CaO}_{0,5},\text{Na})_{0,3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Mineral de la clase de los filosilicatos, y dentro de esta pertenece al llamado "grupo de la esméctica". Aparece como mineral secundario producto de la alteración a la intemperie de rocas ígneas de tipo basalto, kimberlitas y otras rocas ultramáficas. Algunos depósitos de minerales sometidos a alteración hidrotermal de tipo basalto o calizas con metamorfismo de contacto.
Ópalo	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Tiene una composición similar a la del cuarzo del que se diferencia porque tiene moléculas de agua en su interior. Silicatos, tectosilicatos.
Ortoclasa	KAlSi_3O_8	Mineral de la clase 9 (silicatos), subgrupo tectosilicatos, y dentro de ellos pertenece a los feldespatos.
Paladio	(Pd,Pt)	Es un metal de transición del grupo del platino, blando, dúctil, maleable y poco abundante. Se parece químicamente al platino y se extrae de algunas minas de cobre y níquel. Se emplea principalmente como catalizador y en joyería.
Periclasa	MgO	La forma mineral del óxido de magnesio. La periclasa se forma normalmente en mármol como producto del metamorfismo de rocas sedimentarias dolomíticas. Se forma por alteración de la brucita bajo ciertas condiciones ambientales cerca de la superficie del terreno.
Petrovicita	$\text{Cu}_3\text{HgPbBiSe}_5$	Sulfuros y sulfosales con plomo esencial.
Pigeonita	$(\text{Ca,Mg,Fe})(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$	Mineral de la clase de los inosilicatos sin aluminio anhidro de magnesio, hierro o calcio y dentro de esta pertenece al llamado "grupo del piroxeno" de cadena simple, y subgrupo del clinopiroxenos que son los que cristalizan en el sistema cristalino monoclinico.
Piromorfita	$\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	Mineral de la clase de los fosfatos, y dentro de esta pertenece al llamado "grupo del apatito". Es un fosfato de plomo anhidro con aniones adicionales de cloruro. Mineral secundario relativamente frecuente, que se encuentra en la zona de oxidación de los yacimientos del plomo, donde se caracteriza por sus típicos cristales prismáticos con forma de barril de tono generalmente verdoso.
Plombierita	$[\text{Ca}_4\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2]$	Mineral de la clase de los inosilicatos, y dentro de esta pertenece al llamado "de la tobermorita". Es un silicato hidroxilado e hidratado

	$2\text{H}_2\text{O} \cdot (\text{Ca} \cdot 5\text{H}_2\text{O})$	de calcio. Aparece como producto de la alteración hidrotermal de rocas de carbonato cálcico, debido a metamorfismo de contacto y metasomatismo.
Plomo	Pb	El plomo es un metal pesado rara vez se encuentra en su estado elemental. Se presenta comúnmente como sulfuro de plomo en la galena.
Plumboferrita	$\text{Pb}_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Mg})_{11}\text{O}_{19}$	Es la forma mineral de un óxido múltiple de composición. Su contenido en Fe_2O_3 es de aproximadamente el 63% y en PbO el 34%. En menor medida están presentes MnO (más del 1%), FeO, MgO y CaO.
Polydymita	$\text{Ni}^{2+}\text{Ni}^{3+}_2\text{S}_4$	Sulfuros y sulfosales. Se encuentra en las venas hidrotermales.
Rankinita	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$	Monocíclico, silicatos, sorosilicatos.
Rayita	$\text{Pb}_8(\text{Ag}, \text{Ti})_2\text{Sb}_8\text{S}_{21}$	Sulfuros y sulfosales. Sulfosales de arquetipo de sns. En los depósitos de sulfuro masivo polimetálicos precámbricos intercalados con esquistos de grafito y cianita, calcsilicatos que contienen diópsido y metaquelatos.
Rooseveltita	$\text{Bi}(\text{AsO}_4)$	Fosfatos, arseniatos, vanadatos. Muy raro.
Saponita	$\text{Ca}_{0.25}(\text{Mg}, \text{Fe})_3((\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Mineral de la clase de los filosilicatos, y pertenece al llamado "grupo de las esmectitas". Filosilicatos monoclinicos hidratados dentro del grupo más grande de los llamados minerales de la arcilla.
Sauconita	$\text{Na}_{0.3}\text{Zn}_3((\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Es un aluminosilicato hidroxilado e hidratado de sodio y de cinc. El grupo de la esmectita en que se encuadra son minerales de arcillas del sistema monoclinico.
Schachnerita	$\text{Ag}_{1.1}\text{Hg}_{0.9}$	Aparece como mineral secundario en las zonas de oxidación de yacimientos de plata y mercurio, formado mediante la alteración de la moschellandsbergita. Aparece en forma de masas en las zonas oxidadas de los yacimientos de minerales del cinc y cobre. Puede aparecer como redeposición en aguas estancadas.
Seinäjokita	$(\text{Fe}, \text{Ni})(\text{Sb}, \text{As})_2$	Sulfuros y sulfosales. Sulfuros con metal.
Silvita	KCl	Es una roca sedimentaria salina formada como evaporita, puede considerarse sinónimo de su componente fundamental, el mineral silvina.
Titanita	CaTiSiO_5	Mineral de la clase Silicatos, subclase Nesosilicatos. Es un mineral muy común en las roca magmática ácidas e intermedias. También aparece en rocas metamórficas tales como gneis, micasquistos y anfibolitas, abundando en rocas de metamorfismo de contacto y en los filones hidrotermales. Grupo de los haluros.
Tridimita	SiO_2	Es un polimorfo del SiO_2 . Clase de los minerales óxidos. Frecuentemente aparece en cavidades en las rocas volcánicas en todo el mundo.
Truscottita	$(\text{Ca}, \text{Mn})_{14}\text{Si}_{24}\text{O}_{58}(\text{OH})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Silicatos, filosilicatos. Redes tetraédricas simples de anillos de 6 miembros conectadas por redes octaédricas o bandas octaédricas
Turmalina roja	$\text{Ti}_5\text{Sb}_5\text{As}_8\text{S}_{22}$	Minerales de la clase VIII (silicatos), según la clasificación de Strunz, grupo de los ciclosilicatos. La turmalina se encuentra en pegmatitas graníticas pero también en rocas metamórficas como gneises que han sido alteradas en su composición por aguas hidrotermales con contenido en boratos.
Vermiculita	$\text{Mg}_{0.7}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Es un mineral formado por silicatos de hierro o magnesio, del grupo de las micas. Un término genérico para un mineral de la familia de la mica compuesto básicamente por silicatos de aluminio,

		magnesio y de hierro. Su forma natural es la de una mica de color pardo y estructura laminar, conteniendo agua interlaminada.
Volkonskoíta	$\text{Ca}_{0.3}(\text{Cr}, \text{Mg}, \text{Fe})_2((\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Mineral de la clase de los filosilicatos, y dentro de esta pertenece al llamado "grupo de la esmectita". Es un aluminosilicato hidroxilado e hidratado de calcio, cromo y magnesio, que cristaliza como filosilicato en el sistema cristalino monoclinico.
Whitneyita	Cu	Génesis Secundaria, Tetraedros, dodecaedros, hexaedros. Sulfuros y sulfosales.
Wurtzita	ZnS	La wurtzita es una de las formas cristalinas del sulfuro de cinc. Como impurezas puede contener pequeñas cantidades de cadmio —hasta el 4%— y hierro —hasta el 8%.
Wustita	FeO	Mineral de la clase de los minerales óxidos de composición FeO. Se forma como un producto de la alteración de otros minerales del hierro a altas temperaturas en un ambiente altamente reductor, así como en basaltos con hierro en ambiente reductor. La wustita se encuentra principalmente en meteoritos y en escorias antropogénicas.
Yakhontovita	$(\text{Ca}, \text{Na})_{0.5}(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Mineral de la clase de los silicatos, que pertenece al grupo del Esmectita. Fue descubierta en 1984 en el depósito de estaño en filones y revestimientos de mineral de sulfuro y casiterita oxidados.
Yeelmita	$\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}(\text{SO}_4)$	Resultado de la calcinación de minerales carbonatados.
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Es un mineral compuesto de sulfato de calcio hidratado, puede aparecer por la reacción entre el ácido sulfúrico formado por la oxidación de sulfuros con rocas carbonatadas. El mineral de yeso es un constituyente común de rocas sedimentarias, particularmente depósitos de sal marina, y suelos formados directamente por evaporación o más tarde por hidratación de anhidrita. Los depósitos de yeso se originaron como consecuencia de la evaporación de disoluciones acuosas sobresaturadas en lagos o mares de poca profundidad.

Fuentes: Wikipedia, WebMineral.com y MinDat.org.