



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

Determinación de concentraciones totales de elementos  
potencialmente tóxicos en suelos superficiales y subsuperficiales  
dentro de una planta de Zn utilizando Espectrometría de Fluorescencia  
de Rayos X para evaluar el impacto ambiental

**TESIS**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**LICENCIADA EN QUÍMICA**

**PRESENTA:**  
NORMA FABIOLA DÍAZ GARCIA

**ASESOR: Dra. Agueda Elena Ceniceros Gómez**

**Cuatitlán Izcalli, Estado de México, 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis.

Determinación de concentraciones totales de elementos potencialmente tóxicos en suelos superficiales y subsuperficiales dentro de una planta de Zn utilizando Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X para evaluar el impacto ambiental

Que presenta la pasante: Norma Fabiola Díaz García  
Con número de cuenta: 413110905 para obtener el Título de la carrera: Licenciatura en Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 19 de Agosto de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	<u>Dra. Ana Leticia Fernández Osorio</u>	<u>Ana Leticia Fernández Osorio</u>
<b>VOCAL</b>	<u>Dr. Arturo Aguirre Gómez</u>	<u>Arturo Aguirre Gómez</u>
<b>SECRETARIO</b>	<u>Dra. Agueda Elena Cenicerros Gómez</u>	<u>Agueda Cenicerros Gómez</u>
<b>1er. SUPLENTE</b>	<u>Dr. Alejandro Solano Peralta</u>	<u>Alejandro Solano Peralta</u>
<b>2do. SUPLENTE</b>	<u>Dr. Julio César Morales Mejía</u>	<u>Julio César Morales Mejía</u>

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

## **Agradecimientos**

Sabiendo que no habrá manera de recompensar una vida de esfuerzo y sacrificio agradezco infinitamente a mis queridos padres y hermanos, por haber sido parte del camino, por su paciencia y apoyo incondicional.

A mi madre, por ser una mujer ejemplar y admirable que a pesar de las adversidades ha sabido seguir adelante, que me ha dado su apoyo, cariño incondicional y me ha brindado total confianza. Adorada Julia de mis sueños, te quiero mucho. A mi padre, Don David por mantenerse al pendiente y quien a su manera ha contribuido para que esto fuera posible.

A mis tres queridos hermanos, Rocío, quien ha sido una inspiración para mí y que me ha brindado su apoyo, a mi adorada y especial Ana por escucharme y darme sus consejos, y a mi gran Daniel que a su manera ha estado presente alentándome.

A mis queridas y adoradas hermanas adoptivas, Francly y Bety quienes me han enseñado el valor de la amistad y de la familia fuera de casa, gracias por sus consejos y cariño.

A mis amigos, quienes son como mi segunda familia y con quienes he compartido momentos y experiencias inolvidables.

A mi asesora Dra. Agueda Elena Ceniceros Gómez por su ayuda, apoyo y paciencia para ser parte de este proyecto.

Al personal técnico de LABQA, Reyna Roldan, Ruth López y Leiny López por brindarme su conocimiento, apoyo, y asesoría con los equipos y técnicas utilizadas en el laboratorio.

A la Dra. Margarita Gutiérrez responsable de LABQA por permitirme el uso de las instalaciones así como de los equipos del laboratorio y hacer posible este proyecto.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán UNAM por permitirme adquirir los conocimientos y herramientas necesarias para mi desarrollo profesional, así como a los profesores que hicieron que esto fuera posible compartiendo sus conocimientos y experiencia.

A todas y cada una de las personas que fueron parte de este camino y se tomaron el tiempo y esfuerzo para ayudarme a culminarlo, les estoy infinitamente agradecida.

*"Maktub"*

## Contenido

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>Justificación</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 1. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
1.1 Suelo	5
1.2 Textura	8
1.3 Valores de fondo geoquímico	10
1.4 Química ambiental de suelos	11
1.5 Remediación de suelos	11
1.6 Normatividad ambiental relacionada con la contaminación de suelos por la minería	16
1.6.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente	16
1.6.2 NMX-AA-132-SCFI-2016	16
1.6.3 Tipos de muestreo	17
1.6.4 NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	18
1.7 Técnicas utilizadas para caracterización y cuantificación de elementos potencialmente tóxicos en suelos	20
1.7.1 Espectroscopia de Absorción Atómica	20
1.7.2 Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)	21
1.7.3 Difracción de rayos X	22
1.7.4 Espectrometría de fluorescencia de rayos X	23
1.8 Fluorescencia de rayos X de campo portable	24
1.8.1 Fluorescencia de Rayos X	24
1.8.2 Analizador portátil FRX marca Olympus modelo Delta Professional	25
1.8.3 Funcionamiento del equipo FPXRF	26
1.8.4 Medición	28
1.8.6 Sensibilidad y límites de detección	28
1.8.7 Interferencias	29
1.8.8 Aplicaciones de fluorescencia de rayos X de campo portable	31
1.9 Descripción de la zona de estudio	33
1.9.1 Ubicación geográfica del Estado de Coahuila	33
1.9.2 Clima	33
1.9.3 Edafología y geología	35
1.9.4 Minería	39

<b>Capítulo 2. Metodología</b>	<b>43</b>
2.1 Muestreo	43
2.1.1 Técnica de muestreo	44
2.1.2 Manejo y control de las muestras	44
2.1.3 Traslado de las muestras y cadena de custodia	44
2.1.4 Aseguramiento y control de la calidad del muestreo	44
2.2 Preparación de la muestra	44
2.2.1 Recepción y registro	44
2.2.2 Secado	44
2.2.3 Cribado	45
2.2.4 Homogeneizado y cuarteo	45
2.2.5 Molienda	45
2.3 Análisis por fluorescencia de rayos X de campo portátil (FPXRF)	45
2.3.1 Análisis mediante el equipo portátil de fluorescencia de rayos X	46
<b>Capítulo 3. Resultados y discusión</b>	<b>50</b>
3.1 Muestreo	50
3.2 Cuantificación de elementos por espectrometría de fluorescencia de rayos X	52
<b>Capítulo 4. Conclusiones</b>	<b>118</b>
<b>Referencias</b>	<b>120</b>
<b>Anexo I. Especificaciones del Analizador de FRX Olympus Delta Professional</b>	<b>124</b>
<b>Anexo II. Pruebas iniciales de desempeño (PIDs)</b>	<b>125</b>
<b>Anexo III. Historia y fundamentos sobre FPXRF</b>	<b>126</b>
<b>Anexo IV. Modos de análisis de FPXRF</b>	<b>128</b>
<b>Anexo V. Cuantificación de elementos por medio de PFXRF</b>	<b>129</b>
<b>Anexo VI. Costos FPXRF e ICP-OES de acuerdo con el LABQA, 2017</b>	<b>131</b>
<b>Anexo VII. Alcance de la técnica FPXRF en comparación con ICP-OES</b>	<b>132</b>
<b>Anexo VIII. Coordenadas y clave de campo de las muestras tomadas como suelos de fondo geoquímico y de suelos superficiales y subsuperficiales</b>	<b>136</b>
<b>Anexo IX. Compendio de gráficos y figuras a partir de los cuales fueron seleccionados los de mayor interés para la discusión de resultados</b>	<b>143</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Características de las partículas del suelo (Honorato, 2000)	9
Tabla 2. Características de las fracciones granulométricas (Honorato, 2000)	10
Tabla 3. Ventajas y desventajas de técnicas in situ y ex situ utilizadas en remediación de suelos (adaptación de Sparks, 2003)	13
Tabla 4. Características, ventajas y desventajas de la biodegradación in situ y ex situ	14
Tabla 5. Concentraciones de referencia totales ( $CR_T$ ) por tipo de uso de suelo	19
Tabla 6. Concentraciones solubles de referencia de los EPTs solubles (CRs)	19
Tabla 7. Analitos y límites de detección en el alcance de este método (LABQA)	24
Tabla 8. Descripción de las interferencias que pueden presentarse en FPXRF (EPA 6200)	29
Tabla 9. Ventajas y desventajas de la identificación y cuantificación de elementos por FPXRF	32
Tabla 10. Descripción de suelos dominantes en el municipio de San Juan de Sabinas	38
Tabla 12. Características del análisis con el equipo de PXRF en modo suelos y geoquímico	47
Tabla 11. Controles de calidad utilizados para el análisis con el equipo FPXRF modo suelos y geoquímico y sus criterios de aceptación	49
Tabla 13. Concentraciones totales de suelos superficiales determinadas por FPXRF	53
Tabla 14. Coeficientes de correlación entre las concentraciones totales de As, Cd, Pb en suelos superficiales por la técnica de FPXRF	54
Tabla 15. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 1 obtenidos por FPXRF	61
Tabla 16. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 2 obtenidos por FPXRF	61
Tabla 17. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 3 obtenidos por FPXRF	62
Tabla 18. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 4 obtenidos por FPXRF	62
Tabla 19. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 5 obtenidos por FPXRF	63
Tabla 20. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 6 obtenidos por FPXRF	63
Tabla 21. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 7 obtenidos por FPXRF	64
Tabla 22. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 8 obtenidos por FPXRF	64
Tabla 23. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 9 obtenidos por FPXRF	65
Tabla 24. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 10 obtenidos por FPXRF	65
Tabla 25. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 11 obtenidos por FPXRF	66
Tabla 26. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 12 obtenidos por FPXRF	66

Tabla 27. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 13 obtenidos por FPXRF	67
Tabla 28. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 14 obtenidos por FPXRF	67
Tabla 29. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 15 obtenidos por FPXRF	68
Tabla 30. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 16 obtenidos por FPXRF	68
Tabla 31. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 17 obtenidos por FPXRF	69
Tabla 32. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 18 obtenidos por FPXRF	69
Tabla 33. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 19 obtenidos por FPXRF	70
Tabla 34. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 20 obtenidos por FPXRF	70
Tabla 35. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 21 obtenidos por FPXRF	71
Tabla 36. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 22 obtenidos por FPXRF	71
Tabla 37. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 23 obtenidos por FPXRF	72
Tabla 38. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 24 obtenidos por FPXRF	72
Tabla 39. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 25 obtenidos por FPXRF	73
Tabla 40. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 26 obtenidos por FPXRF	73
Tabla 41. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 27 obtenidos por FPXRF	74
Tabla 42. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 28 obtenidos por FPXRF	74
Tabla 43. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 29 obtenidos por FPXRF	75
Tabla 44. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 30 obtenidos por FPXRF	75
Tabla 45. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 31 obtenidos por FPXRF	76
Tabla 46. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 32 obtenidos por FPXRF	76
Tabla 47. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 33 obtenidos por FPXRF	77
Tabla 48. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 34 obtenidos por FPXRF	77

Tabla 49. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 35 obtenidos por FPXRF	78
Tabla 50. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 36 obtenidos por FPXRF	78
Tabla 51. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 37 obtenidos por FPXRF	79
Tabla 52. Resultados de las concentraciones elementales de suelos de fondo determinados por FPXRF	81
Tabla 53. Resumen de parámetros estadísticos para las concentraciones de suelos de fondo y suelos superficiales y sub-superficiales del área de estudio	82
Tabla 54. Coeficientes de correlación entre resultados de las concentraciones elementales de As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn, Ni y Fe de suelos superficiales y subsuperficiales	83
Tabla 55. Coeficiente de correlación entre las concentraciones de As, Cd, Pb en suelos subsuperficiales	83
Tabla 56. Información para la caracterización de sitio y elaboración del modelo conceptual	114
Tabla 57. Resumen de la comparación entre FPXRF e ICP-OES	135
Tabla 58. Coordenadas y clave de campo de las muestras tomadas como suelos de fondo geoquímico	136
Tabla 59. Coordenadas, profundidad y clave de campo de las muestras de suelos superficiales y sub-superficiales	136

## Índice de figuras

Figura 1. Evolución y horizonización de un suelo (Ibañez, 2008 citado de Ministerio de Agricultura, CONAF)	6
Figura 2. Perfil del suelo formado por diferentes horizontes (Gobierno Argentina, 2017)	7
Figura 3. Diagrama de aplicación del proceso de electrocinética (De la Rosa et al, 2007)	15
Figura 4. Esquema de un espectrómetro de absorción atómica (Cornelis, Klein 2001)	21
Figura 5. Esquema de un equipo de ICP-OES (tomada de IDEAM, 2006)	22
Figura 6. Funcionamiento de la técnica difracción de rayos X (López, 2018)	23
Figura 7. Esquemización del fenómeno de fluorescencia de rayos X (Calvero, 2006)	24
Figura 8. Representación de las líneas $K\alpha$ y $K\beta$ (Biotechnics, 2014)	26
Figura 9. Componentes principales para el funcionamiento de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X (Figueroa, 2018)	27
Figura 10. Localización del municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila (INEGI, 2005)	33
Figura 11. Tipos de climas del municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila (INEGI, 2005)	34
Figura 12. Tipos de suelos presentes en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila (INEGI, 2005)	36
Figura 13. Clase de rocas presentes en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila (INEGI, 2005)	37
Figura 14. Superficie Relativa de los principales grupos de suelo en México (INEGI, 2007)	38
Figura 15. Proceso para la conformación de un modelo conceptual (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004)	40
Figura 16. Ejemplo de integración y representación del modelo conceptual. (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004)	42
Figura 17. Mapa de distribución de muestreo de suelos (Instituto de Geología UNAM, 2018)	43
Figura 18. Mapa de distribución de muestreo de suelos (Instituto de Geología UNAM, 2018)	51
Figura 19. Zanjas significativas de la zona de muestreo	51
Figura 20. Mapa de concentraciones de As-Superficial obtenidas por FPXRF	56
Figura 21. Mapa de concentraciones de Cd-Superficial obtenidas por FPXRF	58
Figura 22. Mapa de concentraciones de Pb superficiales obtenidas por FPXRF	59
Figura 23. Perfiles de suelos tomados de diferentes zanjas	60
Figura 24. Mapa de distribución de los valores de fondo (Instituto de Geología UNAM, 2018)	80
Figura 25. Mapa de distribución de concentraciones de As a una profundidad de 25-50 cm	106
Figura 26. Mapa de distribución de concentraciones de As a una profundidad 75-100	106
Figura 27. Mapa de distribución de concentraciones de Cd a una profundidad de 5-25 cm	107
Figura 28. Mapa de distribución de concentraciones de Cd a una profundidad de 25-50 cm	107
Figura 29. Mapa de distribución de concentraciones de Cd a una profundidad de 75-100 cm	108
Figura 30. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 5-25 cm	109
Figura 31. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 25-50 cm	110
Figura 32. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 50-75 cm	111
Figura 33. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 75-100 cm	111
Figura 34. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 100-125 cm	112

Figura 35. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 125-150 cm	113
Figura 36. Modelo conceptual para la representación del riesgo potencial de exposición a organismos vivos presentes en la zona de estudio	115
Figura 37. Difracción de los rayos X por los planos de un cristal (Martínez, 2019)	127

## Índice de gráficos

Gráfico 1. Concentraciones superficiales de As ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenidas por FPXRF por zanja o punto de muestreo	55
Gráfico 2. Concentraciones superficiales de Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenidas por FPXRF por zanja o punto de muestreo	57
Gráfico 3. Concentraciones superficiales de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenidas por FPXRF por zanja o punto de muestreo	59
Gráfico 4. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 3	84
Gráfico 5. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 6	85
Gráfico 6. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 8	85
Gráfico 7. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 9	86
Gráfico 8. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 10	87
Gráfico 9. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 14	87
Gráfico 10. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 15	88
Gráfico 11. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 19	88
Gráfico 12. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 20	89
Gráfico 13. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 23	90
Gráfico 14. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 24	90
Gráfico 15. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 25	91
Gráfico 16. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 30	91
Gráfico 17. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 36	92
Gráfico 18. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 37	93
Gráfico 19. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 1-5	94
Gráfico 20. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 6-10	95
Gráfico 21. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 11-15	96

Gráfico 22. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 16-20	97
Gráfico 23. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 21-25	98
Gráfico 24. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 26-30	99
Gráfico 25. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 31-35	100
Gráfico 26. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 36-37	101
Gráfico 27. Concentración de Sb ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 3, 4, 9, 10 y 14	102
Gráfico 28. Concentración de Sb ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 15, 19, 20, 21 y 24	102
Gráfico 29. Concentración de Sb ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 29, 36 y 37	103
Gráfico 30. Concentración de Zn ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 9, 12, 14, 15, 36 y 37	104
Gráfico 31. Regresión lineal de concentraciones de ICP vs FPXRF para As	133
Gráfico 32. Regresión lineal de concentraciones de ICP vs FPXRF para Cd	133
Gráfico 33. Regresión lineal de concentraciones de ICP vs FPXRF para Pb	134

## Lista de abreviaturas

**µm:** micrometros

**AAS:** Atomic Absorption Spectrometry

**cm<sup>2</sup>:** centímetros cuadrados

**CPU:** Central Processing Unit

**DER:** Desviación Estándar Relativa

**DP:** Delta Professional

**EDTA:** Ácido etilendiaminotetraacético

**EPA:** Environmental Protection Agency

**EPTs:** Elementos Potencialmente Tóxicos

**eV:** Electronvolts

**FPXRF:** Fluorescencia de Rayos x de  
Campo Portátil

**g:** gramos

**GPS:** Global Positioning System

**ICP-OES:** Inductively Coupled Plasma Optic  
Emission Spectrometry

**INEGI:** Instituto Nacional de Estadística y  
Geografía

**K:** Kelvin

**kg:** kilogramo

**km<sup>2</sup>:** Kilometros cuadrados

**LABQA:** Laboratorio de Biogeoquímica  
Ambiental

**LD:** Límite de Detección

**MCA:** Multichannel Analyzer

**mg:** miligramos

**min:** Minutos

**mm:** milímetros

**NA:** No aplica, ya que es un elemento que  
no se encuentra normado en la NOM-  
147-SEMARNAT/SAA1-2004

**ND:** No detectado

**NOM:** Norma Oficial Mexicana

**rpm:** Revoluciones por minuto

**SEMARNAT:** Secretaría de Medio Ambiente  
y Recursos Naturales

**SGM:** Servicio Geológico Mexicano

**XRF:** Fluorescencia de Rayos X

## Resumen

En el presente trabajo se determinaron las concentraciones totales de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como As, Cd, Cr, Pb, Sb y Ni además de Cu, Mn, Zn y Fe en suelos superficiales y subsuperficiales dentro de una planta de Zn en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila, utilizando como técnica de análisis la fluorescencia de rayos X de campo portable. Una de las ventajas que ofrece esta técnica son: costos bajos, los cuales se ven reducidos hasta una tercera parte en comparación con un análisis realizado por espectroscopía de emisión óptica acoplada con plasma inductivamente, por sus siglas en inglés ICP-OES, otra ventaja es el tiempo bajo invertido en el análisis, ya que la preparación de muestra es menor y no se requiere una digestión, por lo que el tiempo de análisis se reduce a la mitad; y por último no se generan residuos ácidos, por lo cual se considera como una técnica de análisis sostenible.

De los elementos normados por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, el As, el Cd y el Pb superan las concentraciones límite permitidas para suelos de uso residencial/agrícola e industrial. También se obtuvo que el Sb se encuentra en altas concentraciones, y que a pesar de no encontrarse normado por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, es de interés debido a que la Organización Mundial de la Salud (OMS) considera un límite máximo permisible de 36 mg·kg<sup>-1</sup> en suelos por lo cual también debe de considerarse como un elemento potencialmente tóxico (EPT).

Con ayuda de un software como Sistema de Información Geográfica (QGIS 3.2), se delimitó el área contaminada por el As, el Cd y el Pb, siendo esta de 30 hectáreas.

La profundidad de la contaminación se delimitó a 100 cm, y para delimitarla se realizó un análisis vertical de los elementos en concentraciones superiores a las permitidas por la norma. Por otro lado, con la ayuda de un modelo conceptual dado por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, se propusieron las posibles rutas de exposición, así como los posibles organismos afectados y la manera de contacto.

Se proyectó a futuro como un posible método de remediación, un lavado de suelos combinado con un tamizado, con los cuales los resultados son favorables para la remediación del As, el Cd, el Pb y el Zn considerando las siguientes condiciones: pH= 2, T=30°C, proporción líquido: suelo 10:1 y la realización de 3 extracciones sucesivas de 30 minutos, con una concentración de 0.5% de ramnolípidos.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Realizar la cuantificación de los elementos potencialmente tóxicos As, Cd, Cr, Mn, Pb, Sb, y Ni además de Cu, Zn y Fe en suelos superficiales y sub-superficiales del municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila impactados por residuos minero-metalúrgicos, por medio de fluorescencia de rayos X de campo portable, para definir la naturaleza y extensión de la contaminación.

### **Objetivos específicos**

- Evaluar el uso de la técnica de fluorescencia de rayos X de campo portable como una técnica de análisis cualitativo y cuantitativo para dar cumplimiento a la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, y proponerse como un método alternativo a ICP-OES como análisis primario o de monitoreo.
- Evaluar los resultados obtenidos de la cuantificación de elementos potencialmente tóxicos en los suelos superficiales y sub-superficiales impactados por la minería, y en caso de contaminación con respecto a los niveles permitidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, para suelos de uso industrial delimitar la extensión de la contaminación.
- Proponer un método de remediación acorde con las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos que sobrepasen los límites establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y la extensión de terreno impactado.

## **Introducción**

Las actividades mineras conllevan a avances técnicos y científicos significativos, sin embargo, producen impactos negativos en el ambiente y sobre las comunidades locales. México es el país latinoamericano que destina mayor inversión en exploración minera, y es el cuarto a nivel mundial. Esta actividad se caracteriza por generar un alto volumen de residuos, de los cuales algunos, debido a sus elementos constituyentes son potencialmente tóxicos y pueden generar un riesgo a la salud y al ambiente, si ocurre un mal manejo de estos; con el fin de identificar su peligrosidad y sus opciones de manejo, es necesaria la caracterización adecuada de los residuos generados, considerando cualquier elemento que pueda representar un riesgo a la salud de poblaciones aledañas, así como al ecosistema. La dispersión de los residuos mineros no confinados ha impactado suelos de zonas industriales; en México desde 2004 se cuenta con la norma oficial mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para caracterizar suelos contaminados con elementos potencialmente tóxicos, y determinar las concentraciones de remediación.

La espectrometría de fluorescencia de rayos X portátil es una herramienta importante para caracterizar suelos, ya que ésta permite, de manera rápida, fácil, precisa y no destructiva, realizar análisis multielementales simultáneos tanto cualitativos como cuantitativos de algunos materiales. Es una técnica de monitoreo que tiene gran relevancia en estudios mineralógicos, geológicos y ambientales, lo cual es muy importante para los programas de protección ambiental y para dar una respuesta rápida de solución, valorando métodos y tecnologías que sean económica, técnica y ambientalmente factibles por lo que se plantea su uso para cuantificar los elementos potencialmente tóxicos en suelos impactados por residuos mineros y hacer una propuesta de remediación.

## **Justificación**

En México, al igual que en otros países, existen áreas contaminadas debido a las actividades mineras que se han llevado a cabo a través del tiempo, algunos sitios contaminados se deben a la escasez de especificaciones ambientales, y a las formas de producción en el pasado, lo que causa incertidumbre acerca de las acciones que se deben realizar para el mejoramiento del sitio. Debido a esta problemática, existe una creciente atención de la población hacia la protección del ambiente.

La espectrometría de fluorescencia de rayos X es una técnica de análisis elemental que no requiere preparación previa de la muestra, y ofrece las ventajas de dar resultados precisos y rápidos, brindando una caracterización cualitativa y cuantitativa del material en estudio; debido a esto tiene una gran importancia en estudios mineralógicos, geológicos, medioambientales, metalúrgicos.

El presente estudio tiene la finalidad de realizar una determinación de concentraciones totales de elementos potencialmente tóxicos en suelos impactados con residuos mineros a través de un equipo portátil de campo de fluorescencia de Rayos X y conocido por sus siglas en inglés FPXRF (Field Portable X Ray Fluorescence).

# Capítulo 1. Marco Teórico

## 1.1 Suelo

Todos los componentes de soporte de la vida derivan, ya sea de manera directa o indirecta, del suelo, haciendo de este parte esencial de la vida. Las plantas que crecen en el suelo son usadas directamente como alimento o para alimentar a los animales, que posteriormente son usados como alimento. El suelo es extremadamente complejo, por lo cual un entendimiento de las características físicas y químicas que ocurren en él es importante de tomar en cuenta para determinar los parámetros y técnicas de análisis.

El suelo contiene componentes sólidos inorgánicos y orgánicos en varias etapas de descomposición y desintegración, una solución acuosa de elementos, moléculas e iones inorgánicos así como orgánicos, y una fase gaseosa que contiene nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua, argón, metano, además de otros gases. Al igual contiene una gran y variada población de animales, plantas y microorganismos a macro, meso, y micro-escala. Si alguno de estos componentes no se encuentra presente, entonces este no es suelo (Conklin, 2005).

La pedología considera al suelo como un complejo dinámico de tres fases, caracterizado por una atmósfera interna, una economía particular del agua, una flora y fauna determinadas y elementos minerales. Sus propiedades se adquieren progresivamente, bajo la acción combinada de los factores ambientales, de modo que nace y evoluciona y la roca madre se meteoriza bajo la influencia del clima y la vegetación. El medio biológico fabrica la materia orgánica y humus, la materia orgánica tiene propiedades muy bien determinadas que se incorporan al suelo, y finalmente se establecen relaciones más o menos íntimas entre los minerales de alteración provenientes de la roca, y el humus fabricado por la biosfera (Honorato, 2000). Es un cuerpo natural, tridimensional, trifásico que ocupa un lugar en el espacio con características únicas (Certini y Ugolini, 2013), producto de la transformación del material originario o parental, a través de procesos destructivos y de síntesis provocados por una combinación determinada de factores ambientales que se expresan en un perfil con horizontes y/o estratos (Honorato, 2000).

En la figura 1 se puede observar el proceso de evolución y horizonización de un suelo, para que se formen los horizontes o estratos, es necesario que se cumplan varias etapas, en la primera se da una desintegración del lecho rocoso, posteriormente la materia orgánica ayuda a que se

de este proceso, para que posteriormente se formen los horizontes y finalmente se desarrolle el suelo.

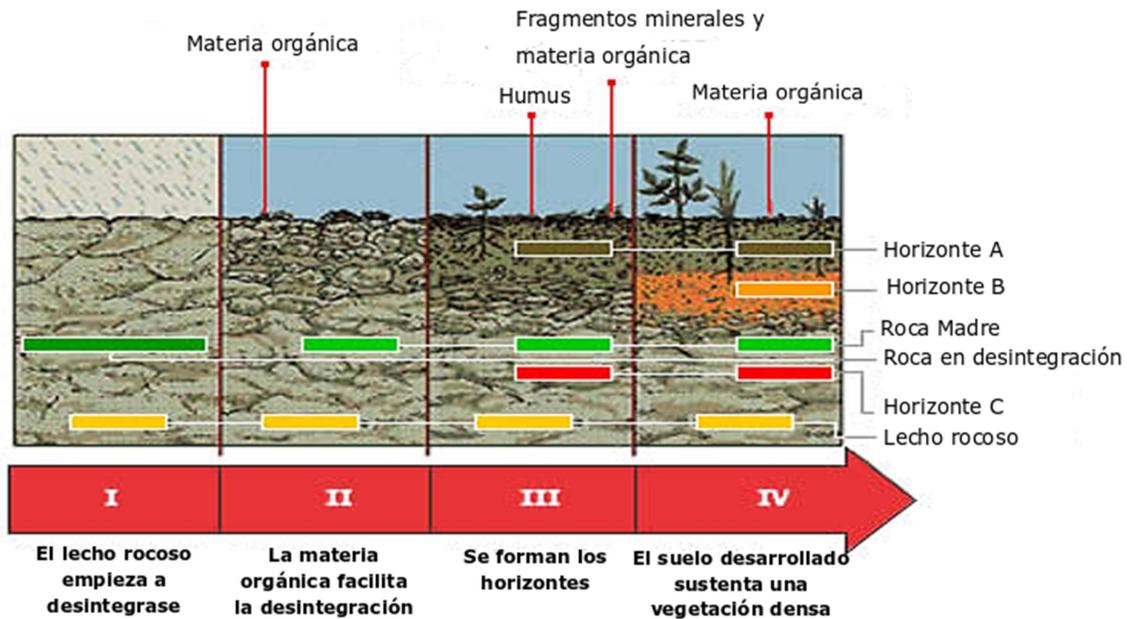


Figura 1. Evolución y horización de un suelo (Ibañez, 2008 citado de Ministerio de Agricultura, CONAF)

El **Perfil** simplifica la tridimensionalidad que posee el cuerpo del suelo, con fines de representación y análisis. Este corresponde a una sección vertical bidimensional de un suelo que se extiende desde la superficie hasta el material rocoso o sustrato mostrando los estratos y horizontes que lo conforman y que han sido pedogenéticamente modificados durante el proceso de formación de suelos.

- Un **horizonte** es definido como una capa de suelo, aproximadamente paralela a la superficie del mismo, y que posee propiedades producidas por los procesos formadores del suelo; entre los horizontes existe una relación genética, evolutiva (Honorato, 2000).
- Los **estratos**, en cambio son capas que no tienen relación genética y que se determinan de forma arbitraria según una o más características descriptivas que indiquen diferencias en el perfil. Por ejemplo: textura, color, presencia de piedras o moteados, cantidad de raíces, acumulación de sales, porosidad, etc. De este modo un horizonte puede incluir uno o varios estratos (Honorato, 2000).

En la figura 2 se observan los conceptos antes mencionados sobre el perfil y los horizontes.

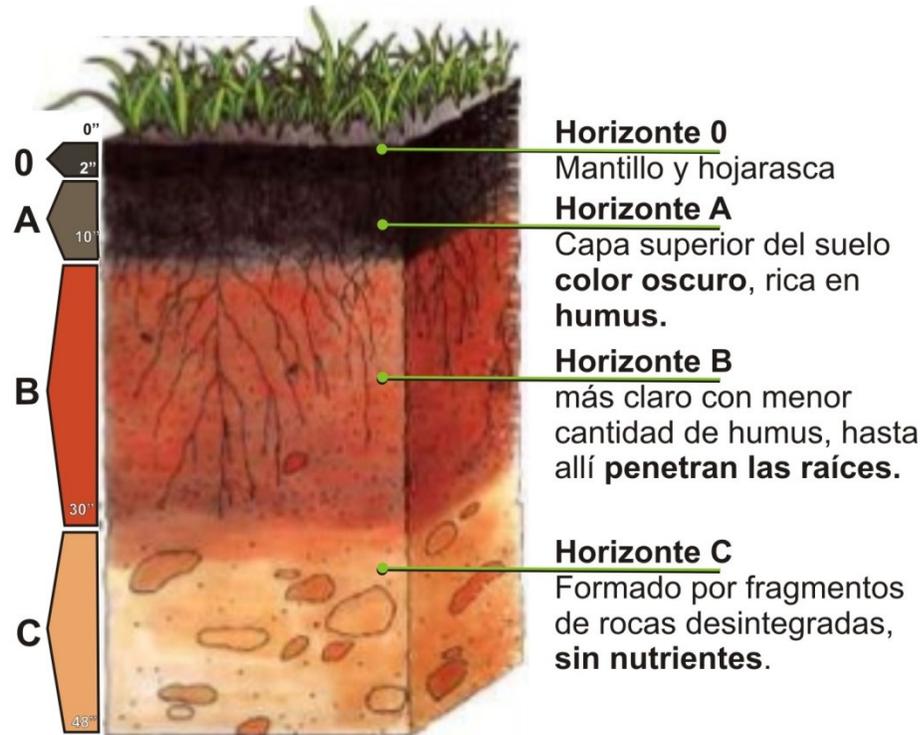


Figura 2. Perfil del suelo formado por diferentes horizontes (Gobierno Argentina, 2017)

La formación y evolución del suelo bajo la influencia de los factores ecológicos, conduce al desarrollo de los horizontes y del perfil del mismo. El sustrato geológico, la roca madre o material original, proporciona por su descomposición, los constituyentes minerales del perfil, mientras que la vegetación da origen a la materia orgánica. Los factores climáticos y biológicos provocan por su parte una transformación y una mezcla, más o menos completa de estos elementos, algunos constituyentes migran en el perfil enriqueciendo o empobreciendo los estratos. El conjunto de estos procesos conduce a la diferenciación de los horizontes y al desarrollo del perfil (Honorato, 2000).

#### Generación de suelos

- Todos los suelos derivan de las rocas y el origen primario de los suelos se debe a la evolución del material parental proveniente de la transformación de las rocas por variados mecanismos de meteorización.
- El material parental puede, posteriormente, permanecer "*in situ*" y originar un suelo o ser transportado por distintos agentes a otro lugar y ahí desarrollar un suelo.

Los tres tipos de rocas principales que originan los materiales parentales de los suelos son:

- **Rocas ígneas:** son aquellas que originalmente constituyeron la corteza de la tierra, después de que ésta se enfrió lo suficiente para endurecerse o cristalizarse en su superficie. Corresponden al magma consolidado. Son susceptibles a los cambios químicos. Algunas de estas son granito, diorita, basalto (Honorato, 2000).
- **Rocas sedimentarias:** se originan por el depósito y recementación de productos de descomposición de otras rocas. Son resistentes a los cambios químicos, algunas de estas son caliza, dolomita, arsénica, conglomerado (Honorato, 2000).
- **Rocas metamórficas:** formadas por la alteración de rocas ígneas y sedimentarias debido al calor o a la presión, o a la acción simultánea de ambos. Algunas son gneis, esquisto, pizarra, cuarcita, mármol (Honorato, 2000).

El material generador está sujeto a una serie de procesos que efectúan cambios continuos en él. El origen y las características del suelo están determinados por la interacción de 5 factores principales de formación: clima, organismos, topografía o relieve, material generador y tiempo (Porta et al, 2014).

## 1.2 Textura

Es una expresión cualitativa y cuantitativa del tamaño de las partículas. Cualitativa ya que se refiere al comportamiento que resulta del tamaño y de la naturaleza de los constituyentes del suelo, y cuantitativa por ser una expresión porcentual. Se refiere a la proporción relativa en peso de los diferentes tamaños de partículas existentes en él, expresada como porcentaje de la fracción mineral.

La textura de cada suelo y horizonte se encuentra definida por las distintas porciones de arena, limo y arcilla. Las partículas del suelo se distribuyen en diferentes fracciones atendiendo a su tamaño. El tamaño de las partículas minerales individuales puede ser arcilla (<0.002mm), limo (0.002-0.05 mm), arena (0.05-2.0 mm), grava (>2.0 mm). La textura del suelo tiene una influencia sobre el comportamiento del mismo.

La naturaleza física y mineralógica de las partículas

- **Arenas:** Fragmentos de roca o minerales. En la arena fina predominan partículas individuales de minerales primarios, como silicatos (tectosilicatos (cuarzo), filosilicatos (micas, arcillas) y fosfatos; en la arena gruesa fragmentos de rocas (Duran, 2004; Honorato, 2000).

- **Limos:** Minerales o fragmentos de rocas, dominando en la fracción fina los minerales primarios individuales y eventualmente minerales secundarios del tipo arcilla de tamaño grueso como la caolinita (Honorato, 2000).
- **Arcillas:** Minerales secundarios arcillosos del tipo cristalino, con una estructura compleja en capas en el caso de las arcillas cristalinas; arcillas de bajo grado de cristalinidad, como el alofán y la imogolita y las llamadas arcillas hidróxidos u óxidos de Fe y Al (Honorato, 2000).

La composición química de las partículas del suelo son principalmente aluminosilicatos (Al, Si, O<sub>2</sub>) y constituyentes básicos dependiendo de los minerales existentes. A continuación, en la tabla 1 se muestran algunas de las características más importantes de las partículas que componen el suelo, las cuales afectan el comportamiento de este.

**Tabla 1. Características de las partículas del suelo (Honorato, 2000)**

Partícula	Características
Arcilla	Alta capacidad de retención de agua y iones. Permeabilidad e infiltración bajas. Microporosidad elevada.
Limo	Capacidad media de retención de agua. Permeabilidad e infiltración de media a baja. Poca actividad química. Escasa o nula capacidad de retención de iones.
Arena	Poca capacidad de retención de agua. Inactividad química. Macroporosidad alta.

El número de combinaciones entre las tres fracciones que determinan la textura del suelo es ilimitado. Este continuo granulométrico del suelo, donde hay infinitas posibles combinaciones, ha sido dividido en clases texturales. Existen dos métodos para determinarlas: al tacto y el análisis granulométrico. En la tabla 2 se integran las características de las fracciones granulométricas como diámetro, número de partículas por gramo y área superficial.

**Tabla 2. Características de las fracciones granulométricas (Honorato, 2000)**

Fracción	Diámetro (mm)	Número de partículas/g	Área Superficial (cm <sup>2</sup> /g)
Arena muy gruesa	2.00-1.00	90	11
Arena gruesa	1.00-0.50	720	23
Arena media	0.50-0.25	5,700	45
Arena fina	0.25-0.10	46,000	91
Arena muy fina	0.10-0.05	722,000	237
Limo	0.05-0.002	5,776,000	454
Arcilla	<0.002	90,260,853,000	8,000,000

La textura es la propiedad física más importante del suelo, es estable en el tiempo y no modificable a la escala agrícola, su principal importancia radica en que afecta a todas las propiedades físicas, y muchas propiedades químicas y biológicas se correlacionan con esta.

La influencia de la textura en el suelo es la siguiente:

- Porosidad total
- Aireación
- Retención y movimiento del agua en el suelo
- Escurrimiento superficial e infiltración
- Drenaje y permeabilidad
- Desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados
- Susceptibilidad de erosión
- Propiedades físico-químicas de los suelos
- Capacidad de intercambio catiónico

### **1.3 Valores de fondo geoquímico**

Al hablar de investigaciones acerca de la contaminación de suelos es de interés poder diagnosticar si la presencia de un elemento químico determinado se puede deber a las características mineralógicas del material originario, que lo libera durante la meteorización, o si la presencia del elemento tiene su origen en una contaminación por actividades antropogénicas. Es a partir de esto que surge el concepto de valor de **fondo geoquímico** de un elemento.

El valor de fondo geoquímico se refiere a la concentración de un elemento en un determinado medio, en ausencia de cualquier aporte externo específico derivado de la actividad humana. Para un mismo elemento, el valor de la concentración variará según cual haya sido el material originario del suelo (Porta, 2014).

El estudio de los posibles minerales fuente pone de manifiesto cuál puede ser el aporte esperable al valor de fondo geoquímico para cada elemento para un ámbito geográfico concreto.

#### **1.4 Química ambiental de suelos**

En el inicio de los años 70's y en mayor medida en los 90's el interés en los contaminantes orgánicos e inorgánicos en suelos y aguas aumentó debido al impacto generado en plantas, animales y salud humana. El conocimiento de la química ambiental de suelos es fundamental en la predicción del destino de los contaminantes en ambientes superficiales y subsuperficiales. Un entendimiento de la química y mineralogía de los componentes orgánicos e inorgánicos es necesario para comprender las reacciones químicas ocurridas por los contaminantes en el ambiente del suelo. Este tipo de reacciones pueden incluir procesos como disolución, precipitación, polimerización, adsorción/desorción, oxidación/reducción, lo cual puede afectar la solubilidad, movilidad, formación de especies, toxicidad y biodisponibilidad de contaminantes en suelos en aguas superficiales y subterráneas. Por lo tanto el conocimiento en química ambiental de suelos puede impactar en la toma de decisiones efectivas en cuanto a la remediación de suelos contaminados (Sparks, 2003).

#### **1.5 Remediación de suelos**

Los elementos potencialmente tóxicos (EPTs) son sustancias que pueden jugar un papel importante como elementos traza en reacciones bioquímicas y que pueden ser tóxicas en función de su concentración (López citado de Volke-Sepúlveda et al., 2005) son considerados como EPTs, el arsénico, el bario, el berilio, el cadmio, el cobre, el cromo hexavalente, el mercurio, el níquel, la plata, el plomo, el selenio, el talio, el vanadio y el zinc. Los EPTs existen de manera natural como parte de la corteza terrestre y son introducidos al ecosistema por procesos naturales, debido a que estos no son biodegradables se pueden acumular en el ambiente y contaminar. Hoy en día la contaminación de suelos con EPTs se ha vuelto un problema a nivel mundial y una seria amenaza al ambiente por el incremento de las actividades antropogénicas como minería, uso de fertilizantes, desperdicios, lodos, pesticidas, riego de

aguas residuales, residuos de combustión de carbón, entre otros. La mayor amenaza está representada por minas abandonadas y residuos no asegurados (Sparks citado de Stankov et al. 2015). Por lo cual, se requiere la implementación urgente de acciones de remediación. Para la selección adecuada de una tecnología de remediación con buenas perspectivas de éxito, es indispensable considerar tanto las propiedades del contaminante como las del sitio contaminado. De manera general los factores a considerar son procesos químicos, procesos físicos o de transporte y procesos biológicos.

De acuerdo con la manera en la que se realiza una remediación se clasifica en dos tipos: *in situ* este tipo de técnica se lleva a cabo en el sitio contaminado, el suelo no necesita ser removido, por lo cual las vías de exposición son minimizadas; *ex situ* este tipo de técnica requiere de la remoción del suelo contaminado, usualmente por excavación, y después el suelo es tratado en el sitio o transportado a otra locación para ser tratado, con este tipo de remediación existen preocupaciones sobre la exposición de los contaminantes en el proceso de movimiento y transporte (Sparks, 2003). De acuerdo con el tipo de tratamiento se pueden clasificar en: tratamiento biológico o tratamiento fisicoquímico.

Las tecnologías de remediación para la descontaminación de suelos con elementos potencialmente tóxicos han involucrado tradicionalmente la excavación del suelo, solidificación/estabilización, electrocinética, lavado del suelo, fitorremediación, biorremediación, etc. (You et al., 2019). La biorremediación y la fitorremediación son más adecuadas para suelos baja o moderadamente contaminados, con las ventajas de costos bajos, implementación simple, y cambios mínimos del suelo, por otro lado las limitaciones son resultados a largo plazo y ámbito de aplicación limitado (You citado de Liu et al., 2018).

Las ventajas y desventajas de técnicas *in situ* y *ex situ* utilizadas en remediación de suelos se resumen y muestran en la tabla 3.

- Biorremediación

El término biorremediación ha sido definido como una “Respuesta biológica al abuso ambiental” (Hamer, G.1993). Esta definición sirve para distinguir entre el uso de microorganismos para remediar sitios contaminados y su aplicación en los procesos de biotratamiento/bioreciclamiento designados para reducir las emisiones de contaminantes orgánicos e inorgánicos en la fuente. La bioremediación se ocupa de la restauración biológica de los sitios históricamente contaminados y de la limpieza de las áreas en tiempos más recientes, ya sea de manera accidental o incidentalmente, como un resultado de la producción, almacenamiento, transporte

y uso de compuestos orgánicos e inorgánicos. Las técnicas de biorremediación han sido divididas en dos categorías basadas en si la biodegradación es estimulada *in situ* o llevada fuera *ex situ* en reactores. El aprovechamiento de las capacidades degradativas de los microorganismos es la base fundamental para la biorremediación de los contaminantes orgánicos. Consecuentemente el conocimiento de las características fisiológicas, capacidades bioquímicas, ecología y plasticidad genética de las especies microbianas involucradas son prerequisites indispensables para conseguir una remediación exitosa (Sparks, 2003).

**Tabla 3. Ventajas y desventajas de técnicas *in situ* y *ex situ* utilizadas en remediación de suelos (adaptación de Sparks, 2003)**

Técnica	Ventaja	Desventaja
<i>In situ</i>		
Biodegradación/Biorremediación	Efectiva en algunos compuestos no volátiles	Resultados a largo plazo
Fitorremediación	Efectiva con una serie de reactivos orgánicos e inorgánicos	Se necesitan de plantas específicas para contaminantes específicos
Lixiviación	Puede ser aplicable a una amplia variedad de compuestos	No es muy común aplicarla
Electrocinética	Eficiencia para el tratamiento de suelos de baja permeabilidad hidráulica	No es muy común aplicarla, altos costos.
Lavado del suelo	Resultados a corto plazo debido a la amplia gama de tipo de contaminantes, estabilidad de tratamiento y alta eficiencia que ofrece.	Es necesario el uso de varios reactivos para eliminar de manera eficiente la contaminación, generación de contaminantes secundarios.
<i>Ex situ</i>		
Biodegradación /Biorremediación	Se realiza monitoreo y control de condiciones que afectan a la biodegradación, como temperatura y pH	El proceso es costoso y con posibilidad de contaminación secundaria.
Extracción Química	Aplicada a una amplia variedad de compuestos	Costos altos
Excavación	Remoción de la contaminación del sitio	Resultados a largo plazo y mayor exposición a los contaminantes
Solidificación/estabilización	Los contaminantes son encapsulados, por los cual no tienen movilidad.	Los contaminantes no son destruidos.

En la tabla 4 se muestran las ventajas y desventajas de la biodegradación de acuerdo con la manera en la que es llevada a cabo.

**Tabla 4. Características, ventajas y desventajas de la biodegradación in situ y ex situ**

<b>Método</b>	<b>Características</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<i>In situ</i>	Llevado a cabo en sitio “bombea y trata”, buscan mejoramiento de la remediación de contaminantes orgánicos en suelos	No es necesario remover el suelo afectado.  Más barata en comparación al método <i>ex situ</i> .	El resultado es a largo plazo.  Condiciones no controladas como temperatura, pH.
<i>Ex situ</i>	Remoción física del suelo contaminado, tratamiento bajo condiciones controladas en biorreactores, biopilas, montañas de composta, estanques o lagunas.	Monitoreo y control de condiciones que afectan a la biodegradación, como temperatura y pH.	Es un procedimiento más costoso.  Riesgo de exposición al trasladar el suelo contaminado a su destino.

- Fitorremediación

Es determinado como un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes orgánicos e inorgánicos, en suelos, lodos y sedimentos y se puede aplicar de manera *in situ* y *ex situ*. El término de remediación fue acuñado por primera vez en 1991. Este tipo de remediación incluye cualquier proceso biológico, físico o químico que mediado por plantas ayuda a la adsorción, secuestro o degradación de los contaminantes ya sea por la planta misma o por microorganismos que se desarrollan en la rizósfera (Bravo, 2015).

- Remediación electrocinética

La remediación electrocinética es una tecnología *in situ* que ha sido aplicada con gran éxito en la remoción de contaminantes inorgánicos en los últimos 20 años. En esta técnica se aplica un campo eléctrico para promover el movimiento hacia las cámaras del electrodo, localizadas en el suelo contaminado de donde son extraídos los contaminantes (De la Rosa et al. 2007). Se basa en un proceso de lavado generado por la acción de una corriente eléctrica que permite el transporte de contaminantes incluso cuando el suelo se caracteriza con una baja permeabilidad. También se puede encontrar en la literatura con otros términos como electro remediación o remediación electroquímica. Su principio consiste en la aplicación controlada de corriente continua de baja intensidad a través de suelo entre electrodos apropiadamente distribuidos. Una de las ventajas más importantes es su eficiencia para el tratamiento de suelos de baja permeabilidad hidráulica, donde otras técnicas como el tratamiento con bomba no son adecuadas (López, 2013).

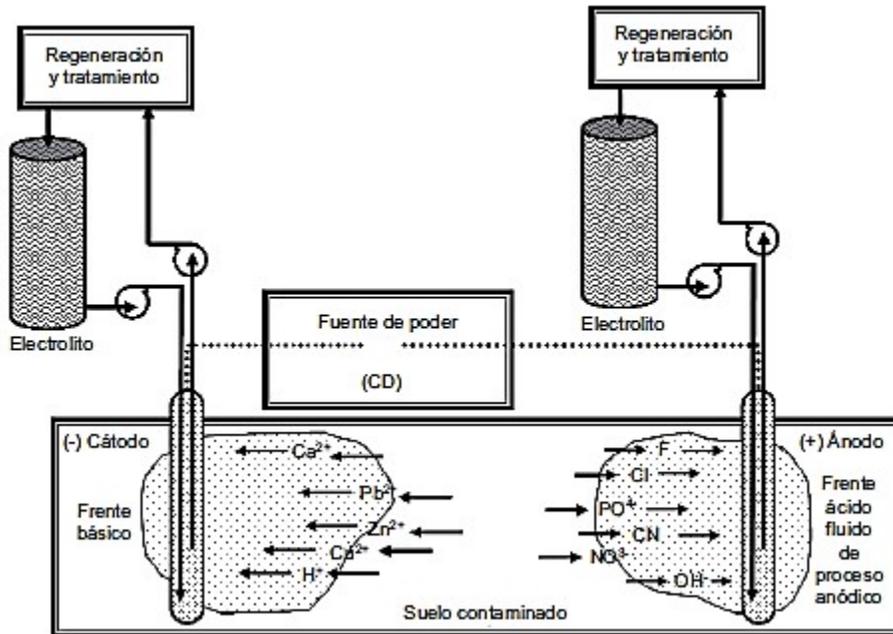


Figura 3. Diagrama de aplicación del proceso de electrocinética (De la Rosa et al, 2007)

En la figura 3 se observa un esquema básico de electrorremediación, en el cual las especies iónicas migran debido a la acción del campo eléctrico. El frente ácido se forma en el ánodo y migra hacia el cátodo.

La corriente aplicada induce el transporte de las especies en el fluido intersticial del suelo, dependiendo de su carga eléctrica, hacia las cámaras del ánodo o cátodo, debido principalmente a la electro-osmosis y la migración iónica, que esta acoplada con la electrolisis y reacciones geoquímicas.

Los principales mecanismos electrocinéticos de transporte se resumen en 3, electroforesis, electromigración y electro-osmosis.

- Lavado de suelos

El lavado de suelos tiene como propósito separar los contaminantes de la mayor parte del suelo, esto normalmente se logra solubilizando los metales en solución con un líquido acuoso de extracción que en muchas aplicaciones pueden ser ácidos fuertes como ácido clorhídrico (HCl) (You citado de Kim et al., 2013), agentes quelantes como EDTA (You citado de Lestan et al., 2008) y surfactantes (You citado de Mukhopadhyay et al., 2013), como reactivos extractantes para la descontaminación por EPTs. Por lo general un solo reactivo de lavado no

puede lograr de manera eficiente la eliminación simultánea de arsénico y otros EPTs. La tecnología del lavado de suelo se ha convertido en un medio importante para remediar de manera rápida los suelos contaminados debido a la amplia gama de tipo de contaminantes, estabilidad de tratamiento y alta eficiencia que ofrece (Rui, et al., 2019).

## **1.6 Normatividad ambiental relacionada con la contaminación de suelos por la minería**

### **1.6.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente**

Publicada el 28 de enero de 1988 tiene una última modificación del 5 de Junio de 2018, la cual se encuentra vigente. Esta Ley consta de un total de seis Títulos. De acuerdo con su Título primero sobre disposiciones generales la presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para: garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar. Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación así como la preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente. La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas. El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas. La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo. Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

### **1.6.2 NMX-AA-132-SCFI-2016**

Esta norma mexicana que tiene como título "MUESTREO DE SUELOS PARA LA IDENTIFICACIÓN Y LA CUANTIFICACIÓN DE METALES Y METALOIDES, Y MANEJO DE LA MUESTRA" establece las especificaciones técnicas para la obtención y manejo de muestras que permitan la caracterización de suelos del área de estudio, a través de la identificación y cuantificación de metales y metaloides.

Esta Norma Mexicana establece especificaciones generales para el muestreo de suelos cuyo contenido de metales y metaloides (arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio) requiere ser identificado y cuantificado en el sitio en estudio, para en caso de contaminación, ser remediados. Se reconoce que tanto los programas de muestreo como la remediación de un suelo responden a las características específicas del sitio, por lo que no hay un protocolo o conjunto de procedimientos que puedan cumplir con todas las condiciones. Con esta norma se establece una guía general para la conducción de los muestreos de suelos. La aplicación de lo establecido en ella supone que ha habido un proceso sistemático de revisión de documentos, mapas e información del sitio, para determinar si una propiedad es o podría estar contaminada y para establecer la ubicación de la posible contaminación. Con base en el Plan de Muestreo, según lo establecido en esta norma y la aplicación de métodos analíticos, se podrá definir la naturaleza y extensión de la contaminación. A continuación, se describen los tipos de muestreos incluidos en esta norma.

### **1.6.3 Tipos de muestreo**

- Muestreo exploratorio

Tiene como objetivo obtener las muestras representativas para establecer la presencia de contaminación y en su caso la distribución horizontal de la misma y valorar su posible migración vertical. El muestreo exploratorio se realiza en dos fases. En la primera, se toman muestras de suelo superficial y en la segunda, se toman muestras en perfiles de suelo (muestreo vertical).

- Muestreo de detalle

Tiene como objetivo determinar el volumen de suelo contaminado de acuerdo con las concentraciones de referencia establecidas en las normas oficiales mexicanas aplicables.

- Muestreo de fondo

El objetivo es obtener muestras representativas de los suelos contiguos al área que se presume contaminada, que permitan determinar las concentraciones de metales y metaloides en suelos no modificados por el ser humano. Con ello se definirán los niveles de fondo locales que sirvan de referencia y representación del suelo natural no afectado.

- Muestreo de comprobación posterior después de la remediación

El muestreo de comprobación posterior a la remediación tiene como objetivo demostrar que un suelo, que se determinó contaminado con metales y metaloides, y que ha sido sometido a una

remediación, ha alcanzado concentraciones menores o iguales a los valores establecidos como concentraciones objetivo.

#### **1.6.4 NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004**

Esta 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”. Tiene como objetivo establecer los criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos. Esta Norma también establece diferentes alternativas para determinar la concentración objetivo a la cual se debe remediar un suelo. Estas opciones incluyen las concentraciones de referencia (totales y solubles) que esta Norma presenta, la determinación de concentraciones de fondo del suelo, el cálculo de concentraciones específicas conforme a las características propias del sitio y de concentraciones basadas en la biodisponibilidad de los contaminantes.

Cuando las concentraciones de estos elementos en un suelo específico son mayores que las denominadas concentraciones de referencia, se pueden realizar estudios particulares para determinar las concentraciones específicas en suelos, que no representen un riesgo mayor. Estos estudios particulares determinan la movilidad y biodisponibilidad de los elementos normados y los parámetros de exposición reales en el sitio evaluado, a partir de las características propias del suelo en estudio.

En la tabla 5 se especifican las concentraciones de referencia totales límites para que se considere que un suelo según su uso deba ser remediado siguiendo la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

En la NOM-147 también se indica que se pueden usar las concentraciones solubles de los EPTs para establecer los límites de remediación y los valores de referencia se muestran en la tabla 6.

Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria para todas aquellas personas físicas y morales que deban determinar la contaminación de un suelo con materiales o residuos que

contengan arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos.

**Tabla 5. Concentraciones de referencia totales (CR<sub>T</sub>) por tipo de uso de suelo**

Contaminante	Uso agrícola/residencial/comercial (mg·kg <sup>-1</sup> )	Uso industrial (mg·kg <sup>-1</sup> )
Arsénico	22	260
Bario	5 400	67 000
Berilio	150	1 900
Cadmio	37	450
Cromo Hexavalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1 600	20 000
Plata	390	5 100
Plomo	400	800
Selenio	390	5 100
Talio	5.2	67
Vanadio	78	1 000

**Tabla 6. Concentraciones solubles de referencia de los EPTs solubles (CRs)**

Contaminante	Concentración (mg·L <sup>-1</sup> )
Arsénico	0.500
Bario	10.000
Berilio	0.122
Cadmio	0.100
Mercurio	0.020
Níquel	1.100
Plata	0.500
Plomo	0.500
Selenio	0.100
Talio	0.020
Vanadio	0.160

Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria para todas aquellas personas físicas y morales que deban determinar la contaminación de un suelo con materiales o residuos que contengan arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos.

Tiene como referencias entre otras a:

- Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de septiembre de 2004.
- NOM-157-SEMARNAT-2009 Esta norma oficial mexicana “QUE ESTABLECE LOS ELEMENTOS Y PROCEDIMIENTOS PARA INSTRUMENTAR PLANES DE MANEJO DE RESIDUOS MINEROS” tiene como objetivo establecer los elementos y procedimientos que se deben considerar al formular y aplicar los planes de manejo de residuos mineros, con el propósito de promover la prevención de la generación y la valorización de los residuos, así como alentar su manejo integral a través de nuevos procesos, métodos y tecnologías que sean económica, técnica y ambientalmente factibles.

## **1.7 Técnicas utilizadas para caracterización y cuantificación de elementos potencialmente tóxicos en suelos**

### **1.7.1 Espectroscopia de Absorción Atómica**

Esta técnica requiere una etapa de preparación para extraer el analito de interés de la matriz principal.

La espectrometría de absorción atómica (AAS), la espectrometría de plasma y espectrometría de masa inductiva (ICP-OES e ICP-MS) están entre las técnicas espectroscópicas más utilizadas para la determinación de metales y metaloides en muestras ambientales. Un requisito fundamental para el empleo de estas técnicas es que los analitos se encuentren en disolución.

Cuando se utilizan técnicas basadas en espectrometría atómica es necesario un procedimiento de extracción previo al análisis, como la digestión o la lixiviación.

En la espectrometría de absorción atómica (AAS) la excitación de los electrones en un átomo, debida a la absorción de energía de una lámpara de longitud de onda específica de cada elemento, los promueve a un mayor nivel de energía, y cuando estos regresan a su nivel de energía original, estos liberan energía de la misma longitud de onda que la energía que absorbieron. Cuando esta energía se encuentra en el intervalo visible del espectro electromagnético, esta da lugar a lo que se denomina *línea espectral*, la cual consiste de longitudes de onda discretas o líneas de luz únicas para cada elemento que son absorbidas o desprendidas (González, 2017). En la figura 4 se muestra un esquema simplificado de un

equipo de absorción atómica, en esta se observan los componentes principales de un espectrómetro de absorción atómica, en este equipo la fuente de energía es una lámpara de cátodo hueco, la cual produce la emisión de un espectro que es característico del elemento excitado en el tubo catódico. El espectro electromagnético puede abarcar desde la radiación visible hasta la ultravioleta. La muestra vaporizada absorbe energía de acuerdo con la energía del tubo catódico y el tubo fotomultiplicador mide la reducción final de intensidad debida a la absorción.

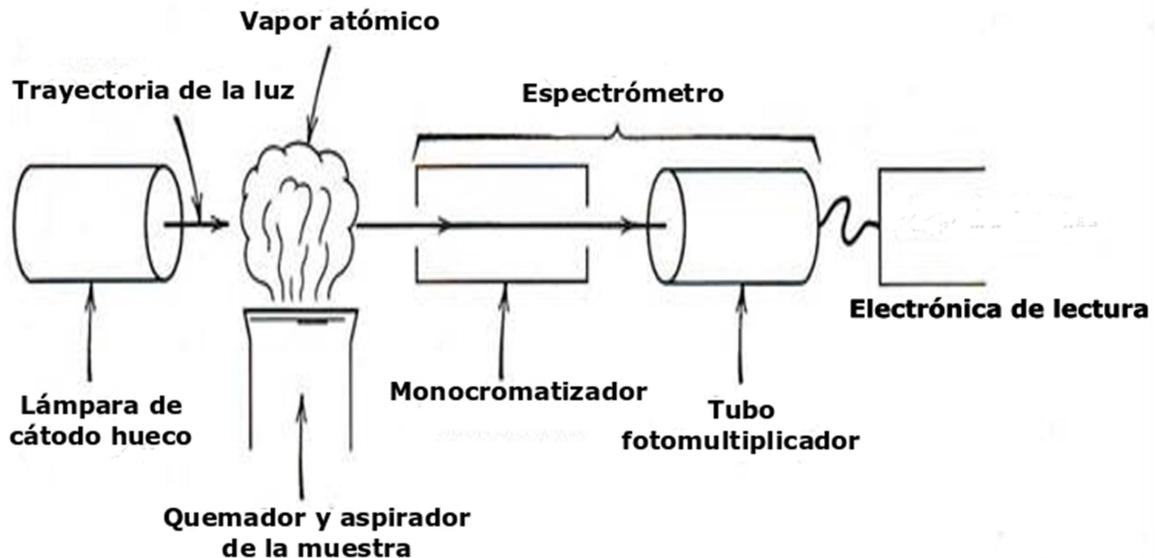


Figura 4. Esquema de un espectrómetro de absorción atómica (Cornelis, Klein 2001)

### 1.7.2 Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)

Los analitos en disolución se introducen al plasma como un aerosol, en el plasma pasan a través del proceso de desolvatación, vaporización, atomización y excitación. Los átomos e iones de muchos elementos generados en el ICP son eficientemente excitados a una alta temperatura del plasma (arriba de 7000 K). Las longitudes de onda de los fotones emitidos son características de cada átomo o ion y el número de fotones está relacionado con su concentración. Así que varias longitudes de onda pueden ser medidas simultánea o secuencialmente (ya sea en configuración axial o radial) proveniente del plasma de argón. La espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente presenta una alta selectividad y sensibilidad un gran rango dinámico, límites de detección bajos, detección

multielemental y relativamente bajas interferencias de matriz. Esta técnica es considerada una herramienta analítica poderosa y versátil para la confiabilidad en la determinación de elementos mayores, menores y traza en una gran variedad de matrices de muestra (López, 2018). En la figura 5 se muestra un esquema de un equipo de ICP-OES.

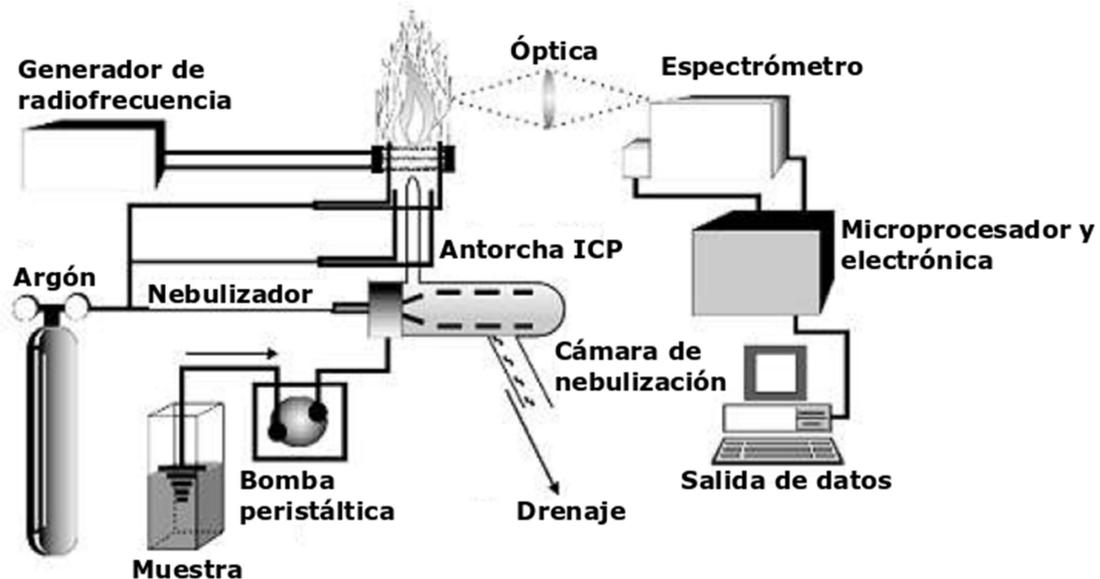


Figura 5. Esquema de un equipo de ICP-OES (tomada de IDEAM, 2006)

### 1.7.3 Difracción de rayos X

Hacia el año de 1912, la naturaleza de los rayos X, no era bien conocida, es decir si eran partículas u ondas; una demostración de los efectos de la difracción de los rayos X fue necesaria para demostrar su naturaleza como onda. Esto se consiguió eventualmente por Max von Laue, quien utilizó un cristal de sulfato de cobre como la rejilla de difracción, lo cual lo hizo ganar el Premio Nobel de Física en 1914 (Van Bokhoven, 2015). Los sólidos cristalinos consisten en un arreglo regular de átomos, iones o moléculas con espacios interatómicos del orden de 100 pm. Para que la difracción se lleve a cabo la longitud de onda de la luz incidente tiene que ser del mismo orden de magnitud como los espacios de la rejilla. Debido a la naturaleza periódica de la estructura interna, es posible para los cristales actuar como una rejilla de difracción tridimensional para una luz de una longitud de onda adecuada (Van Bokhoven, 2015).

Este descubrimiento fue notado inmediatamente por W. H y W. L Bragg, fueron ellos quienes comenzaron a realizar experimentos utilizando la difracción de cristales por rayos X con el fin de

la determinación de estructuras. En 1913 determinaron primeramente la estructura cristalina del NaCl y posteriormente muchas más, incluyendo KCl, ZnS, CaF<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub> y la estructura de un diamante, entonces fue W. L Bragg quien notó que la difracción de rayos X se comporta como una “reflexión” de los planos de los átomos con el cristal y que solamente en orientaciones específicas del cristal con respecto a la fuente y al detector los rayos X son “reflectados” de los planos. Esto no es como la reflexión de la luz desde un espejo, esta requiere que el ángulo de incidencia sea igual al ángulo de reflexión, y esto es posible para todos los ángulos. Con la difracción de rayos X, la reflexión se produce solo cuando se cumplan las condiciones de interferencia constructiva. En la figura 6 se tiene el funcionamiento de la técnica de difracción de rayos X, aquí se observa que cuando se hace incidir un haz de rayos X sobre un material sólido una parte o porción de este rayo es dispersado en todas las direcciones por los electrones asociados a cada átomo o ion que está dentro del camino del haz.

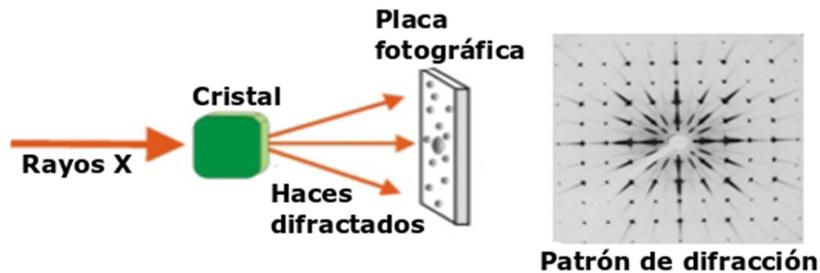


Figura 6. Funcionamiento de la técnica difracción de rayos X (López, 2018)

Actualmente es difícil imaginar investigaciones de vanguardia en cuanto a ciencia de materiales, física y química del estado sólido, catálisis, química, biología, medicina, ciencias de la tierra, ciencias ambientales, nano-ciencia, entre otras, sin el aporte de técnicas espectroscópicas así como rayos X y las técnicas relacionadas a estos.

#### 1.7.4 Espectrometría de fluorescencia de rayos X

La exposición de los elementos a la energía del espectro de rayos X resulta en la salida o eyección de electrones de las capas internas (figura 7). Los electrones de las capas externas regresan a ocupar estas vacantes emitiendo radiación, un fotón de una longitud de onda específica. El análisis de este tipo de radiación, fluorescencia de rayos X (FRX), permite la identificación del elemento del cual el fotón es emitido. Los instrumentos para llevar a cabo este análisis pueden ser adaptables a laboratorio o manuales, siendo estos últimos de gran utilidad para portar a campo. La radiación de excitación del instrumento de fluorescencia de rayos X

debe pasar a través de una ventana. El material de la ventana, frecuentemente un metal, determinara en parte el intervalo de elementos que pueden ser detectados.

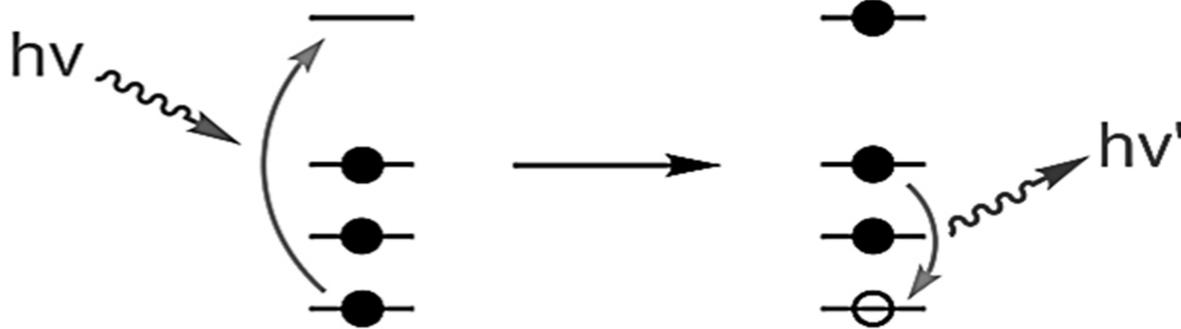


Figura 7. Esquematación del fenómeno de fluorescencia de rayos X (Calvero, 2006)

De acuerdo con el fabricante del equipo FPXRF Olympus DP 6000, es posible realizar el análisis de elementos desde el Mg hasta el U, sin embargo, de acuerdo con el procedimiento LABQA-P-III-FRX-01 (Determinación de concentraciones elementales por FP-RX matrices sólidas, con base en el método EPA 6200) se aplica de forma confiable en la determinación en muestras ambientales de los analitos mostrados en la tabla 7.

Tabla 7. Analitos y límites de detección en el alcance de este método (LABQA)

Elemento	Límite de Detección (LD) (mg·kg <sup>-1</sup> )
Aluminio (Al)	450-1400
Arsénico (As)	1-3
Calcio (Ca)	10-35
Cadmio (Cd)	5-9
Cromo (Cr)	2-9
Cobre (Cu)	2-6
Manganeso (Mn)	3-7
Plomo (Pb)	1-4
Selenio (Se)	1-2
Antimonio (Sb)	10-13
Vanadio (V)	4-10
Zinc (Zn)	1-3

## 1.8 Fluorescencia de rayos X de campo portable

### 1.8.1 Fluorescencia de Rayos X

La fluorescencia de rayos X es un método no destructivo, rápido, fácil y preciso usado para el análisis elemental de materiales, tiene la capacidad de análisis multielemental simultáneo. Una fuente de rayos X es usada para irradiar a la especie, las vacantes de electrones se llenan con

electrones en cascada desde las capas externas de los electrones. Electrones en capas externas tienen estados de energía más altos que los electrones de la capa interna, y los electrones de la cubierta externa emiten energía a medida que caen en cascada hacia las vacantes de la carcasa interna. Este reordenamiento de los electrones da como resultado la emisión de rayos X característicos del átomo dado. La emisión de rayos X, De esta manera, se denomina fluorescencia de rayos X (EPA 6200). Posteriormente un sistema detector es usado para medir las posiciones de los picos fluorescentes de rayos X para una identificación cualitativa de los elementos presentes y para medir las intensidades de los picos para una determinación cuantitativa de la composición. Todos los elementos pueden ser analizados por FPXRF. La historia y fundamentos en mayor detalle sobre la técnica se encuentran en el Anexo III.

### **1.8.2 Analizador portátil FRX marca Olympus modelo Delta Professional**

Los equipos de Fluorescencia de Rayos X de Campo Portable (FPXRF) utilizan radioisótopos sellados, fuentes o tubos de rayos X para irradiar muestras con rayos X.

En esta tecnología tres capas de electrones están generalmente involucradas en la emisión de rayos X durante el análisis FPXRF de muestras ambientales. Las tres capas de electrones incluyen los niveles K, L y M. Un típico patrón de emisión, también llamado espectro de emisión, para un metal dado tiene picos generados de intensidad múltiple por la emisión de electrones de niveles K, L o M. Las emisiones de rayos X medidas comúnmente son de los de niveles K y L. Cada línea de rayos X característica se define con la letra K, L o M, que significa cual nivel tenía la vacante original, por un subíndice alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) o gamma ( $\gamma$ ) etc., que indica la capa superior desde la que cayeron los electrones para llenar la vacante y producirlos rayos X.

Por ejemplo, una línea  $K_{\alpha}$  es producida por una vacante en nivel K ocupada por un electrón del nivel L, mientras que una línea  $K_{\beta}$  es producida por una vacante en el nivel K llena por un electrón de nivel M (figura 8). La transición  $K_{\alpha}$  es en promedio de 6 a 7 veces más probable que la transición  $K_{\beta}$ ; por lo tanto, la línea  $K_{\alpha}$  es aproximadamente 7 veces más intensa que la línea  $K_{\beta}$  para un elemento dado, haciendo que la línea  $K_{\alpha}$  sea la elegida para fines de cuantificación.

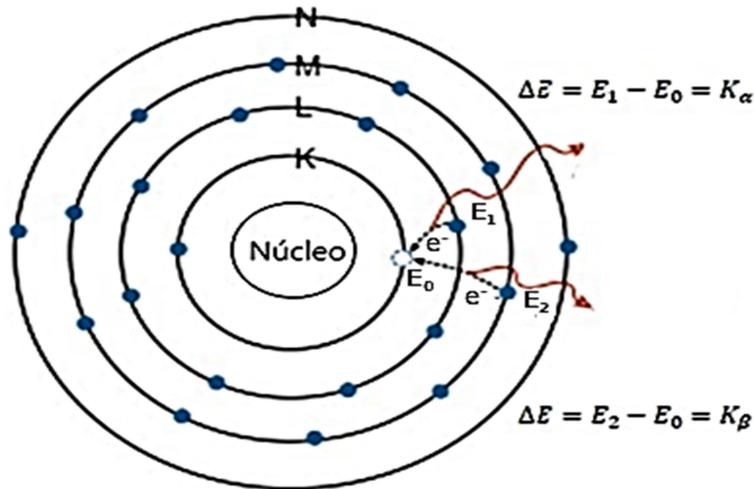


Figura 8. Representación de las líneas  $K\alpha$  y  $K\beta$  (Biotechnics, 2014)

Las líneas K para un elemento dado son las líneas más energéticas y son las líneas preferidas para el análisis. Para un átomo dado, los rayos X emitidos por las transiciones L son siempre menos energéticos que los emitidos por las transiciones K. A diferencia de las líneas K, las líneas de emisión L principales ( $L\alpha$  y  $L\beta$ ) para uno de los elementos son de intensidad casi igual. La elección de uno u otro depende de las líneas de los elementos interferentes presentes. Las líneas de emisión L son útiles para análisis involucrando elementos de número atómico ( $Z$ ) 58 (cerio) hasta 92 (uranio). Una fuente de rayos X puede excitar rayos X característicos de un elemento solo si la fuente de energía es mayor que la energía del borde de absorción para el grupo de líneas particular del elemento, es decir, el borde de absorción K, el borde de absorción L o la energía del borde de absorción M. El borde de absorción. La energía es algo mayor que la energía de la línea correspondiente. En realidad, la absorción de la energía de borde de K es aproximadamente la suma de las energías de línea K, L y M del elemento en particular, y la energía del borde de absorción L es aproximadamente la suma de las energías de las líneas L y M. FPXRF es más sensible a un elemento con una energía de borde de absorción cercana pero menor que la energía de excitación de la fuente.

### 1.8.3 Funcionamiento del equipo FPXRF

Los analitos inorgánicos de interés son identificados y cuantificados ya que la radiación de una o más fuentes radioisotópicas o un tubo de rayos X excitado eléctricamente son utilizadas para generar emisiones características de rayos X en los elementos de una muestra. Se pueden

utilizar hasta tres fuentes para irradiar una muestra. Cada fuente emite un conjunto específico de rayos X primarios que excitan un intervalo correspondiente de elementos en una muestra. Cuando más de una fuente puede excitar al elemento de interés, la fuente es seleccionada de acuerdo con su eficiencia de excitación para el elemento de interés. En la figura 9 se pueden observar los componentes de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X, en esta imagen se observa que propiamente el equipo cuenta con una fuente de rayos X, que es la encargada de excitar a los electrones en la muestra, un detector de tipo silicio, el procesador de señal que envía la señal al CPU y los resultados son vistos en la pantalla del mismo equipo, también cuenta con una unidad de almacenamiento.

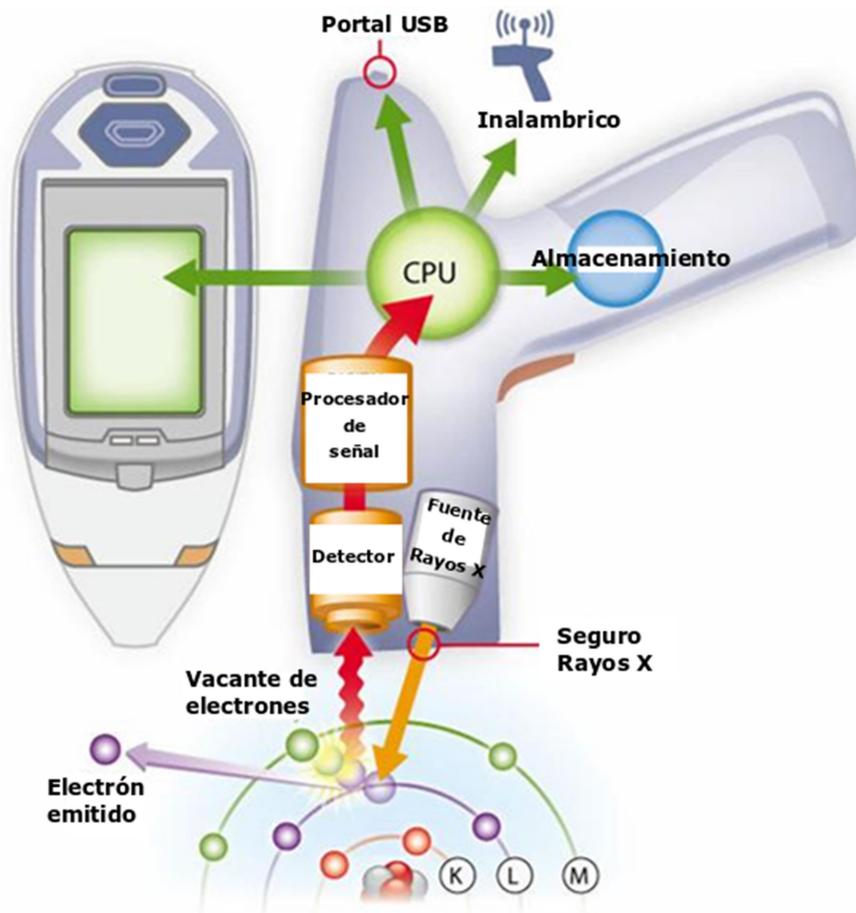


Figura 9. Componentes principales para el funcionamiento de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X (Figuroa, 2018)

#### **1.8.4 Medición**

La muestra sólida se coloca de frente a la ventana de la sonda. Esto puede ser de dos maneras:

- *In situ*: en este modo la ventana de la sonda se coloca en contacto directo con la superficie del suelo o muestra sólida a ser analizada.
- *Intrusivo*: en este modo, la muestra es recolectada y colocada en un vaso/copa de muestra. El vaso/copa de muestra es colocado en la parte superior de la ventana, dentro de una cubierta protectora, para su análisis.

El análisis de la muestra se inicia al exponer a esta a la radiación primaria de la fuente. Los rayos X fluorescentes de la muestra ingresan a través de la ventana del detector y se convierten en pulsos eléctricos en el detector. El detector en instrumentos del tipo FPXRF suele ser un detector de estado sólido o un contador proporcional lleno de gas. Dentro del detector, las energías de los rayos X característicos se convierten en un tren de pulsos eléctricos cuyas amplitudes son linealmente proporcionales a la energía de los rayos X. Un analizador electrónico multicanal (MCA) mide las amplitudes de pulso, que es la base del análisis cualitativo de rayos X. El número de conteos a una energía dada por unidad de tiempo es representativo de la concentración de un elemento en una muestra y es la base para el análisis cuantitativo. La mayoría de los instrumentos de campo portable de fluorescencia de rayos X se controlan mediante el software integrado en las unidades o desde computadoras personales (figura 9).

#### **1.8.5 Calibración**

Los instrumentos FPXRF se pueden calibrar usando los siguientes métodos: internamente, usando parámetros fundamentales determinados por el fabricante, basados empíricamente con estándares de calibración de sitios específicos (SSCS), o con base en las proporciones de picos de Compton. El pico Compton es producido por retrodispersión de la fuente de radiación.

#### **1.8.6 Sensibilidad y límites de detección**

La sensibilidad del método y el límite de detección dependen de varios factores:

- El analito de interés
- El tipo de detector usado
- El tipo de fuente de excitación utilizada
- La fuerza de la fuente de excitación
- Los cuantos/fotones utilizados para irradiar la muestra
- Efectos físicos de la matriz

- Efectos químicos de la matriz
- Interferencias de espectros interelementales

### 1.8.7 Interferencias

En la tabla 8 se describen los tipos de interferencias en el análisis de FPXRF, los cuales pueden ser efectos físicos y químicos de la matriz, humedad, posición de la muestra, sobreposición de espectros, cambios de temperatura y uso de estándares de calibración de sitio específico.

**Tabla 8. Descripción de las interferencias que pueden presentarse en FPXRF (EPA 6200)**

Interferencia	Descripción
Efectos físicos de la matriz	Resultan de variaciones en el carácter físico de la muestra. Este tipo de variaciones pueden incluir parámetros como tamaño de partícula, uniformidad, homogeneidad y condición superficial.
Efectos químicos de la matriz	Resultan de las diferencias en las concentraciones de elementos interferentes. Estos efectos son producidos como interferencias espectrales (superposiciones de picos) o como la absorción o potenciación del fenómeno de rayos X. Ambos efectos son comunes en suelos contaminados con metales pesados.
Humedad	El contenido de humedad puede afectar la precisión del análisis del suelo, al igual que de los análisis de muestras de sedimentos. Cuando el contenido de humedad es de 5-20%. El error en general es mínimo. Sin embargo, el contenido de humedad puede ser un error mayor cuando se analizan muestras de suelos superficiales que están saturadas de agua. Este error puede ser minimizado al secar las muestras en un horno de convección o tostador.
Posición inconsistente de la muestra	La posición inconsistente de las muestras frente a la sonda de la ventana, es una fuente potencial de error, debido a que la señal de rayos X disminuye a medida que la distancia de la fuente radiactiva aumenta.
Sobreposición de espectros	Cuando están presentes en una muestra, ciertas líneas de rayos X de diferentes elementos cercanas en energía y, por lo tanto, puede causar interferencias produciendo una superposición severa del espectro. El grado en que un detector puede resolver los dos picos diferentes depende de la resolución energética del detector. Si la diferencia de energía entre los dos picos en electronvolts es menor que la resolución del

Interferencia	Descripción
	<p>detector en voltios de electrones, entonces el detector no podrá resolver completamente los picos</p>
<p>Cambios en la temperatura ambiente</p>	<p>Los cambios de temperatura ambiente pueden afectar el aumento de los amplificadores que producen un desvío del instrumento. El aumento o desvío es principalmente una función de los componentes electrónicos (amplificador o preamplificador) y no del detector, ya que la mayoría de los detectores de instrumentos se enfrían a una temperatura constante. La mayoría de los instrumentos FPXRF tienen un control automático de aumento incorporado. Si al control automático de aumento se le permite hacer ajustes periódicos, el instrumento compensará la influencia de los cambios de temperatura en su escala energética. Si el instrumento FPXRF tiene un aumento automático de la función de control, el operador no tendrá que ajustar el aumento del instrumento, a menos que se produzca un mensaje de error. Si aparece un mensaje de error, el operador debe seguir las instrucciones del fabricante para solucionar el problema. A menudo, esto implica realizar una nueva calibración energética</p>
<p>Uso de estándares de calibración de sitio específico</p>	<p>Si se usa SSCS para calibrar un instrumento FPXRF, las muestras recolectadas deben ser representativas del sitio investigado. El muestreo representativo del suelo garantiza que la muestra o grupo de muestras refleja con precisión las concentraciones de los contaminantes de preocupación en un momento y lugar determinados. Los resultados analíticos para muestras representativas reflejan variaciones en la presencia y concentración de contaminantes a lo largo de un sitio. Las variables que afectan la representatividad de la muestra incluyen diferencias en el tipo de suelo, contaminante, variabilidad de la concentración, recolección de muestras, variabilidad de la preparación, y variabilidad analítica, todo debe minimizarse tanto como sea posible.</p>

### 1.8.8 Aplicaciones de fluorescencia de rayos X de campo portable

Las principales aplicaciones de la técnica de FPXRF se enlistan a continuación: (Olympus DP 6000, 2018)

- Aleaciones y metales

FPXRF efectúa un análisis altamente específico de los componentes químicos de los materiales para identificar de manera rápida y precisa los grados de aleación y los metales puros. El análisis e identificación de los componentes químicos de las aleaciones se realiza en pocos segundos, tanto en la simple etapa de clasificación como en la difícil tarea de separación de los grados, y tanto en la inspección de los materiales entrantes como en la etapa de verificación del producto final.

- Evaluación de productos de consumo y productos electrónicos

La técnica de FPXRF permite inspeccionar grandes cantidades de productos electrónicos y de consumo en todo momento y lugar. Se efectúan rápidamente inspecciones no destructivas simples para la conformidad reglamentaria de Pb, Cd, Hg, Br y de muchos otros elementos

- Educación e Investigación

En los rubros académicos se efectúa análisis de elementos, desde el Mg hasta el U según la concentración en el intervalo de mg/kg a porcentaje masa/masa. Es posible analizar más de 25 elementos in situ y producen resultados inmediatos cuando el tiempo es escaso, o cuando los materiales no pueden ser transportados, dañados o alterados. Se dota de métodos de calibración, análisis espectrales múltiples.

- Control medioambiental

Es posible medir en segundos niveles altos de elementos contaminantes, metales peligrosos y tóxicos. Se utiliza para analizar muestras de suelos y sedimentos según el método EPA 6200

- Pinturas con contenido de Pb

En el área de recubrimientos se detecta, en tan sólo segundos, cantidades de plomo (Pb) en las pinturas.

- Minería y geoquímica

En estudios de minería y geoquímica es posible proporcionar resultados inmediatos que ayudan en la toma de decisiones durante los procesos de: exploración, control del proceso y tenor de mineral, así como la sostenibilidad medioambiental. Son útiles para detectar metales, minerales y contaminantes en campo. Permiten llevar a cabo mapeos instantáneos de metales para economizar tiempo y dinero.

- Metales preciosos

En la caracterización de metales preciosos brinda resultados rápidos, fiables de la composición de las aleaciones y una clasificación de los quilates mediante ensayos no destructivos.

### 1.8.9 Ventajas y desventajas de la técnica de FPXRF

En la tabla 9 se enlistan las ventajas en cuanto a tiempo, identificación, cuantificación de elementos y desventajas de la cuantificación por FPXRF (EPA 6200).

**Tabla 9. Ventajas y desventajas de la identificación y cuantificación de elementos por FPXRF**

Ventajas	Desventajas
Tiempos de análisis rápidos.	No identifica el compuesto del cual proviene el elemento.
Rango de elementos integrados.	Al ser un análisis de monitoreo primario se recomienda para un muestreo de tipo exploratorio.
Límites de detección inigualables de acuerdo con el elemento de interés y con el alcance del método.	La precisión depende de la homogeneidad de la muestra.
Excelente precisión DER <15 %.	
Alta sensibilidad para la identificación de magnesio (Mg), aluminio (Al), silicio (Si) y azufre (S)	
Identificación de metales de transición o pesados y tierras raras.	
Técnica de análisis verde, no hay generación de residuos.	
Costos de análisis menores con respecto a OES-ICP.	

## 1.9 Descripción de la zona de estudio

### 1.9.1 Ubicación geográfica del Estado de Coahuila

Las coordenadas geográficas extremas del estado de Coahuila son: al norte 29° 52' 48", al sur 24° 32' 34" de latitud norte; al este 99° 50' 35", al oeste 103° 57' 36" de longitud oeste, tiene como capital a Saltillo. Representa 7.7 % del territorio nacional, que lo ubica en el tercer lugar nacional en cuanto a extensión territorial. El estado colinda al Norte con Estados Unidos de América; al Este, con Estados Unidos de América y Nuevo León; al Sur, con Nuevo León, Zacatecas y Durango; al Oeste, con Durango, Chihuahua y Estados Unidos de América (INEGI, 2009). El predio de estudio se localiza en el municipio de San Juan de Sabinas, figura 10.



Figura 10. Localización del municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila (INEGI, 2005)

### 1.9.2 Clima

El clima del Estado de Coahuila se describe en un 49 % clima seco y semiseco; el resto es templado subhúmedo localizado en las partes altas de las sierras del sur del estado: San Antonio y Tampiquillo. La temperatura media anual es de 18 a 22 °C para el Estado de Coahuila de Zaragoza. La precipitación promedio anual es de 400 mm (INEGI, 2009).

Específicamente, el municipio de San Juan de Sabinas presenta una temperatura entre 20-24°C, el rango de precipitación es de 400-600mm. El 55 % del municipio presenta un clima semiseco, semicálido mientras que el 45 % seco semicálido (Figura 11).

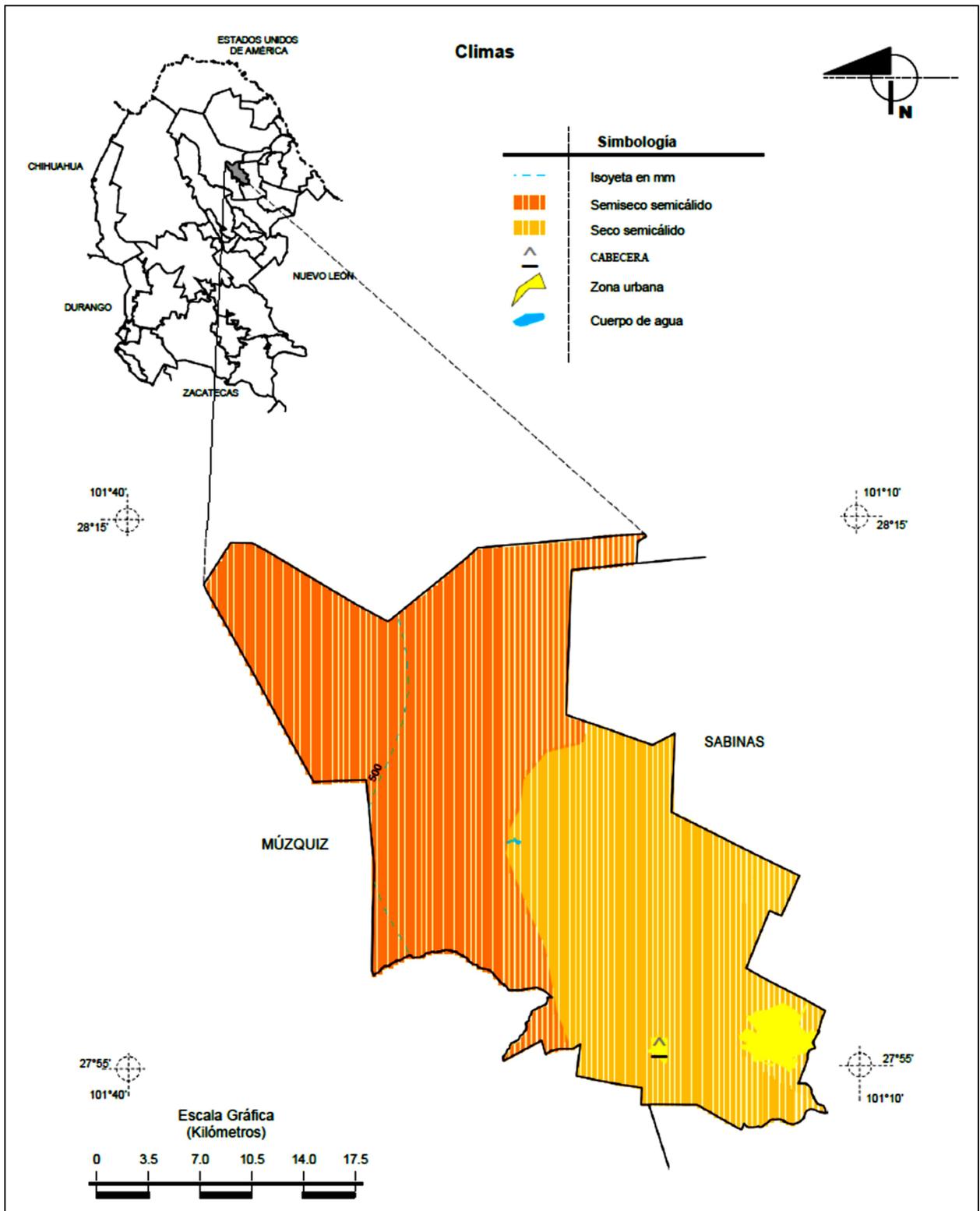


Figura 11. Tipos de climas del municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila (INEGI, 2005)

### **1.9.3 Edafología y geología**

El municipio de San Juan de Sabinas presenta en el 84% suelos del periodo cuaternario, del cretácico en un 12 %, y un 4% no se encuentra definido, como se puede observar en la figura 12, los suelos presentes son: calcisol, chernozem, fluvisol, kastañozem, leptsol, regosol, vertisol, phaeozem. La descripción de estos suelos se presenta en la tabla 11; el suelo es de tipo aluvial en un 56% (INEGI, 2005).

En la figura 13 se observa la geología del municipio de San Juan de Sabina, específicamente se muestra roca de tipo sedimentaria. En un 32% se trata de conglomerado, el 11% caliza-lutita y el 1% lutita-arsénica.

En México existen 26 de los 32 grupos reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, 2007). En la figura 14 se muestran los porcentajes en cuanto a la superficie relativa de los principales grupos de suelo en México, en esta, se puede observar la superficie que ocupan algunos de los suelos dominantes en la República Mexicana, dominando los Leptosoles (28.3% del territorio), Regosoles (13.7%), Phaeozems (11.7%), Calcisoles (10.4%), Luvisoles (9%) y Vertisoles (8.6%) que, en conjunto, ocupan 81.7% de la superficie nacional (INEGI, 2007).

En la figura 14 se puede observar que en un 52.4% territorio nacional dominan los suelos como leptosoles, regosoles y calcisoles que tienen limitaciones a la productividad natural ya que son suelos poco fértiles y con pocos nutrientes para las plantas, lo cual dificulta su aprovechamiento agrícola y aumenta su vulnerabilidad a la erosión, este tipo de suelos se ubican principalmente en las zonas montañosas y regiones secas (SEMARNAT, 2012).

En la tabla 10 se hace una descripción de las características de los suelos dominantes en el municipio de San Juan de Sabinas.

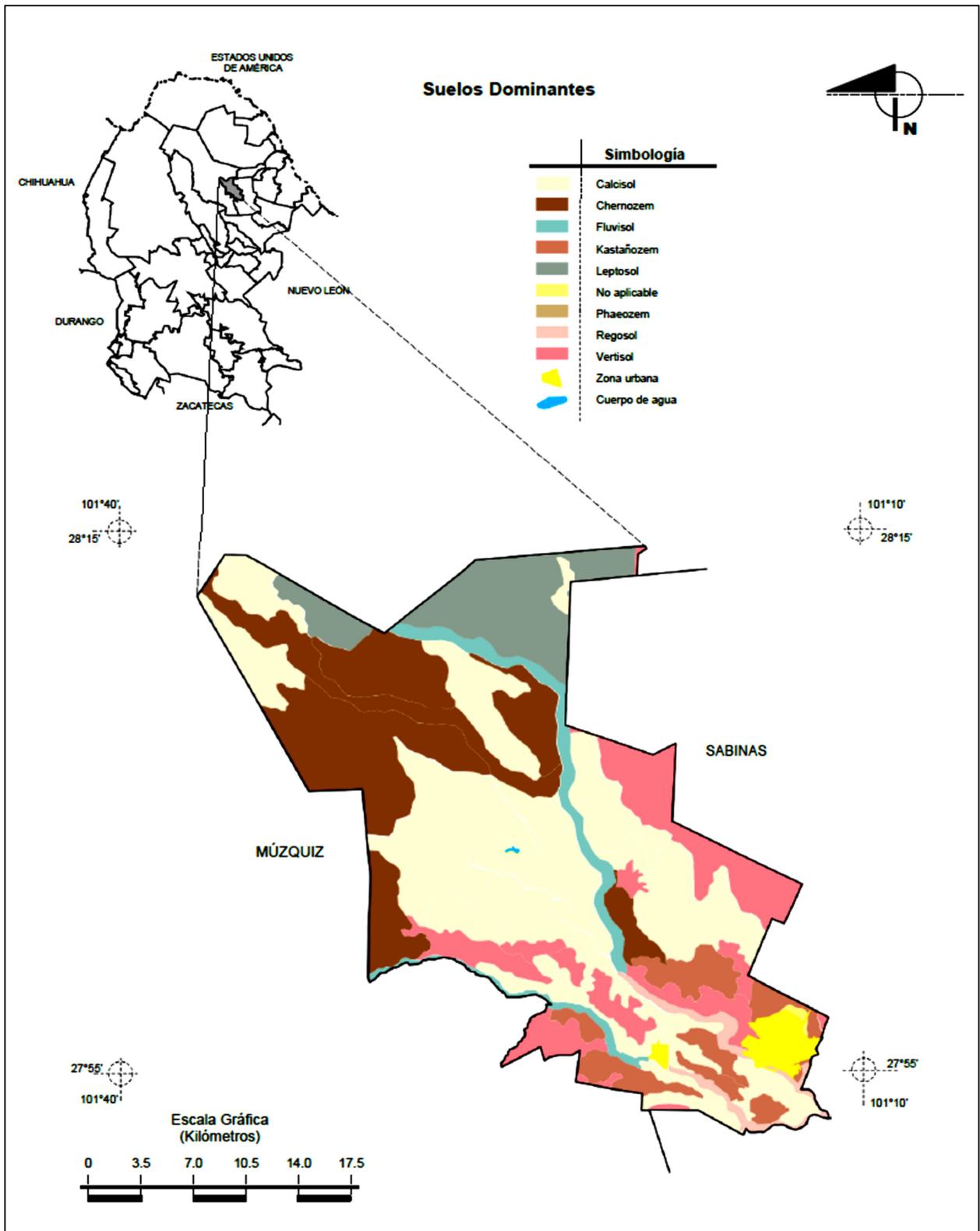


Figura 12. Tipos de suelos presentes en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila (INEGI, 2005)

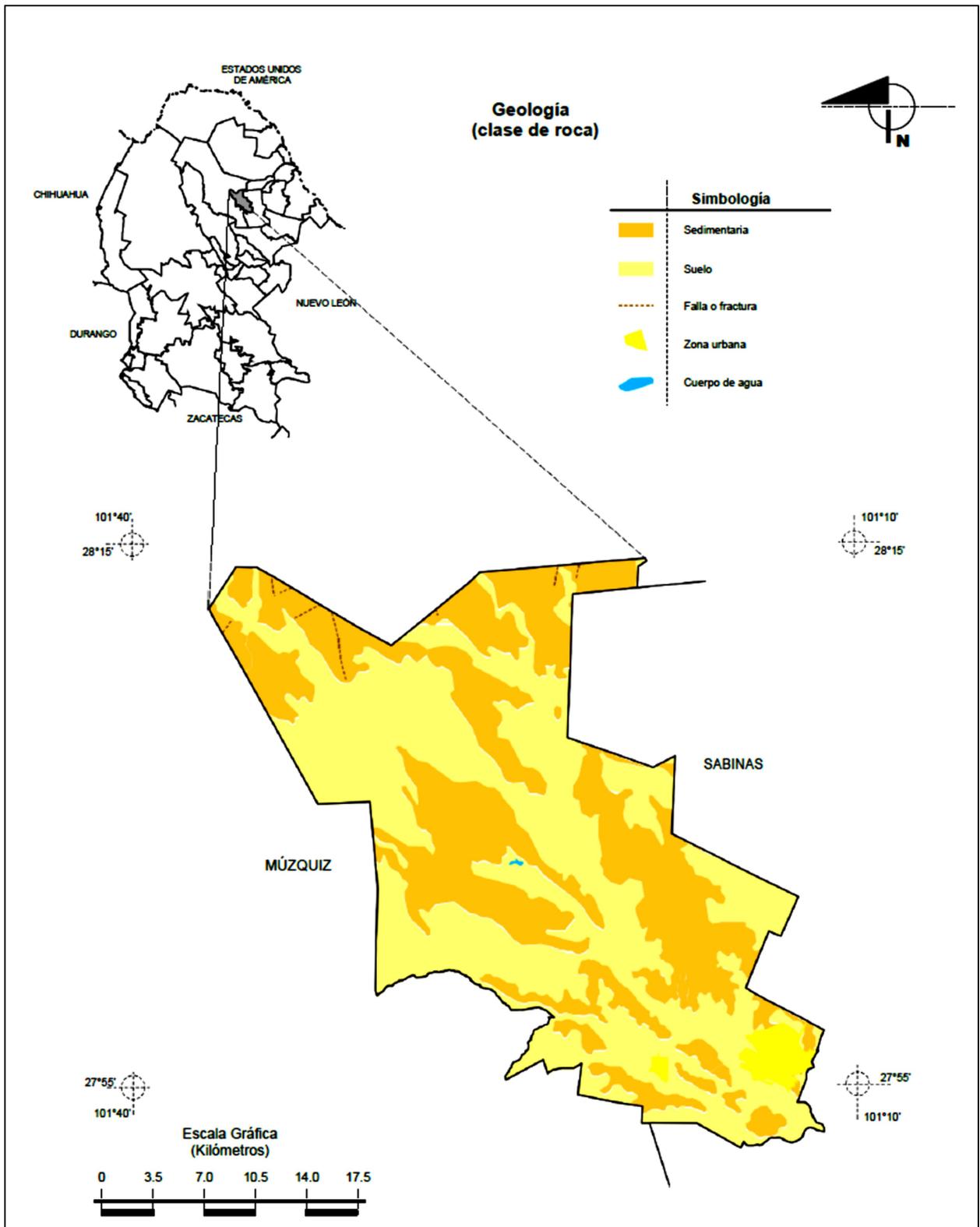


Figura 13. Clase de rocas presentes en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila (INEGI, 2005)

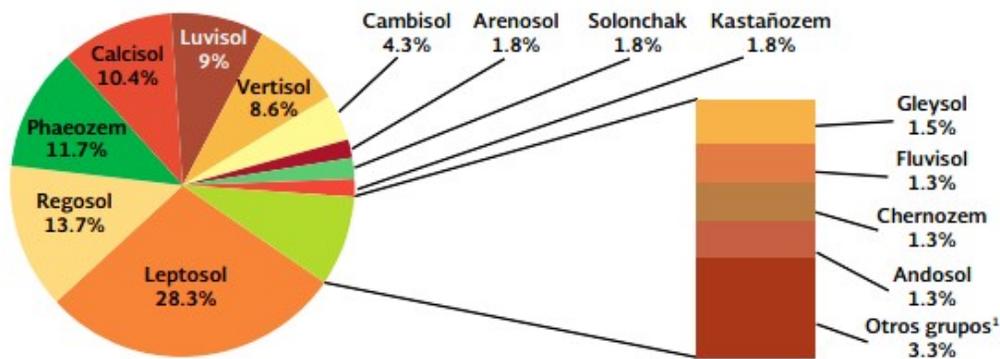


Figura 14. Superficie Relativa de los principales grupos de suelo en México (INEGI, 2007)

Tabla 10. Descripción de suelos dominantes en el municipio de San Juan de Sabinas

Suelo	Descripción
Calcisol	Del latín <i>calx</i> , cal; hace referencia a una acumulación de carbonato de calcio. Característico de zonas áridas y semiáridas.
Chernozem	Del ruso <i>chern</i> , negro y <i>zemlja</i> , tierra; connotativo de suelos ricos en materia orgánica que tienen un color negro. Presentan una superficie de color negro, con un alto contenido de humus bajo vegetación de praderas.
Fluvisol	Del latín <i>fluvius</i> , río; connotativo de depósitos aluviales. Son suelos depositados por el agua; ocurren generalmente en las margenes de las corrientes, de las cuales reciben aportes de materiales recientes de manera regular.
Kastañozem	Del latín <i>castanea</i> , parda y del ruso <i>zemlja</i> , tierra; connotativo de suelos ricos en materia orgánica que tienen un color pardo. Es típico de zona de pastizales y se diferencia principalmente de los Chernozem y Phaeozem por su contenido de carbonatos.
Leptosol	Del griego <i>leptos</i> , delgado; estos son suelos delgados, debilmente desarrollados. Son de los suelos más abundantes en el país.
Phaeozem	Del griego <i>phaios</i> , oscuro y del ruso <i>zemlja</i> , tierra; connotativo de suelos ricos en materia orgánica que tienen un color oscuro. Se caracterizan por ser suelos fértiles.
Regosol	Del griego <i>rhegos</i> , manto; connotativo de un manto de material suelto sobrepuesto a la capa dura de la tierra. Estos suelos se consideran poco desarrollados sobre materiales no consolidados y en general están constituidos por material suelto, semejante a la roca de la cual se forma, generalmente se encuentran sobre topografía accidentada.
Vertisol	Del latín <i>vertere</i> , invertir; connotativo de volver hacia la superficie del suelo. Estos suelos son arcillosos generalmente de color negro, gris o pardo rojizo debido al tipo de arcilla expandible, presenta grietas anchas y profundas cuando esta seco y pegajoso cuando esta húmedo.

#### **1.9.4 Minería**

La historia del Estado de Coahuila se encuentra estrechamente relacionada con la minería como actividad principal desde la época de la colonia. Con la fundación de Minas de la Trinidad, en 1577 nace lo que hoy conocemos como la ciudad de Monclova, el descubrimiento y explotación del carbón desde 1828, cobre en la mina Pánuco en 1870, óxido de zinc, plata y plomo en Sierra Mojada en 1879 y plata, plomo y zinc en Reforma-Santa Teresa en 1890; más recientemente se realiza la explotación de fluorita, celestita, sales de sodio-magnesio, yeso, barita y dolomita (SGM, 2017).

El estado de Coahuila participó en el año 2016 con el 3.36 % del valor de la producción minera nacional, ocupando el primer lugar en la producción de hierro, carbón, celestita, sílice, sulfato de magnesio, sulfato de sodio, bismuto y cadmio; segundo lugar en fluorita, tercero en barita, cuarto en dolomita, quinto en agregados pétreos, y en menor proporción yeso, arcillas, grava, arena, caliza y plata.

El valor de la producción minera estatal en el 2016 ascendió a \$15,934'905,694 participando con el 3.36 % del valor total nacional que fue de \$473,768'330,840 pesos (SGM, 2017).

#### **1.10 Diagnóstico Ambiental de sitios contaminados**

Un diagnóstico ambiental es el conjunto de estudios, análisis y propuestas de actuación y seguimiento que abarcan el estado ambiental en todo el ámbito territorial local, el proceso debe de incluir una propuesta realista de acciones de mejora que resuelvan los problemas diagnosticados y un sistema de parámetros que permitan su medición, control y seguimiento. (MIGAM)

La importancia del diagnóstico ambiental radica en que debe:

- Definir una correcta política ambiental que haga posible el desarrollo sostenible de los recursos.
- Identificar aquellas incidencias ambientales que afectan a la entidad local, con el objetivo de subsanarlas.
- Conocer el cumplimiento de la legislación ambiental aplicable.
- Proporcionar a la entidad local un punto de arranque para la ejecución y establecimiento de actuaciones ambientales en el territorio (proyectos, estudios, organización interna).
- Facilitar la puesta en marcha de los sistemas de participación ciudadana y marcar el punto de partida

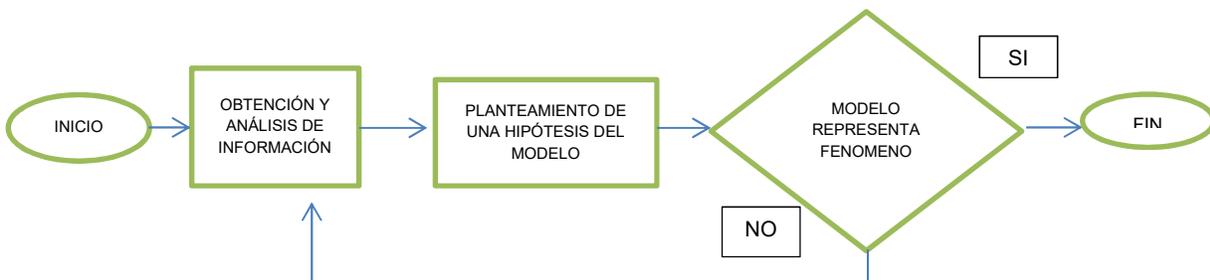
En el diagnóstico ambiental se puede utilizar un modelo conceptual. Un modelo conceptual es la representación esquemática de un sistema ambiental y de los procesos físicos, químicos y biológicos que determinan el transporte de los contaminantes desde la fuente de emisión hacia los diversos medios ambientales y de ahí a los posibles receptores del sistema representado. El modelo conceptual es una herramienta muy útil para representar de manera clara y concisa el desarrollo de un evento de contaminación ambiental (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

La remediación de suelos contaminados utiliza el modelo conceptual como una herramienta fundamental para definir la extensión de la afectación con base en el riesgo potencial de exposición a organismos vivos presentes en un sitio

El modelo conceptual tiene como objetivos:

- Identificar la forma en la que los contaminantes pueden llegar de la fuente de emisión a los organismos vivos, incluidos los seres humanos.
- Identificar las áreas de muestreo.
- Determinar la necesidad de llevar a cabo una evaluación del riesgo ambiental, a fin de delimitar las zonas que requieran ser remediadas.
- Identificar los casos en los cuales será necesario implementar medidas correctivas inmediatas con el fin de interrumpir las rutas de exposición para eliminar o disminuir el riesgo a los organismos receptores.

En la figura 15 se esquematiza el desarrollo del modelo conceptual, el cual se inicia con el planteamiento de una hipótesis sobre las posibles rutas que pueden seguir los contaminantes desde la fuente de emisión hasta los organismos receptores y las posibles vías de exposición.



**Figura 15. Proceso para la conformación de un modelo conceptual (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004)**

En el modelo conceptual se toman en cuenta los siguientes puntos los cuales ayudaran a la determinación del grado de contaminación del sitio y a la propuesta de remediación de acuerdo con los resultados obtenidos y su análisis.

1. Caracterización del sitio.

Pretende dar a conocer las características físicas, climáticas, biológicas y socioeconómicas del sitio que pueden ser importantes o determinantes en la definición de rutas y vías de exposición. Cuando no existe población humana potencialmente expuesta, el modelo habrá de identificar la exposición de especies vegetales o animales con el fin de determinar su vulnerabilidad ante los contaminantes regulados por la NOM-147-SEMARNAT.

2. Identificación de los contaminantes.

Después de la obtención de los resultados de los análisis de los suelos muestreados, se establece el origen, naturaleza y distribución de los contaminantes presentes en el sitio de estudio. Con base en esto se pueden identificar los posibles mecanismos de liberación y transporte.

3. Identificación de los mecanismos de liberación y transporte de los contaminantes.

Busca determinar cómo los contaminantes se pueden transferir de la fuente de emisión al suelo y de este al aire o agua lo cual permitirá conocer la(s) ruta(s) de transporte.

4. Identificación de posibles receptores y posibles rutas de exposición.

Se debe inferir si los contaminantes pueden llegar a algún receptor por aire, agua o suelo. Los receptores pueden ser poblaciones humanas o biológicas.

Por otro lado, una ruta de exposición debe de considerar los siguientes factores para que se considere completa, medio contaminado, mecanismo de liberación, mecanismos de transporte y puntos de contacto.

5. Identificación de vías de exposición.

Se considera como el proceso por el cual el contaminante entra en contacto directo con el organismo receptor y puede ser por ingestión, inhalación y/o contacto dérmico.

6. Integración y representación del modelo

En este punto se concluye con toda la información obtenida en los puntos anteriores.

La figura 16 ejemplifica la integración y representación del modelo conceptual de acuerdo con lo descrito en los puntos del 1-5.

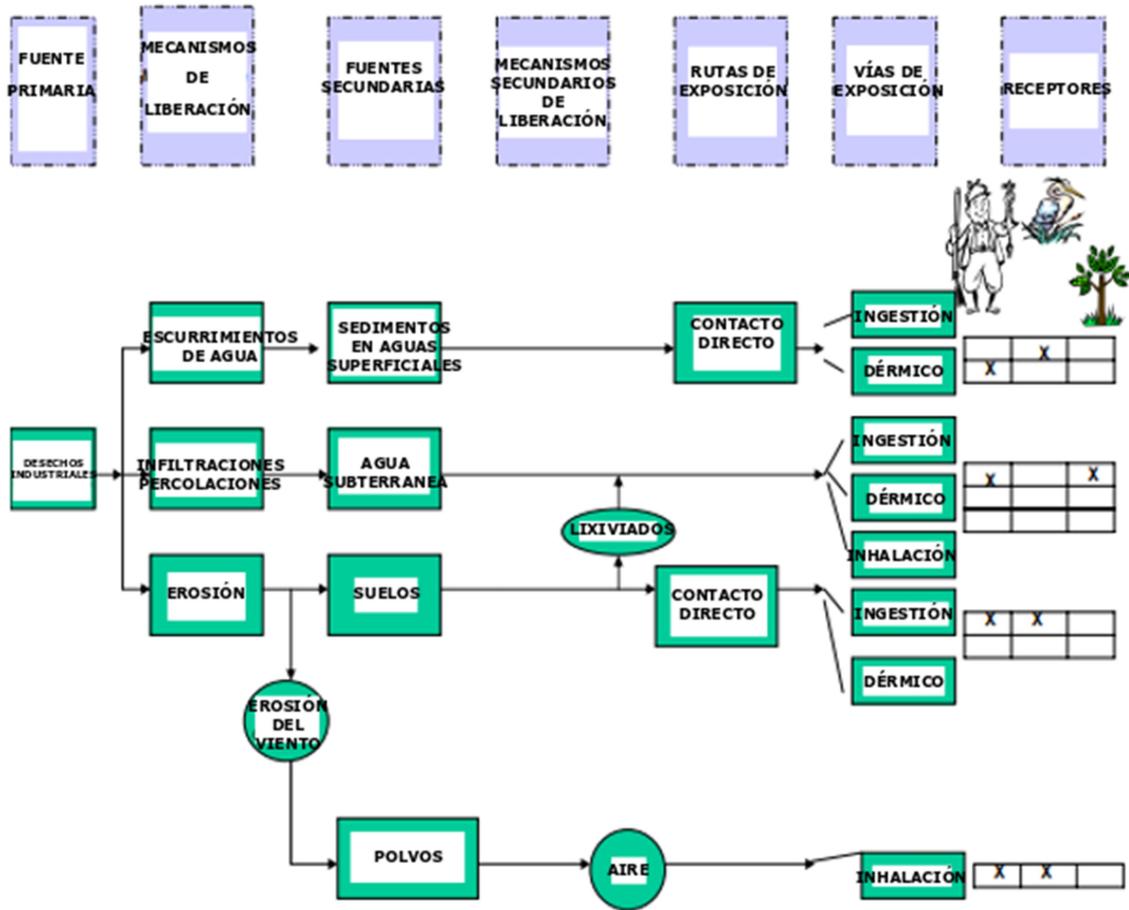


Figura 16. Ejemplo de integración y representación del modelo conceptual. (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004)

## Capítulo 2. Metodología

### 2.1 Muestreo

Se realizó un muestreo exploratorio por parte del personal de LABQA y del Instituto de Geología, siguiendo la NMX-132-SCFI-2016, el mapa de la localización de los puntos se muestra en la Figura 17.

El muestreo en la planta de Zn se realizó identificando el sitio de muestreo con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para obtener las coordenadas correspondientes. En cada sitio de muestreo se cavó una zanja con ayuda de una retroexcavadora, se tomaron muestras de suelo a diferentes profundidades y se tamizaron con malla 10, posteriormente se colocó en una bolsa de cerrado hermético con su correspondiente clave de campo.

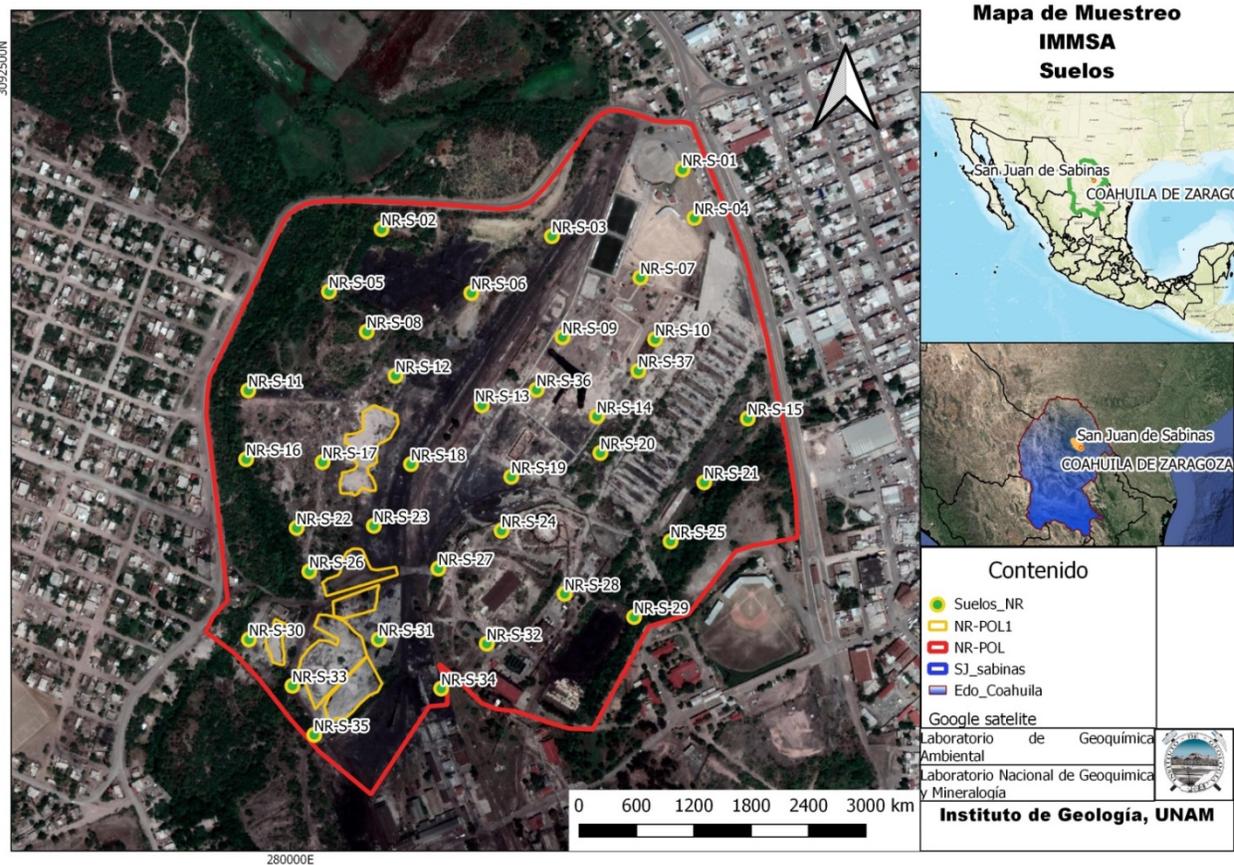


Figura 17. Mapa de distribución de muestreo de suelos (Instituto de Geología UNAM, 2018)

### **2.1.1 Técnica de muestreo**

Para muestras superficiales (0-5 cm de profundidad) la toma fue manual con cuchara de acero inoxidable.

El muestreo vertical se realizó a través de pozos que permitieron describir el perfil del suelo y obtener las muestras a las profundidades proyectadas usando una cuchara de acero inoxidable.

### **2.1.2 Manejo y control de las muestras**

Las muestras fueron envasadas en bolsas de cerrado hermético y etiquetadas con su correspondiente clave de campo, lugar del muestreo, proyecto, fecha y hora de muestreo, así como las iniciales de la persona quien tomo la muestra. Posteriormente toda la información correspondiente a cada una de ellas fue registrada en la bitácora del muestreo.

### **2.1.3 Traslado de las muestras y cadena de custodia**

Durante el traslado se evitó el efecto de factores externos que pudieran cambiar la naturaleza de las muestras, como altas temperaturas y exposición a los rayos ultravioleta. Cada una de las bolsas que contenían las muestras se colocaron en cajas de plástico. La cadena de custodia acompañó a las muestras desde su toma, durante su traslado y hasta el ingreso al laboratorio.

### **2.1.4 Aseguramiento y control de la calidad del muestreo**

Para asegurar la calidad en el muestreo se utilizó como control de calidad el 5% de muestras duplicadas en campo.

## **2.2 Preparación de la muestra**

La preparación de la muestra se llevó a cabo siguiendo el procedimiento de la NMX-132-SCFI-2016, y la cual se detalla a continuación.

### **2.2.1 Recepción y registro**

Al llegar las muestras al laboratorio, fueron registradas con la clave de campo indicada en cada una de las bolsas que las contenían, posteriormente se asignó a cada una clave interna.

Una vez ingresadas al laboratorio se llevó a cabo la preparación de las muestras para análisis, lo que incluyó el secado, el cribado, la homogeneización y la molienda.

### **2.2.2 Secado**

El secado se realizó con el propósito de facilitar el manejo de las muestras y disminuir los cambios químicos indeseables. Las muestras de suelo se secaron al aire y a temperatura

ambiente en la sombra. El secado se realizó extendiendo las muestras de suelo en charolas. Las muestras se extendieron sobre la charola logrando una profundidad inferior a 2.5 cm, se colocaron en la sombra a una temperatura no mayor a 35°C, y a una humedad relativa entre 30 y 70%.

### **2.2.3 Cribado**

A las muestras secas, y antes de ser disgregadas, se le retiraron los fragmentos mayores a 2mm, y los restos de plantas. La disgregación de las muestras se realizó manualmente con un mazo de madera. Una vez disgregadas las muestras, se cribaron usando un tamiz de 2 mm de diámetro (malla 10) de acero inoxidable.

### **2.2.4 Homogeneizado y cuarteo**

El homogeneizado y cuarteo asegura que la cantidad de la muestra que se analiza representa la composición del suelo. Después de que el suelo es tamizado, se homogeneiza y cuarteo, para obtener la fracción que se utiliza para los análisis. En el laboratorio se separaron dos partes: el retenido original y la fracción de análisis.

### **2.2.5 Molienda**

Una submuestra de la fracción de análisis se molió en un molino de bolas Pulverisette 6 marca Fritsch. Las condiciones de molienda fueron 4 min a 400 rpm. En primer lugar, se realizó una purga con arena, seguido de una purga con la respectiva muestra. Posteriormente la muestra se muele y el molino se limpia finalmente con arena a 400 rpm por 2 min.

La fracción del retenido original se almacenó debidamente cerrada e identificada para posteriores comprobaciones u otros usos.

## **2.3 Análisis por fluorescencia de rayos X de campo portátil (FPXRF)**

Las muestras molidas se analizaron por medio de espectrometría de fluorescencia de rayos X con un equipo portátil de la marca Olympus modelo Delta Professional 6000 PXRF (Portable X Ray Fluorescence).

Para que se demuestre la competencia de un analista en cuanto a repetibilidad y precisión, y para poder efectuar los análisis, se realizan en primer lugar las llamadas pruebas iniciales de desempeño o de competencia técnica (NMX-EC-17025-IMNC-2018), ver en el anexo II.

### 2.3.1 Análisis mediante el equipo portátil de fluorescencia de rayos X

La muestra molida se colocó en una bolsa de poliuretano calibre 400, se homogeneizó y se transfirió a un contenedor de teflón plástico diseñado especialmente para el equipo FPXRF.

El contenedor constó de tres partes (contenedor 31-40 mm, bastidor y tapa), fue necesario colocar sobre el contenedor una membrana Millard (2.5 µm) y encima el bastidor de manera que se estire la membrana y quede tensa alrededor del contenedor, posteriormente se añadió la muestra cubriendo como mínimo de ¼-¾ del contenedor, se colocó una capa de algodón y la tapa, se etiquetó y mientras se hizo su correspondiente lectura, se guardó en un desecador para evitar la generación de humedad en la muestra.

Las determinaciones en el equipo de FPXRF se realizaron de acuerdo con los siguientes criterios:

#### 1. Calibración energética del equipo

Para comprobar que el equipo funcionaba correctamente, se realizó la calibración antes de iniciar con la lectura de las muestras, cada día. Esta calibración se realizó colocando una placa de Pb en la ventana donde atraviesa el rayo incidente, si la lectura se encontró en un índice de 64000-66000 cps y una resolución de 145-155 eV se aceptó la calibración, y se procedió con las lecturas por modo suelo o modo geoquímico, según correspondía.

#### 2. Control de calidad

Los controles de calidad se usaron al inicio y al final del análisis, los criterios de aceptación dependieron del modo en el cual se realizaron los análisis (modo suelos o geoquímico). En la tabla 11 se muestran los valores de concentración de los materiales de referencia certificados y los criterios de aceptación de los controles de calidad para la verificación inicial y final del análisis para modo suelos y geoquímico.

Cabe mencionar que para que estos controles de calidad fueran aceptados el recobro debía ser de ±20% y el porcentaje de Desviación Estándar Relativa (DER) ≤15 %. La manera de obtener los parámetros anteriores fue la siguiente:

$$\text{Recobro} = \frac{\text{Media aritmética}}{\text{Valor del control de calidad para cada elemento}} * 100$$

$$DER = \frac{DS}{Media\ Aritmética} * 100$$

También fue necesario considerar que dentro del control de calidad se utilizó el criterio de muestra duplicada en la cual el parámetro a considerar fue evaluar la precisión con una DER <15 %.

En la tabla 12 se muestran, las condiciones que se utilizaron para realizar el análisis por FPXRF para modo suelo y modo geoquímico, en el anexo IV se muestra en qué tipo de casos se seleccionó cada modo de análisis.

**Tabla 11. Características del análisis con el equipo de PXRF en modo suelos y geoquímico**

<b>Modo de análisis</b>	<b>No. de rayos incidentes</b>	<b>Tiempo de medición por rayo (s)</b>	<b>No. repeticiones</b>	<b>Tiempo total de análisis (min)</b>
Suelos	3	60	3	9
Geoquímico	2	60/50	3	5.3

En el siguiente capítulo se muestran los resultados, así como el análisis de estos.

**Tabla 12. Controles de calidad utilizados para el análisis con el equipo FPXRF modo suelos y geoquímico y sus criterios de aceptación**

		As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe	Unidad
Verificación Inicial/Final Modo Suelos												
Blanco		<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	mg·kg <sup>-1</sup>
NIST2710a		1540	12.3	23	3420	2140	5520	52.5	4180	8	43200	
NIST2711a		107	54.1	52.3	140	675	1400	23.8	414	21.7	28200	
DO99-540		171	225	144	174	232	111	S/I	207	98.3	NR	
Criterio de aceptación: Recobro 20%												
Muestra duplicada	DER	≤15%										
Verificación Inicial/Final Modo Geoquímico												
Blanco		<LD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	% m/m
NIST2710a		0.154	0.00123	0.0023	0.342	0.214	0.552	0.00525	0.418	0.008	4.32	
NIST2711a		0.0107	0.00541	0.00523	0.014	0.0675	0.14	0.00238	0.0414	0.00217	2.82	
DO99-540		0.0171	0.0225	0.0144	0.0174	0.0232	0.0111	S/I	0.0207	0.00983	NR	
Criterio de aceptación: Recobro 20%												
Muestra duplicada	DER	≤15%										

<LD: valor menor al límite de detección del método

DER: Desviación estándar relativa

## Capítulo 3. Resultados y discusión

Los resultados y su análisis son divididos de acuerdo con la profundidad a la cual fueron tomadas las muestras, en superficiales y subsuperficiales. En la parte inferior de las tablas se muestra una estadística descriptiva de los resultados, en los gráficos se muestran las concentraciones en función de la profundidad de los elementos normados por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para describir su comportamiento vertical, también se hace lo mismo en algunos puntos de muestreo para los elementos no normados Sb, y Zn. Finalmente se tienen diversas figuras que muestran los mapas de la zona de muestreo y que permiten visualizar y poder determinar la zona contaminada.

### 3.1 Muestreo

Los días 5-7 de Junio de 2018 se realizó el muestreo exploratorio de suelos en la antigua planta de Zn y el muestreo de valores de fondo por parte del personal de LABQA y del Instituto de Geología con el propósito de determinar las concentraciones de metales y metaloides en suelos y subsuelos por medio de espectrometría de fluorescencia de rayos X para los elementos potencialmente tóxicos.

En la figura 18 se muestra la distribución del muestreo de los suelos dentro de la planta. En el anexo VIII se presentan el número total de muestras de suelos para valores de fondo, y las coordenadas de cada punto de muestreo, así como las muestras de suelos superficiales y subsuperficiales dentro del predio y sus coordenadas.

Las muestras de suelos dentro del predio fueron tomadas a diferentes profundidades, a continuación, en la figura 19 se tienen algunas imágenes del muestreo que representan algunos puntos con contaminación de As, Cd y Pb.

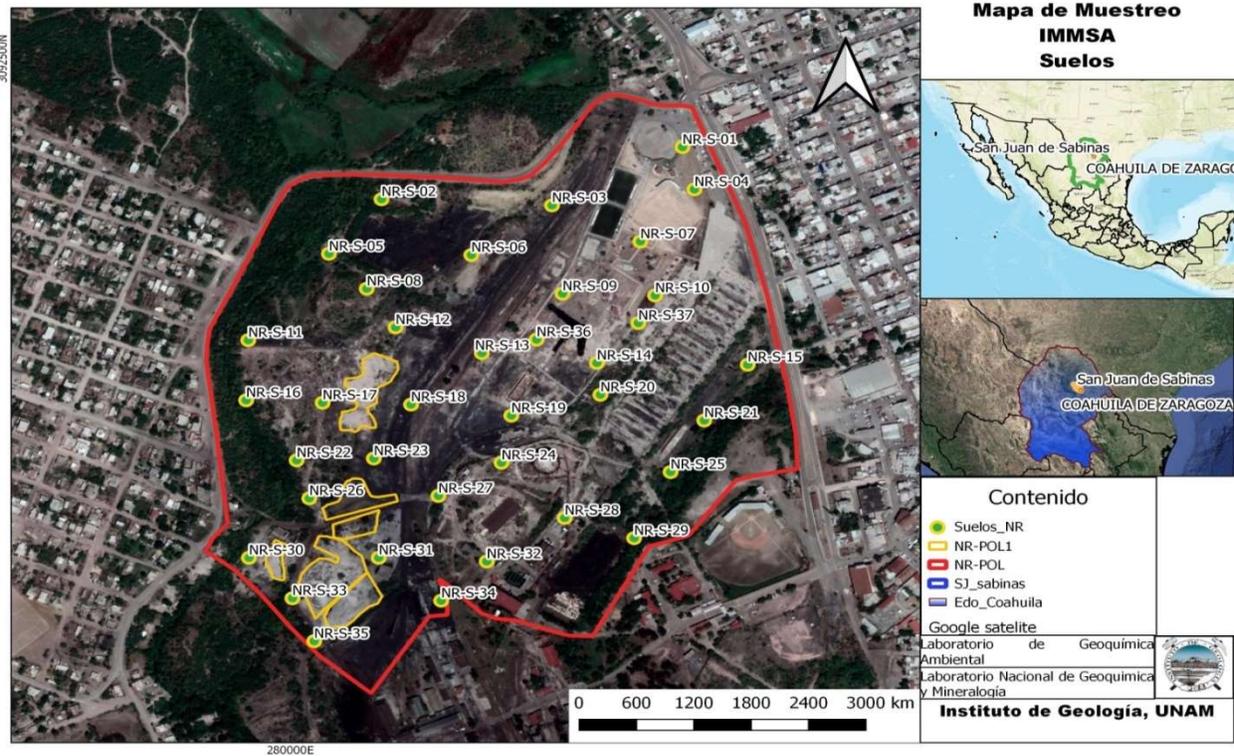


Figura 18. Mapa de distribución de muestreo de suelos (Instituto de Geología UNAM, 2018)



Figura 19. Zanjas significativas de la zona de muestreo

En la figura 19 se pueden observar algunos de los pozos de mayor interés debido al grado de contaminación obtenido a través del análisis de fluorescencia de rayos X. Las zanjas excavadas permitieron observar el perfil del suelo y obtener las muestras a la profundidad proyectada.

### **3.2 Cuantificación de elementos por espectrometría de fluorescencia de rayos X**

Para cuantificar los elementos As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn, Ni, Fe, se usó la técnica de FPXRF, los resultados para los suelos superficiales se muestran en la tabla 13.

En la tabla 13 se muestran las concentraciones ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de los elementos determinados por FPXRF para las muestras analizadas a nivel superficial al igual que una estadística descriptiva de los resultados (promedio, mínimo, máximo y desviación estándar).

En esta tabla se observa que, de acuerdo con los elementos normados en México, solamente As, Cd y Pb sobrepasan los niveles permitidos por la NOM-147 a nivel residencial/agrícola, así como a nivel industrial, estos son resaltados en cifras rojas. La concentración máxima de Pb obtenida a nivel superficial sobrepasa 12 veces el nivel permitido a nivel industrial, encontrándose este valor en la zanja 9 a una profundidad de 0-5 cm. Mientras que el valor máximo para cadmio se encuentra en la zanja 24 y para As en la zanja 9, al igual que en Pb. En el caso de los elementos como Zn y Fe que no se encuentran normados, es importante mencionar que el Zn presenta altas concentraciones encontrándose un valor máximo de 25.3 % masa/masa en la zanja 36; mientras que para Fe la concentración máxima se encuentra en la zanja 14 con un valor de 6.8 % masa/masa. De acuerdo con Lindsay (1979) las concentraciones normales de Fe en suelos son de 3.8 % masa/masa (Citado en Juaréz et al, 2019), Kabata-Pendias y Mukherjee, (2011) señalaron que para Zn no se tienen criterios nacionales o internacionales que representen un suelo industrial contaminado con riesgos potenciales para la salud humana, las concentraciones de suelos de fondo promedio típicas de Zn en el suelo por encima de  $125 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  se pueden atribuir a la contaminación con toxicidad potencial (Citado en Alvaréz et al. 2018)

**Tabla 13. Concentraciones totales de suelos superficiales determinadas por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-1(0-5)	32.00	37.00	46.00	99.00	282.67	548.67	185.33	4889.67	19.33	34608.00
NR-S-2 (0-5)	10.53	ND	19.93	23.00	147.33	49.13	ND	1104.00	18.00	12075.00
NR-S-3 (0-5)	200.00	71.67	93.33	2806.33	785.00	1535.33	115.67	49748.33	ND	55482.33
NR-S-4 (0-5)	58.67	111.00	48.00	292.00	403.33	1181.67	502.33	13190.00	22.50	31690.33
NR-S-5 (0-5)	10.53	ND	29.27	49.33	254.67	79.93	ND	1067.67	20.33	30605.33
NR-S-6(0-5)	19.07	13.50	39.60	36.67	139.33	123.40	ND	1565.67	ND	21240.33
NR-S-7(0-15)	25.57	35.00	21.40	55.00	253.33	104.87	0.00	1340.67	22.50	20219.00
NR-S-8(0-5)	29.53	25.00	34.67	319.33	351.00	272.00	23.67	6420.33	16.00	38140.67
NR-S-9(0-5)	1258.33	683.33	290.00	7852.33	2646.00	9755.00	584.33	249300.00	ND	61530.00
NR-S-10 (0-5)	53.67	56.67	80.67	958.33	547.33	529.00	60.33	18872.33	17.00	30962.00
NR-S-11(0-5)	12.97	16.40	23.17	25.43	55.30	72.83	ND	1389.33	ND	22524.00
NR-S-12(0-5)	37.7	244.3	198.0	385.0	333.0	1137.3	50.3	196186.0	133.3	21106.67
NR-S-13(0-5)	27.67	52.67	46.47	118.00	129.67	190.07	18.50	5804.00	ND	28538.67
NR-S-14(0-5)	418.33	1151.67	117.67	7373.00	1506.67	2867.00	357.67	201300.00	ND	68033.33
NR-S-15(0-5)	366.33	182.67	116.00	9354.00	2530.67	2609.00	261.00	90900.00	26.50	50471.33
NR-S-16 (0-5)	13.07	27.00	30.17	49.33	279.33	175.00	ND	3398.00	21.00	23441.67
NR-S-17 (0-5)	6.33	12.50	41.97	19.37	124.00	45.53	ND	1141.67	ND	12591.33
NR-S-18 (0-15)	6.63	13.73	19.13	19.87	60.60	34.73	ND	919.67	ND	12073.67
NR-S-19 (0-10)	137.33	267.00	52.40	135.33	182.67	528.33	56.00	6239.67	ND	25308.33
NR-S-20 (0-5)	20.47	56.00	38.13	102.67	103.67	143.23	18.67	4903.67	ND	26584.00
NR-S-21 (0-20)	231.67	191.00	88.00	7883.33	2570.00	3247.33	281.67	76200.00	45.50	52152.00
NR-S-22 (0-5)	19.33	86.00	44.00	187.00	173.67	386.00	23.00	11050.00	63.67	14018.33
NR-S-23 (0-5)	38.63	21.33	35.00	744.67	215.00	160.03	22.67	6357.33	10.00	27594.33
NR-S-24 (0-5)	114.00	1171.33	82.00	1077.00	496.33	1799.33	254.67	37591.00	23.33	33913.67
NR-S-25 (0-25)	252.00	154.33	102.00	4720.33	1164.67	1811.67	164.33	59836.67	18.00	37952.67
NR-S-26 (0-5)	10.63	24.67	22.03	52.67	264.67	125.80	ND	5910.33	10.50	11962.33
NR-S-27 (0-5)	65.33	381.00	48.00	319.33	349.33	705.33	84.33	18095.00	13.50	30725.33
NR-S-28 (0-10)	67.67	313.33	67.33	290.67	253.33	670.00	66.00	37388.00	17.00	20676.67
NR-S-29 (0-5)	33.67	74.00	86.00	350.67	311.33	462.00	35.67	11056.67	ND	22698.67
NR-S-30 (0-5)	10.67	107.00	139.00	160.33	218.67	302.00	ND	78912.33	24.67	20906.67
NR-S-31 (0-5)	45.00	79.00	108.00	213.67	313.67	651.00	28.67	56659.67	ND	28355.33
NR-S-32 (0-25)	82.00	163.00	65.33	1228.00	514.00	693.33	100.00	30659.33	17.50	35573.67
NR-S-33 (0-25)	18.97	48.00	71.00	124.67	157.33	192.33	ND	24718.33	11.00	29514.00
NR-S-34 (0-10)	5.37	9.33	17.27	11.57	199.00	17.43	ND	315.33	9.35	12243.00
NR-S-35 (0-30)	17.50	19.67	48.33	54.00	119.67	103.03	ND	7550.33	9.50	35919.00
NR-S-36 (0-5)	1175.33	1013.00	224.33	12218.67	1760.00	6109.67	383.67	252966.67	ND	67266.67
NR-S-37 (0-5)	35.33	46.33	42.00	362.00	330.33	473.00	57.67	19780.00	ND	33205.67
promedio	134.26	198.84	72.31	1623.56	554.77	1078.15	149.45	43100.75	25.65	30862.27
minimo	5.37	9.33	17.27	11.57	55.30	17.43	0.00	315.33	9.35	11962.33
maximo	1258.33	1171.33	290.00	12218.67	2646.00	9755.00	584.33	252966.67	133.33	68033.33
desviación estándar	280.44	314.83	59.85	3130.03	713.85	1902.49	162.80	69152.20	26.41	14970.24
NOM-147 residencial/	22	37	280 NA	NA	400 NA	NA	NA	1600 NA		
NOM-147 industrial	260	450	510			800		20000		

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SAA1-2004

ND: No detectado

Para evidenciar si las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos se encontraban relacionadas entre sí, se obtuvieron los coeficientes de correlación entre As, Cd y Pb.

**Tabla 14. Coeficientes de correlación entre las concentraciones totales de As, Cd, Pb en suelos superficiales por la técnica de FPXRF**

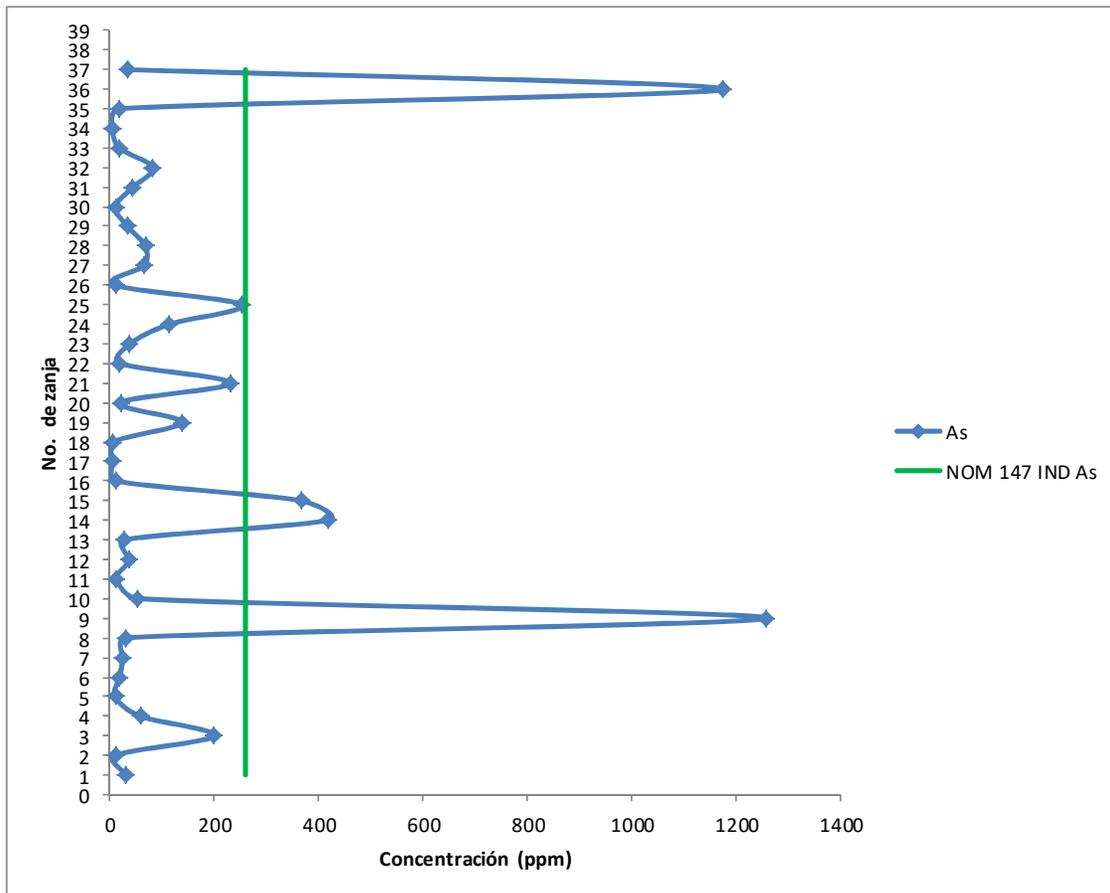
Elemento	As	Cd	Pb
As	1		
Cd	0.6483	1	
Pb	0.9614	0.6441	1

En la tabla 14 se observa la correlación existente entre As y Pb, lo cual vincula a los dos elementos, es decir al encontrar As tenemos una alta posibilidad de encontrar Pb en las muestras también. Esto se observa en los suelos superficiales, que de acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 13 se había notado que las concentraciones máximas obtenidas de estos dos elementos se encuentran en la zanja 9.

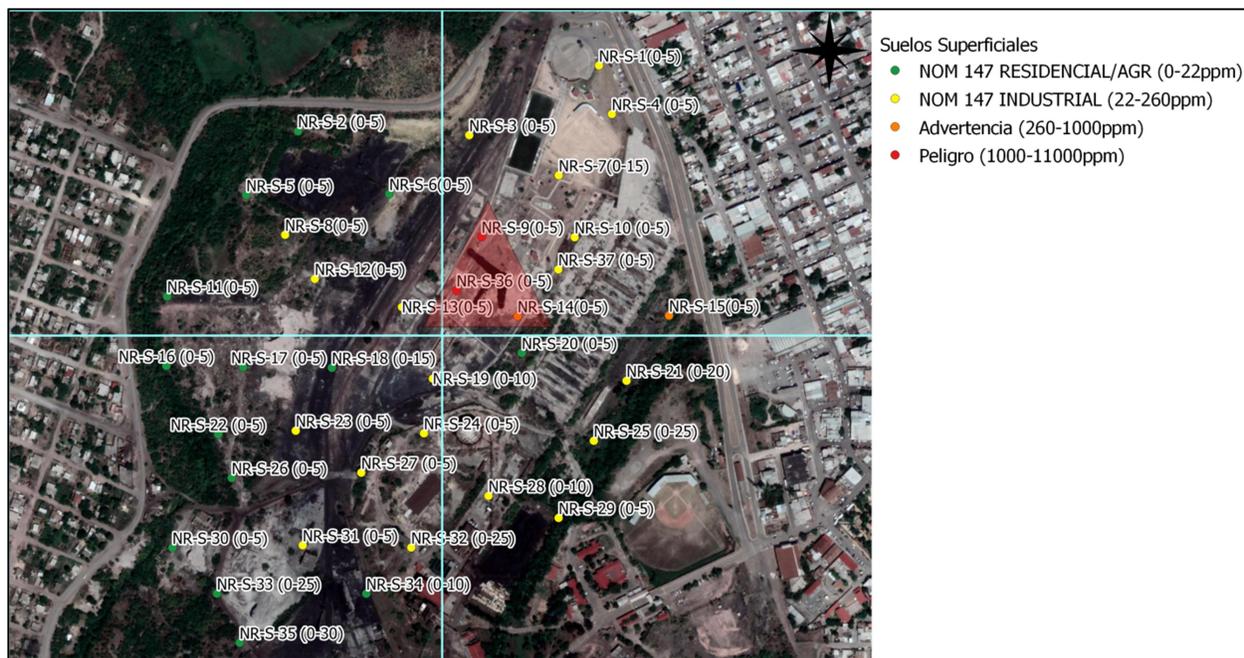
Para visualizar las concentraciones de los elementos normados en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se graficaron los resultados y el límite permisible por esta norma para suelos de uso industrial y adicionalmente se realizaron mapas de la zona de estudio que ubican a los puntos de muestreo de acuerdo con las coordenadas del GPS, se realizó una graduación de las concentraciones de los elementos de mayor interés (As, Cd y Pb), a continuación se presentan las gráficas y figuras correspondientes de los suelos a nivel superficial.

En el gráfico 1 se muestran las concentraciones obtenidas de As en los suelos superficiales por cada zanja o punto de muestreo, en este gráfico se pueden observar las zanjas que se encuentran mayormente contaminadas por este elemento, considerando las concentraciones permitidas por la NOM-147 para suelos de uso industrial. Se observa que los suelos que sobrepasan los valores permitidos de  $260 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  a nivel industrial son los ubicados en las zanjas 9, 14, 15, 25 y 36, teniendo la concentración máxima la zanja 9.

Gráfico 1. Concentraciones superficiales de As ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenidas por FPXRF por zanja o punto de muestreo



A continuación, en la figura 20 se muestran las concentraciones superficiales de As, siguiendo un código de colores para facilitar la visualización; verde significa que la concentración es menor al valor límite para suelos de uso residencial/agrícola (no representan riesgo), amarillo significa que la concentración es menor al valor límite para suelos de uso industrial (no representan riesgos); el color anaranjado indica que sobrepasa el valor permisible para suelos de uso industrial (advertencia); el color rojo indica que la concentración es un orden de magnitud mayor que el límite permisible e indicaría peligro.



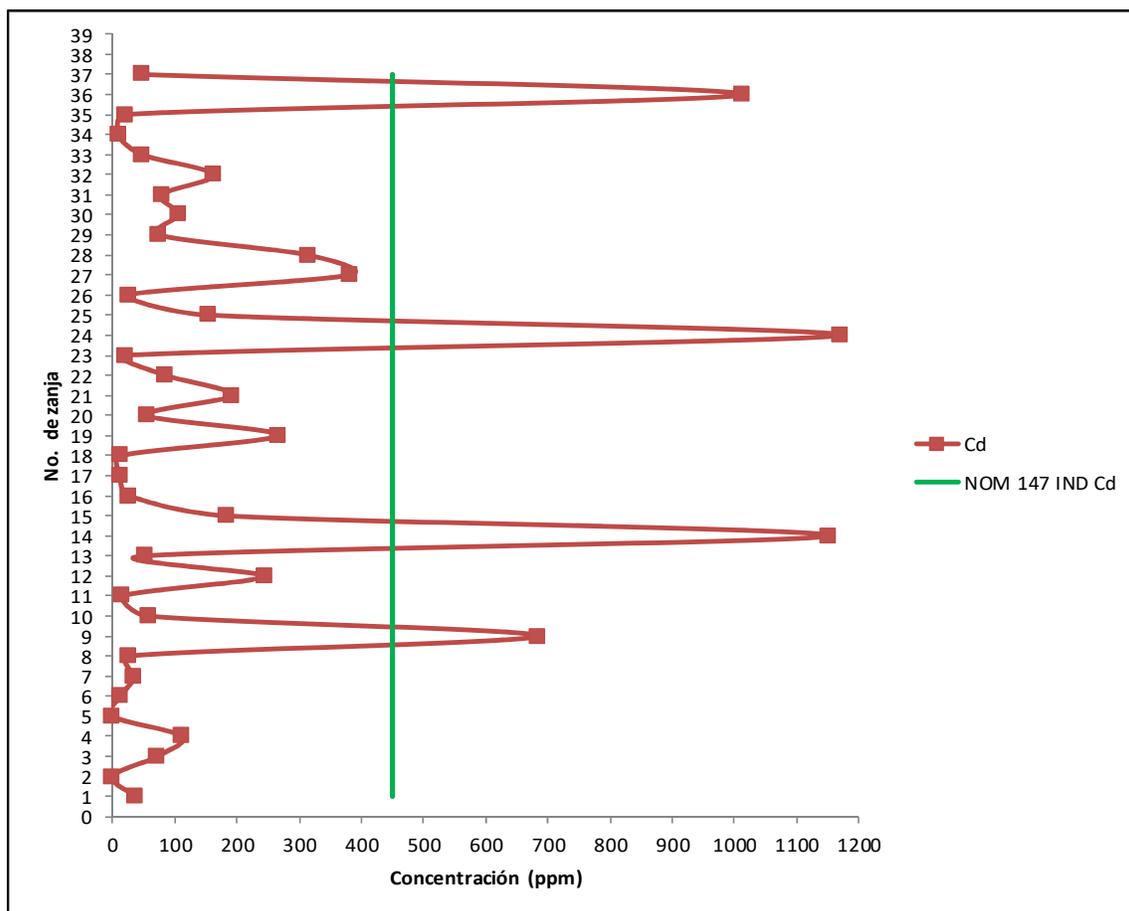
**Figura 20. Mapa de concentraciones de As-Superficial obtenidas por FPXRF**

Código de colores de las concentraciones: verde menor al valor límite para suelos de uso residencial/agrícola; amarillo menor al valor límite para suelos de uso industrial; anaranjado sobrepasa el valor permisible para suelos de uso industrial; rojo indica que la concentración es un orden de magnitud mayor que el límite permisible.

En la figura 20 se puede observar un triángulo de color rojo, el cual delimita la zona que presenta las concentraciones más altas de As dentro de la planta de Zn. Para facilitar la discusión de los resultados se delimitó la zona de muestreo por cuadrantes, se ve que el área mayormente contaminada está localizada en la parte inferior interna del primer cuadrante, en la cual se encuentran las zanjas 9, 36 y 14 estas zanjas tienen concentraciones mayores de  $260 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  que representan el valor máximo permitido por la NOM-147 para suelos de uso industrial.

En el gráfico 2 se observa que para Cd la máxima concentración permitida a nivel industrial es de  $450 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , de acuerdo con esto se tiene que los suelos superficiales que superan la concentración son los de las zanjas 36, 9, 24 y 14, siendo la 24 la que tiene la mayor concentración.

Gráfico 2. Concentraciones superficiales de Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenidas por FPXRF por zanja o punto de muestreo



Del mismo modo se muestra el mapa de las concentraciones de Cd para suelos superficiales.

En la figura 21 se observa la delimitación por medio de una elipse roja de los suelos superficiales más contaminados por Cd, estas zanjas se encuentran en la parte central de la zona de muestreo, siendo las zanjas 14, 24, 36 y 9 las que superan el límite de  $450 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  de Cd permitido para suelos de uso industrial por la NOM-147.



**Figura 21. Mapa de concentraciones de Cd-Superficial obtenidas por FPXRF**

Código de colores de las concentraciones: verde menor al valor límite para suelos de uso residencial/agrícola; amarillo menor al valor límite para suelos de uso industrial; anaranjado sobrepasa el valor permisible para suelos de uso industrial; rojo indica que la concentración es un orden de magnitud mayor que el límite permisible.

En el gráfico 3 se muestra que para Pb, los suelos superficiales que superan el límite de  $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  para suelos de uso industrial de la NOM-147 son los ubicados en las zanjas 3, 4, 9, 12, 14, 15, 21, 24, 25 y 36, siendo el suelo de la zanja 9 el que presenta la concentración en Pb.

Por último, el mapa de la figura 22 muestra el comportamiento de Pb en los suelos superficiales.

En el mapa de la figura 22 a diferencia del mapa de As y Cd, donde veíamos una zona delimitada de concentraciones que sobrepasaban los niveles máximos permitidos por la NOM-147 para suelos de uso industrial, aquí observamos que para Pb no se puede delimitar una zona concreta dentro del área de estudio, al dividir el mapa en cuadrantes se ve que en cada uno de ellos hay suelos superficiales que sobrepasan la concentración de  $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  que delimita la norma como nivel máximo permitido. Las zanjas que superan las concentraciones máximas son: 36, 9, 14, 15, 24 solo que ahora se añaden otras zanjas como la 3, 4, 12, 21, 25.

Para evaluar y calcular el volumen de suelo contaminado se tomaron suelos a diferentes profundidades, delimitando la profundidad por la roca madre y usando el juicio de experto para definir el perfil del suelo.

Gráfico 3. Concentraciones superficiales de Pb (mg·kg<sup>-1</sup>) obtenidas por FPXRF por zanja o punto de muestreo

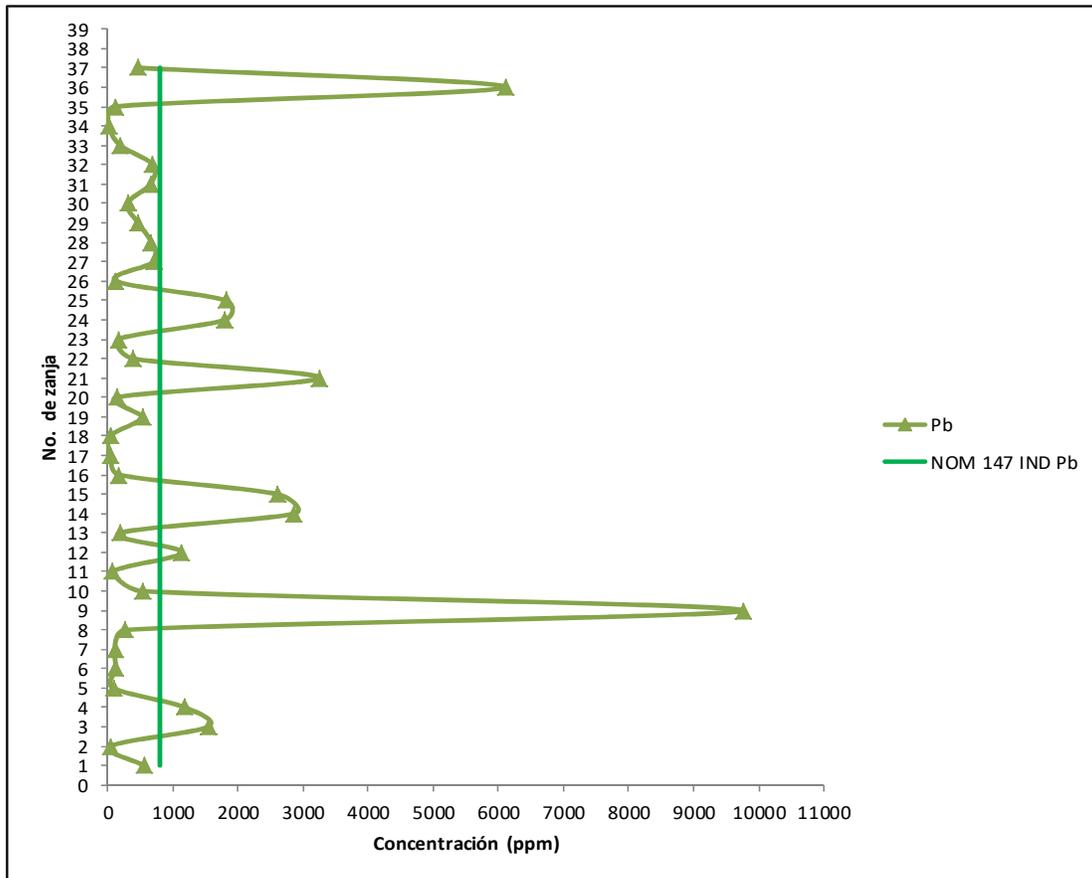


Figura 22. Mapa de concentraciones de Pb superficiales obtenidas por FPXRF  
 Código de colores de las concentraciones: verde menor al valor límite para suelos de uso residencial/agrícola; amarillo menor al valor límite para suelos de uso industrial; anaranjado sobrepasa el valor permisible para suelos de uso industrial; rojo indica que la concentración es un orden de magnitud mayor que el límite permisible.

En la figura 23 se tienen diferentes imágenes en las cuales se puede observar el perfil del suelo.



**Figura 23. Perfiles de suelos tomados de diferentes zanjas**

Los resultados de las concentraciones a nivel subsuperficial de los elementos As, Cd, Cr, Cu, Mn, Sb, Zn, Ni y Fe determinadas por medio de FPXRF para cada zanja se muestran en las tablas 15-51. Para cada zanja se realizó la estadística descriptiva y se comparan los resultados con los valores permitidos en la NOM-147 tanto para uso de suelos del tipo residencial/agrícola como industrial, en color rojo se resaltan los elementos que sobrepasan los valores normados.

**Tabla 15. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 1 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-1(5-25)	45.33	49.00	47.67	92.00	325.00	487.67	151.00	4606.00	22.67	30343.67
NR-S-1(25-50)	19.47	16.50	34.67	39.67	247.67	119.63	ND	1350.67	21.67	36212.33
NR-S-1(50-75)	8.43	ND	34.33	20.67	199.67	40.27	ND	549.67	24.33	33446.67
NR-S-1(75-100)	70.67	50.33	45.00	191.00	295.00	962.00	76.67	7392.33	18.50	33301.00
NR-S-1(100-150)	18.10	16.33	33.53	43.33	317.67	181.67	ND	1862.33	18.67	31690.33
promedio	32.40	33.04	39.04	77.33	277.00	358.25	113.83	3152.20	21.17	32998.80
mínimo	8.43	16.33	33.53	20.67	199.67	40.27	76.67	549.67	18.50	30343.67
máximo	70.67	50.33	47.67	191.00	325.00	962.00	151.00	7392.33	24.33	36212.33
desviación estándar	25.39	19.20	6.74	68.78	52.73	377.66	52.56	2818.45	2.54	2201.17
NOM-147 residencial/agrícola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 16. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 2 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-2 (5-25)	9.27	ND	20.80	18.50	135.67	37.10	ND	1533.67	20.00	11988.00
NR-S-2 (25-50)	11.93	ND	26.33	32.00	200.67	63.63	ND	942.67	18.00	33737.00
NR-S-2 (50-75)	10.20	ND	27.20	27.33	204.33	61.80	ND	988.33	17.50	16346.33
NR-S-2 (75-100)	9.85	ND	25.70	33.00	216.33	68.70	ND	1025.00	11.50	31879.67
NR-S-2 (100-150)	14.43	18.00	19.03	60.00	197.67	105.00	ND	1946.00	16.33	25554.00
promedio	11.14	18.00	23.81	34.17	190.93	67.25	---	1287.13	16.67	23901.00
mínimo	9.27	18.00	19.03	18.50	135.67	37.10	---	942.67	11.50	11988.00
máximo	14.43	18.00	27.20	60.00	216.33	105.00	---	1946.00	20.00	33737.00
desviación estándar	2.09	---	3.65	15.54	31.70	24.39	---	439.19	3.18	9514.87
NOM-147 residencial/agrícola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 17. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 3 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-3 (5-25)	154.33	228.67	95.33	1316.00	697.33	3044.67	204.33	38954.00	ND	35096.33
NR-S-3 (25-50)	95.33	178.00	92.67	1236.00	676.67	2288.33	143.67	38201.00	33.00	34777.00
NR-S-3 (50-70)	110.00	186.00	103.00	1986.33	865.33	2210.00	177.33	44476.00	18.50	34529.67
NR-S-3 (70-100)	157.33	1179.67	42.00	681.33	289.67	2186.00	245.00	23035.33	ND	23114.33
NR-S-3 (100-120)	148.33	410.33	62.00	333.33	469.00	854.33	95.33	17241.33	13.00	32524.67
promedio	133.07	436.53	79.00	1110.60	599.60	2116.67	173.13	32381.53	21.50	32008.40
minimo	95.33	178.00	42.00	333.33	289.67	854.33	95.33	17241.33	13.00	23114.33
maximo	157.33	1179.67	103.00	1986.33	865.33	3044.67	245.00	44476.00	33.00	35096.33
desviación estándar	28.42	425.95	25.92	635.07	223.17	790.20	57.18	11618.05	10.33	5072.68
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

28

**Tabla 18. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 4 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-4 (5-25)	307.33	21.33	39.67	134.00	111.00	4494.67	29.33	1774.67	12.00	34506.33
NR-S-4 (25-50)	343.00	28.00	38.73	40.67	51.00	5601.67	31.00	816.33	ND	27641.00
NR-S-4 (50-75)	48.67	43.00	71.67	445.67	359.67	531.67	29.67	9007.67	16.33	33777.00
NR-S-4 (75-110)	42.67	31.67	54.67	372.67	262.00	463.33	24.50	7057.00	20.67	33384.00
NR-S-4 (110-130)	8.07	ND	46.33	11.33	172.00	52.00	ND	452.67	21.67	34160.67
NR-S-4 (130-150)	5.75	ND	49.67	7.55	83.67	20.40	ND	150.33	24.67	34160.67
promedio	125.91	31.00	50.12	168.65	173.22	1860.62	28.63	3209.78	19.07	32938.28
minimo	5.75	21.33	38.73	7.55	51.00	20.40	24.50	150.33	12.00	27641.00
maximo	343.00	43.00	71.67	445.67	359.67	5601.67	31.00	9007.67	24.67	34506.33
desviación estándar	155.73	9.07	12.15	193.21	117.88	2502.39	2.84	3825.35	4.95	2623.38
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004ND:

No detectado

**Tabla 19. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 5 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-5 (5-25)	23.33	55.33	34.67	185.67	280.33	372.33	22.50	11540.67	14.67	28098.00
NR-S-5 (25-50)	61.67	168.33	58.67	381.00	404.00	660.67	43.67	31459.67	ND	27330.67
NR-S-5 (50-75)	94.67	230.00	78.67	456.67	473.67	932.67	71.00	41120.67	ND	37909.67
NR-S-5 (75-100)	250.67	400.33	62.00	467.33	429.00	1442.67	110.00	31338.33	20.00	28249.33
NR-S-5(100-150)	154.00	299.00	67.67	443.67	393.33	1177.33	95.67	36844.67	ND	30423.67
promedio	116.87	230.60	60.33	386.87	396.07	917.13	68.57	30460.80	17.33	30402.27
minimo	23.33	55.33	34.67	185.67	280.33	372.33	22.50	11540.67	14.67	27330.67
maximo	250.67	400.33	78.67	467.33	473.67	1442.67	110.00	41120.67	20.00	37909.67
desviación estándar	88.84	130.46	16.23	117.36	71.71	420.33	36.05	11337.17	3.77	4351.47
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 20. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 6 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-6(5-25)	307.33	21.33	39.67	134.00	111.00	4494.67	29.33	1774.67	12.00	34506.33
NR-S-6(25-50)	343.00	28.00	38.73	40.67	51.00	5601.67	31.00	816.33	ND	27641.00
promedio	325.17	24.67	39.20	87.33	81.00	5048.17	30.17	1295.50	12.00	31073.67
minimo	307.33	21.33	38.73	40.67	51.00	4494.67	29.33	816.33	12.00	27641.00
maximo	343.00	28.00	39.67	134.00	111.00	5601.67	31.00	1774.67	12.00	34506.33
desviación estándar	25.22	4.71	0.66	66.00	42.43	782.77	1.18	677.64	---	4854.52
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 21. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 7 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-7(15-30)	48.67	43.00	71.67	445.67	359.67	531.67	29.67	9007.67	16.33	33777.00
NR-S-7(30-55)	42.67	31.67	54.67	372.67	262.00	463.33	24.50	7057.00	20.67	33384.00
NR-S-7(55-80)	121.67	159.33	95.50	1980.67	980.00	1559.67	230.00	52274.00	ND	33862.67
NR-S-7(50-100)	8.00	ND	40.70	16.00	210.33	34.57	ND	699.00	19.00	30436.33
NR-S-7(100-150)	7.17	ND	44.03	5.95	214.00	18.90	ND	120.20	21.67	31354.00
promedio	45.63	78.00	61.31	564.19	405.20	521.63	94.72	13831.57	19.42	32562.80
minimo	7.17	31.67	40.70	5.95	210.33	18.90	24.50	120.20	16.33	30436.33
maximo	121.67	159.33	95.50	1980.67	980.00	1559.67	230.00	52274.00	21.67	33862.67
desviación estándar	46.62	70.66	22.60	816.90	326.92	626.70	117.18	21837.19	2.33	1566.95
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 22. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 8 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-8(5-25)	35.67	34.33	35.00	456.67	397.67	350.67	22.67	8455.00	19.00	30295.00
NR-S-8(25-40)	29.73	34.00	30.67	347.67	345.33	291.67	25.00	6586.67	11.00	31526.67
NR-S-8(40-70)	9.47	ND	23.03	23.00	228.67	39.80	ND	1131.67	21.50	20467.33
NR-S-8(70-100)	16.13	ND	31.90	46.67	206.33	210.67	ND	1751.00	22.00	15473.00
NR-S-8(100-130)	32.00	21.00	39.33	52.00	210.33	403.33	ND	2703.67	33.00	13014.67
NR-S-8(130-150)	330.67	325.00	68.00	902.33	140.67	8312.00	90.33	11801.33	12.33	28224.67
promedio	75.61	103.58	37.99	304.72	254.83	1601.36	46.00	5404.89	19.81	23166.89
minimo	9.47	21.00	23.03	23.00	140.67	39.80	22.67	1131.67	11.00	13014.67
maximo	330.67	325.00	68.00	902.33	397.67	8312.00	90.33	11801.33	33.00	31526.67
desviación estándar	125.35	147.74	15.66	344.06	96.58	3289.98	38.41	4254.93	7.95	7947.68
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 23. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 9 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-9(5-35)	133.67	1845.33	41.33	823.00	547.33	3030.67	416.00	38934.33	ND	19178.33
NR-S-9(35-45)	1018.67	1833.00	52.00	1020.33	600.67	16222.00	463.00	44843.00	ND	19980.00
NR-S-9(45-75)	573.00	169.33	96.33	2485.67	692.00	6534.67	105.00	54145.33	ND	43159.00
NR-S-9(75-100)	674.33	172.00	72.33	1084.00	255.33	15263.33	102.67	12704.00	ND	43291.67
NR-S-9(100-150)	526.33	110.00	83.00	322.00	99.67	3978.33	95.67	5370.67	23.33	33816.00
promedio	585.20	825.93	69.00	1147.00	439.00	9005.80	236.47	31199.47	23.33	31885.00
minimo	133.67	110.00	41.33	322.00	99.67	3030.67	95.67	5370.67	23.33	19178.33
maximo	1018.67	1845.33	96.33	2485.67	692.00	16222.00	463.00	54145.33	23.33	43291.67
desviación estándar	317.54	925.29	22.41	805.86	250.38	6291.15	186.12	21105.07	---	11875.73
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 24. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 10 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-10 (5-40)	52.33	40.33	41.33	692.33	489.33	442.33	41.67	14752.33	17.33	32467.33
NR-S-10 (40-70)	247.33	316.67	159.33	1637.33	794.00	2905.33	296.33	35438.00	24.33	37206.33
NR-S-10 (70-100)	242.67	737.00	77.00	1467.00	887.00	13362.33	924.00	37760.33	ND	47725.33
NR-S-10(100-125)	44.43	63.33	30.33	18.67	341.33	85.23	ND	802.33	22.00	21021.00
NR-S-10(125-150)	85.13	ND	43.33	18.00	362.67	40.23	ND	403.00	24.00	39909.00
promedio	134.38	289.33	70.27	766.67	574.87	3367.09	420.67	17831.20	21.92	35665.80
minimo	44.43	40.33	30.33	18.00	341.33	40.23	41.67	403.00	17.33	21021.00
maximo	247.33	737.00	159.33	1637.33	887.00	13362.33	924.00	37760.33	24.33	47725.33
desviación estándar	102.14	323.64	52.76	770.40	251.16	5712.07	454.12	18099.54	3.22	9880.67
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 25. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 11 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-11(5-25)	30.87	27.67	40.00	82.00	34.67	243.33	ND	4473.33	ND	42042.33
NR-S-11(25-50)	31.87	ND	25.67	ND	ND	52.87	ND	213.67	ND	60089.67
NR-S-11(50-70)	35.67	ND	20.00	ND	ND	76.67	ND	216.67	ND	60525.33
NR-S-11(70-80)	22.33	33.67	91.00	112.67	34.33	519.33	ND	6763.67	27.00	56578.33
NR-S-11(80-100)	8.93	37.67	27.37	27.33	337.00	49.33	ND	5177.00	23.00	12748.33
promedio	25.93	33.00	40.81	74.00	135.33	188.31	---	3368.87	25.00	46396.80
minimo	8.93	27.67	20.00	27.33	34.33	49.33	---	213.67	23.00	12748.33
maximo	35.67	37.67	91.00	112.67	337.00	519.33	---	6763.67	27.00	60525.33
desviación estándar	10.68	5.03	28.99	43.23	174.65	201.70	---	2996.06	2.83	20260.52
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

66

**Tabla 26. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 12 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-12(5-25)	28.00	199.33	190.67	473.67	333.67	1135.33	44.33	94279.00	185.67	21065.00
NR-S-12(25-50)	15.50	48.67	174.33	220.67	186.00	800.67	ND	96300.00	ND	21018.67
NR-S-12(50-75)	31.00	28.33	28.33	11.67	ND	453.67	ND	3710.00	ND	56400.33
NR-S-12(75-100)	21.37	17.67	26.33	ND	ND	83.30	ND	767.00	ND	59017.33
NR-S-12(100-150)	22.10	18.50	31.33	ND	ND	88.90	ND	4689.33	ND	57555.00
promedio	23.59	62.50	90.20	235.33	259.83	512.37	44.33	39949.07	185.67	43011.27
minimo	15.50	17.67	26.33	11.67	186.00	83.30	44.33	767.00	185.67	21018.67
maximo	31.00	199.33	190.67	473.67	333.67	1135.33	44.33	96300.00	185.67	59017.33
desviación estándar	6.06	77.51	84.47	231.35	104.42	457.73	---	50544.34	---	20076.69
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 27. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 13 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-13(5-25)	43.13	106.67	44.13	176.33	167.00	320.33	24.00	11385.67	ND	28533.00
NR-S-13(25-50)	44.50	100.33	38.97	149.67	97.00	280.67	29.00	8139.33	ND	31526.67
NR-S-13(50-75)	111.33	207.67	41.67	328.33	418.67	891.67	67.33	21027.67	ND	32453.00
NR-S-13(75-100)	29.63	ND	40.40	11.00	441.00	57.77	ND	416.67	22.33	33563.67
NR-S-13(100-150)	40.97	44.33	45.20	56.33	363.33	169.33	ND	3134.67	15.67	33423.67
promedio	53.91	114.75	42.07	144.33	297.40	343.95	40.11	8820.80	19.00	31900.00
minimo	29.63	44.33	38.97	11.00	97.00	57.77	24.00	416.67	15.67	28533.00
maximo	111.33	207.67	45.20	328.33	441.00	891.67	67.33	21027.67	22.33	33563.67
desviación estándar	32.63	67.98	2.58	122.91	155.59	322.86	23.71	8046.93	4.71	2053.73
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

67

**Tabla 28. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 14 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-14(5-25)	475.00	1469.33	218.33	12182.67	4093.67	3623.00	435.67	183333.33	ND	47335.67
NR-S-14(25-50)	199.00	444.33	95.00	2435.33	967.33	1369.67	152.00	63430.67	ND	36762.00
NR-S-14(50-75)	49.00	126.33	48.33	443.00	464.67	368.00	43.67	17750.33	15.67	34931.67
NR-S-14(75-110)	34.67	92.00	42.67	345.33	402.00	296.33	27.67	12788.00	26.00	31576.00
NR-S-14(110-130)	5.13	ND	45.67	ND	254.33	13.33	ND	182.33	37.00	75887.33
promedio	152.56	533.00	90.00	3851.58	1236.40	1134.07	164.75	55496.93	26.22	45298.53
minimo	5.13	92.00	42.67	345.33	254.33	13.33	27.67	182.33	15.67	31576.00
maximo	475.00	1469.33	218.33	12182.67	4093.67	3623.00	435.67	183333.33	37.00	75887.33
desviación estándar	195.24	644.06	74.89	5636.93	1619.62	1482.82	188.87	75355.25	10.67	18086.44
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 29. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 15 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-15(5-25)	143.67	147.67	108.33	7725.33	2501.33	2017.67	183.67	64800.00	42.33	42366.67
NR-S-15(25-50)	212.00	200.67	132.67	8546.00	2976.33	3759.67	191.67	89266.67	ND	42731.67
NR-S-15(50-75)	364.33	227.67	169.67	8442.67	4586.33	3360.67	283.00	139166.67	58.67	55833.33
NR-S-15 (75-100)	63.00	71.67	68.67	2524.00	790.67	1069.00	69.67	23242.00	23.33	44429.67
promedio	195.75	161.92	119.83	6809.50	2713.67	2551.75	182.00	79118.83	41.44	46340.33
minimo	63.00	71.67	68.67	2524.00	790.67	1069.00	69.67	23242.00	23.33	42366.67
maximo	364.33	227.67	169.67	8546.00	4586.33	3759.67	283.00	139166.67	58.67	55833.33
desviación estándar	127.83	68.73	42.42	2880.22	1561.93	1237.90	87.40	48428.54	17.68	6392.19
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 30. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 16 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-16 (5-25)	32.73	62.67	37.33	149.67	269.67	243.00	ND	7640.33	21.67	28523.33
NR-S-16 (25-50)	13.70	20.00	26.43	53.00	241.00	109.77	ND	3274.00	17.00	24301.33
NR-S-16 (50-75)	7.93	ND	21.23	9.00	263.00	20.40	ND	336.67	24.00	20356.33
NR-S-16 (75-100)	5.90	ND	20.63	ND	246.33	9.33	ND	90.17	19.33	10929.33
NR-S-16 (100-125)	5.97	ND	22.43	ND	281.67	11.87	ND	91.47	17.67	20530.00
NR-S-16 (125-150)	6.40	ND	23.43	ND	257.00	9.03	ND	64.00	20.50	11779.00
promedio	12.11	41.33	25.25	70.56	259.78	67.23	---	1916.11	20.03	19403.22
minimo	5.90	20.00	20.63	9.00	241.00	9.03	---	64.00	17.00	10929.33
maximo	32.73	62.67	37.33	149.67	281.67	243.00	---	7640.33	24.00	28523.33
desviación estándar	10.53	30.17	6.26	71.96	15.02	94.55	---	3072.42	2.60	6917.83
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 31. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 17 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-17 (5-25)	5.50	11.35	37.03	21.33	119.37	42.77	ND	1149.00	ND	12250.00
NR-S-17 (25-50)	11.63	20.00	41.33	77.33	158.67	208.10	ND	4129.00	8.33	26793.33
NR-S-17 (50-60)	31.33	19.00	69.33	169.67	112.33	302.67	ND	18881.33	21.50	30881.67
NR-S-17 (60-100)	7.00	65.33	52.00	16.00	133.00	15.60	ND	2208.33	23.33	35389.67
NR-S-17 (100-150)	21.27	ND	27.67	ND	ND	64.73	ND	941.00	ND	60244.33
promedio	15.35	28.92	45.47	71.08	130.84	126.77	---	5461.73	17.72	33111.80
minimo	5.50	11.35	27.67	16.00	112.33	15.60	---	941.00	8.33	12250.00
maximo	31.33	65.33	69.33	169.67	158.67	302.67	---	18881.33	23.33	60244.33
desviación estándar	10.85	24.58	15.95	71.34	20.44	123.31	---	7607.29	8.18	17474.80
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

69

**Tabla 32. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 18 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-18(15-25)	16.43	ND	41.67	52.33	17.33	56.57	ND	378.33	11.33	42962.33
NR-S-18 (25-50)	16.67	ND	26.67	11.85	29.33	102.50	ND	526.67	ND	43931.33
NR-S-18 (50-75)	25.20	ND	23.33	10.87	ND	67.30	ND	285.67	ND	45166.67
NR-S-18 (75-100)	31.90	ND	23.67	ND	ND	36.33	ND	101.60	ND	52364.33
NR-S-18 (100-150)	37.47	ND	15.67	5.90	ND	53.33	ND	215.67	ND	53081.00
promedio	25.53	---	26.20	20.24	23.33	63.21	---	301.59	11.33	47501.13
minimo	16.43	---	15.67	5.90	17.33	36.33	---	101.60	11.33	42962.33
maximo	37.47	---	41.67	52.33	29.33	102.50	---	526.67	11.33	53081.00
desviación estándar	9.28	---	9.55	21.56	8.49	24.62	---	161.39	---	4836.83
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 33. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 19 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-19 (10-25)	601.67	680.33	125.67	353.00	275.33	1549.33	144.33	19040.67	33.33	31577.00
NR-S-19 (25-55)	851.33	546.67	82.00	423.00	374.67	2264.67	175.33	16556.33	22.00	31047.00
NR-S-19 (55-80)	805.00	509.33	73.00	1589.67	602.33	3390.33	433.67	38376.67	ND	33931.33
NR-S-19 (80-100)	10163.33	270.33	52.67	114.00	166.33	7292.00	77.33	6235.00	23.67	14253.67
NR-S-19 (100-150)	181.60	19.33	20.90	25.13	ND	57.17	ND	303.33	ND	39355.00
promedio	2520.59	405.20	70.85	500.96	354.67	2910.70	207.67	16102.40	26.33	30032.80
minimo	181.60	19.33	20.90	25.13	166.33	57.17	77.33	303.33	22.00	14253.67
maximo	10163.33	680.33	125.67	1589.67	602.33	7292.00	433.67	38376.67	33.33	39355.00
desviación estándar	4280.61	261.55	38.60	630.36	185.74	2731.26	156.12	14594.16	6.12	9414.03
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

70

**Tabla 34. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 20 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-20 (5-25)	12.13	25.33	19.00	49.33	ND	76.70	ND	1310.67	ND	50433.67
NR-S-20 (25-50)	11.77	131.00	29.37	59.33	249.00	102.60	25.00	7388.33	21.00	12696.33
NR-S-20 (50-75)	307.00	312.67	68.67	4726.00	1056.00	1650.33	214.33	49801.33	ND	34577.00
NR-S-20 (75-100)	38.83	60.67	65.33	408.67	399.33	258.33	29.67	10461.33	33.33	27730.00
NR-S-20 (100-150)	8.97	ND	30.90	40.67	411.00	35.63	ND	635.33	26.00	31291.67
promedio	75.74	132.42	42.65	1056.80	528.83	424.72	89.67	13919.40	26.78	31345.73
minimo	8.97	25.33	19.00	40.67	249.00	35.63	25.00	635.33	21.00	12696.33
maximo	307.00	312.67	68.67	4726.00	1056.00	1650.33	214.33	49801.33	33.33	50433.67
desviación estándar	129.85	127.94	22.72	2057.03	359.10	690.30	107.99	20479.09	6.20	13561.59
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 35. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 21 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-21 (20-50)	182.33	44.33	49.33	2424.00	988.67	1405.33	328.67	19380.67	24.33	45238.00
NR-S-21 (50-75)	69.67	28.33	35.33	424.33	882.33	691.67	46.00	4995.67	18.50	33244.67
NR-S-21 (75-100)	16.93	ND	30.07	111.33	450.33	125.63	ND	1578.00	23.00	30553.00
NR-S-21 (100-150)	17.83	ND	30.20	200.00	415.00	137.53	28.00	1869.33	21.00	30409.67
promedio	71.69	36.33	36.23	789.92	684.08	590.04	134.22	6955.92	21.71	34861.33
minimo	16.93	28.33	30.07	111.33	415.00	125.63	28.00	1578.00	18.50	30409.67
maximo	182.33	44.33	49.33	2424.00	988.67	1405.33	328.67	19380.67	24.33	45238.00
desviación estándar	77.77	11.31	9.07	1097.32	293.89	604.28	168.63	8426.39	2.54	7039.60
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 36. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 22 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-22 (5-30)	24.43	35.67	41.67	53.67	75.00	231.33	ND	12308.67	14.00	39848.00
NR-S-22 (30-50)	24.30	ND	18.43	10.67	ND	30.70	ND	83.10	ND	45411.00
NR-S-22 (50-90)	28.53	ND	28.33	16.60	ND	33.53	ND	152.33	ND	56740.00
NR-S-22 (90-110)	41.03	ND	25.33	13.97	ND	32.00	ND	173.67	ND	61597.00
NR-S-22 (110-150)	33.93	ND	27.67	10.60	ND	41.57	ND	208.00	ND	59169.00
promedio	30.45	35.67	28.29	21.10	75.00	73.83	--	2585.15	14.00	52553.00
minimo	24.30	35.67	18.43	10.60	75.00	30.70	--	83.10	14.00	39848.00
maximo	41.03	35.67	41.67	53.67	75.00	231.33	--	12308.67	14.00	61597.00
desviación estándar	7.10	--	8.44	18.38	--	88.15	--	5435.80	--	9427.64
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 37. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 23 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-23 (5-25)	31.97	17.00	38.27	449.33	162.67	123.13	20.00	3963.00	ND	35171.67
NR-S-23 (25-50)	26.77	ND	25.33	30.67	ND	51.70	ND	169.00	ND	67133.33
NR-S-23 (50-75)	18.17	ND	35.00	33.67	ND	46.03	ND	415.67	ND	63561.33
NR-S-23 (75-100)	19.00	59.67	47.33	209.33	186.00	343.00	22.00	21047.67	15.50	31217.67
NR-S-23 (100-150)	561.67	424.33	73.33	869.00	630.33	8181.33	156.00	3.77	ND	27587.67
promedio	131.51	167.00	43.85	318.40	326.33	1749.04	66.00	5119.82	15.50	44934.33
minimo	18.17	17.00	25.33	30.67	162.67	46.03	20.00	3.77	15.50	27587.67
maximo	561.67	424.33	73.33	869.00	630.33	8181.33	156.00	21047.67	15.50	67133.33
desviación estándar	240.53	223.88	18.26	352.16	263.53	3597.78	77.95	9053.29	—	18868.78
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

72

**Tabla 38. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 24 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-24 (5-25)	40.67	486.67	25.20	284.00	268.33	448.67	96.33	7887.00	15.67	14907.33
NR-S-24 (25-50)	32.67	258.67	21.77	326.67	332.33	335.33	64.00	7135.33	16.00	14394.33
NR-S-24 (50-75)	12.47	63.00	16.50	65.00	221.67	64.50	ND	974.33	16.00	10796.33
NR-S-24 (75-100)	6.23	ND	15.13	ND	231.00	13.63	ND	132.67	13.00	10666.67
NR-S-24 (100-150)	13.80	ND	32.87	ND	157.67	11.90	ND	87.50	16.00	26034.33
promedio	21.17	269.44	22.29	225.22	242.20	174.81	80.17	3243.37	15.33	15359.80
minimo	6.23	63.00	15.13	65.00	157.67	11.90	64.00	87.50	13.00	10666.67
maximo	40.67	486.67	32.87	326.67	332.33	448.67	96.33	7887.00	16.00	26034.33
desviación estándar	14.71	212.04	7.17	140.39	64.23	203.38	22.86	3920.94	1.31	6283.57
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 39. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 25 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-25 (25-50)	303.00	202.00	89.00	3225.00	1231.00	2420.00	147.00	56289.00	ND	36034.00
NR-S-25 (50-75)	285.00	111.00	67.33	1498.67	625.67	2307.33	104.33	35613.00	23.00	37524.33
NR-S-25 (75-100)	329.33	121.00	60.67	1580.00	634.67	3050.67	95.00	34161.00	18.50	33084.00
NR-S-25 (100-125)	350.00	112.33	71.00	1438.67	544.00	3163.00	107.33	39527.00	ND	34950.00
NR-S-25 (125-150)	333.67	85.33	59.33	955.00	384.33	2644.00	71.33	27299.33	20.00	31845.00
NR-S-25 (150-175)	23.50	34.00	30.90	155.67	159.00	325.00	ND	4406.67	12.50	24436.67
promedio	270.75	110.94	63.04	1475.50	596.44	2318.33	105.00	32882.67	18.50	32979.00
minimo	23.50	34.00	30.90	155.67	159.00	325.00	71.33	4406.67	12.50	24436.67
maximo	350.00	202.00	89.00	3225.00	1231.00	3163.00	147.00	56289.00	23.00	37524.33
desviación estándar	123.33	54.72	19.02	1008.61	358.91	1033.41	27.40	16989.11	4.42	4650.73
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

73

**Tabla 40. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 26 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-26 (5-25)	27.00	115.00	64.33	127.33	163.00	365.33	29.33	27910.33	ND	28374.00
NR-S-26 (25-40)	17.33	88.67	34.33	176.33	181.00	297.67	27.33	17898.00	ND	60089.67
NR-S-26 (40-65)	16.57	ND	29.53	ND	ND	44.53	ND	560.00	ND	41748.33
NR-S-26 (65-100)	40.33	98.67	60.00	1067.67	345.33	675.33	38.33	25574.67	15.50	40810.33
NR-S-26 (100-125)	45.67	50.67	43.00	943.00	232.33	568.67	35.00	1.63	ND	53357.33
NR-S-26 (125-150)	30.67	48.00	52.67	386.67	307.00	442.33	23.00	13227.67	10.00	41565.33
promedio	29.59	80.20	47.31	540.20	245.73	398.98	30.60	14195.38	12.75	44324.17
minimo	16.57	48.00	29.53	127.33	163.00	44.53	23.00	1.63	10.00	28374.00
maximo	45.67	115.00	64.33	1067.67	345.33	675.33	38.33	27910.33	15.50	60089.67
desviación estándar	11.85	29.72	14.02	437.86	78.88	220.94	6.11	11996.83	3.89	11055.77
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 41. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 27 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-27 (5-25)	7.37	18.67	7.20	12.67	139.33	20.90	ND	273.67	17.50	6858.33
NR-S-27 (25-50)	6.23	14.50	6.30	7.00	134.33	8.50	ND	270.00	19.67	6501.67
NR-S-27 (50-75)	4.55	ND	7.65	6.45	143.33	10.37	ND	105.33	16.00	6256.67
NR-S-27 (75-100)	5.83	32.33	9.75	ND	112.00	13.47	ND	198.33	13.33	5293.00
NR-S-27 (100-150)	5.23	15.50	8.90	ND	117.33	14.23	ND	222.67	12.50	6683.00
promedio	5.84	20.25	7.96	8.71	129.27	13.49	---	214.00	15.80	6318.53
minimo	4.55	14.50	6.30	6.45	112.00	8.50	---	105.33	12.50	5293.00
maximo	7.37	32.33	9.75	12.67	143.33	20.90	---	273.67	19.67	6858.33
desviación estándar	1.06	8.25	1.37	3.44	13.83	4.75	---	68.60	2.95	615.08
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 42. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 28 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-28 (10-25)	42.67	136.00	59.33	216.33	185.33	512.67	38.00	19412.00	16.50	30440.00
NR-S-28 (25-50)	80.33	227.00	94.00	836.67	420.33	1590.00	92.33	51523.67	ND	28993.33
NR-S-28 (50-75)	26.67	67.67	45.33	265.00	379.00	735.00	46.00	11568.00	13.00	24630.33
NR-S-28 (75-100)	13.57	37.67	68.33	118.33	127.00	199.67	50.67	7279.00	19.50	27952.00
NR-S-28 (100-150)	124.00	153.00	79.67	946.00	398.33	1593.00	57.00	37956.00	ND	43182.67
promedio	57.45	124.27	69.33	476.47	302.00	926.07	56.80	25547.73	16.33	31039.67
minimo	13.57	37.67	45.33	118.33	127.00	199.67	38.00	7279.00	13.00	24630.33
maximo	124.00	227.00	94.00	946.00	420.33	1593.00	92.33	51523.67	19.50	43182.67
desviación estándar	44.85	74.53	18.66	384.33	135.51	636.53	21.04	18678.47	3.25	7117.11
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 43. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 29 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-29 (5-50)	34.33	82.67	47.00	342.00	346.00	366.67	32.00	12046.00	13.00	26303.67
NR-S-29 (50-90)	71.67	132.67	93.00	1756.33	663.00	1329.00	86.33	52847.67	ND	32212.00
NR-S-29 (90-140)	38.67	138.00	56.67	264.33	199.67	570.33	37.50	19667.67	12.50	32070.00
NR-S-29 (140-175)	211.00	109.67	110.67	12903.00	4286.67	1521.33	343.33	93533.33	116.67	74300.00
promedio	88.92	115.75	76.83	3816.42	1373.83	946.83	124.79	44523.67	47.39	41221.42
minimo	34.33	82.67	47.00	264.33	199.67	366.67	32.00	12046.00	12.50	26303.67
maximo	211.00	138.00	110.67	12903.00	4286.67	1521.33	343.33	93533.33	116.67	74300.00
desviación estándar	83.08	25.25	30.02	6096.41	1951.49	564.05	147.73	37165.65	60.00	22223.49
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 44. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 30 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-30 (5-20)	12.00	96.33	135.67	193.33	213.00	302.33	23.33	53170.33	22.00	22791.67
NR-S-30 (20-40)	14.00	124.67	183.67	343.33	254.33	359.00	29.00	74316.00	21.33	15308.67
NR-S-30 (40-70)	90.33	494.67	133.33	2407.00	873.67	1449.33	161.33	106300.00	ND	28843.67
NR-S-30 (70-100)	10.97	30.33	35.97	38.67	359.33	63.67	ND	4901.67	15.50	27752.00
NR-S-30 (100-150)	7.87	14.67	26.03	14.67	355.00	36.87	ND	1688.67	20.00	26382.00
promedio	27.03	152.13	102.93	599.40	411.07	442.24	71.22	48075.33	19.71	24215.60
minimo	7.87	14.67	26.03	14.67	213.00	36.87	23.33	1688.67	15.50	15308.67
maximo	90.33	494.67	183.67	2407.00	873.67	1449.33	161.33	106300.00	22.00	28843.67
desviación estándar	35.46	196.81	68.76	1019.09	266.28	580.60	78.09	45056.44	2.93	5476.76
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 45. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 31 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-31 (5-30)	46.67	81.00	102.33	285.33	314.00	703.00	27.00	52968.00	ND	34901.33
NR-S-31 (30-50)	16.00	189.33	64.33	215.67	318.00	418.33	46.00	36087.33	ND	28241.67
NR-S-31 (50-75)	6.13	ND	6.63	ND	168.00	11.07	ND	394.33	22.33	8072.67
NR-S-31 (75-100)	6.53	ND	13.37	10.33	176.00	10.03	ND	242.00	18.00	8693.33
NR-S-31 (100-150)	3.90	ND	7.60	ND	121.67	8.97	ND	153.33	16.67	5946.67
promedio	15.85	135.17	38.85	170.44	219.53	230.28	36.50	17969.00	19.00	17171.13
minimo	3.90	81.00	6.63	10.33	121.67	8.97	27.00	153.33	16.67	5946.67
maximo	46.67	189.33	102.33	285.33	318.00	703.00	46.00	52968.00	22.33	34901.33
desviación estándar	17.84	76.60	42.85	142.97	90.48	317.95	13.44	24968.57	2.96	13393.66
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 46. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 32 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-32 (25-50)	9.90	11.00	16.27	61.00	217.00	51.50	ND	1645.33	20.67	11079.67
NR-S-32 (50-75)	6.77	ND	7.90	ND	161.00	8.90	ND	77.90	17.33	9538.33
NR-S-32 (75-100)	6.93	ND	7.75	ND	115.33	7.47	ND	29.50	20.67	10140.67
NR-S-32 (100-125)	5.63	ND	17.03	ND	103.33	9.90	ND	132.67	16.33	26151.33
NR-S-32 (125-150)	3.00	ND	23.33	ND	81.33	9.90	ND	83.13	17.00	12277.00
promedio	6.45	11.00	14.46	61.00	135.60	17.53	---	393.71	18.40	13837.40
minimo	3.00	11.00	7.75	61.00	81.33	7.47	---	29.50	16.33	9538.33
maximo	9.90	11.00	23.33	61.00	217.00	51.50	---	1645.33	20.67	26151.33
desviación estándar	2.49	---	6.65	---	54.01	19.01	---	700.63	2.10	6960.98
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 47. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 33 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-33 (25-60)	19.83	21.33	46.33	39.33	38.67	111.47	ND	8169.33	ND	38736.00
NR-S-33 (60-90)	13.53	18.00	36.33	16.67	217.67	53.50	ND	2050.33	21.67	34399.00
NR-S-33 (90-120)	18.93	ND	39.33	41.00	17.33	117.03	ND	1061.67	ND	43929.00
NR-S-33 (120-140)	27.50	9.50	48.00	76.33	53.00	169.17	29.33	1880.67	ND	46390.00
NR-S-33 (>140)	38.30	29.00	62.67	276.33	175.33	395.33	64.33	6294.00	17.00	29862.67
promedio	23.62	19.46	46.53	89.93	100.40	169.30	46.83	3891.20	19.33	38663.33
minimo	13.53	9.50	36.33	16.67	17.33	53.50	29.33	1061.67	17.00	29862.67
maximo	38.30	29.00	62.67	276.33	217.67	395.33	64.33	8169.33	21.67	46390.00
desviación estándar	9.60	8.08	10.23	106.36	89.89	132.83	24.75	3142.97	3.30	6765.17
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 48. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 34 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Límite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-34 (10-25)	6.47	ND	17.50	11.40	187.67	8.20	ND	69.80	19.33	24435.33
NR-S-34 (25-50)	6.77	ND	22.90	ND	163.67	9.93	ND	74.27	15.50	25222.00
NR-S-34 (50-75)	3.75	ND	34.43	ND	98.67	11.47	ND	34.20	15.67	19592.33
NR-S-34 (75-100)	7.27	ND	42.33	ND	196.00	10.43	ND	41.00	18.67	27121.33
NR-S-34 (100-150)	8.93	ND	47.33	ND	173.00	12.30	ND	64.20	22.67	44889.67
promedio	6.64	---	32.90	11.40	163.80	10.47	---	56.69	18.37	28252.13
minimo	3.75	---	17.50	11.40	98.67	8.20	---	34.20	15.50	19592.33
maximo	8.93	---	47.33	11.40	196.00	12.30	---	74.27	22.67	44889.67
desviación estándar	1.87	---	12.62	---	38.51	1.56	---	17.95	2.96	9706.03
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 49. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 35 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-35 (30-50)	20.67	ND	39.33	22.67	78.33	54.53	ND	1191.67	13.00	51552.67
NR-S-35 (50-75)	17.63	12.00	41.33	24.67	145.00	47.90	ND	1963.33	13.00	41353.67
NR-S-35 (75-100)	14.80	17.00	36.00	86.33	55.00	59.07	ND	925.33	10.33	41903.00
NR-S-35 (100-115)	18.30	15.00	38.00	37.33	59.67	41.20	ND	808.00	15.00	46050.00
NR-S-35 (115-150)	18.03	ND	38.67	35.67	82.67	36.60	ND	823.00	12.33	44041.67
promedio	17.89	14.67	38.67	41.33	84.13	47.86	---	1142.27	12.73	44980.20
minimo	14.80	12.00	36.00	22.67	55.00	36.60	---	808.00	10.33	41353.67
maximo	20.67	17.00	41.33	86.33	145.00	59.07	---	1963.33	15.00	51552.67
desviación estándar	2.09	2.52	1.94	25.98	36.01	9.24	---	484.08	1.67	4118.36
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 50. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 36 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-36 (5-30)	828.67	758.00	194.67	8300.33	1453.67	4433.00	269.00	179400.00	ND	51133.33
NR-S-36 (30-55)	20.93	117.33	26.90	26.50	44.20	131.97	18.00	2880.33	ND	26440.67
NR-S-36 (55-85)	22.10	67.67	22.17	9.67	15.43	85.33	14.33	1682.33	ND	23539.00
NR-S-36 (85-120)	18.27	71.67	26.43	ND	21.67	112.17	18.00	1497.67	ND	9742.67
NR-S-36 (120-150)	11.07	61.00	49.67	26.33	23.00	24.07	ND	1658.67	18.67	70133.33
promedio	180.21	215.13	63.97	2090.71	311.59	957.31	79.83	37423.80	18.67	36197.80
minimo	11.07	61.00	22.17	9.67	15.43	24.07	14.33	1497.67	18.67	9742.67
maximo	828.67	758.00	194.67	8300.33	1453.67	4433.00	269.00	179400.00	18.67	70133.33
desviación estándar	362.53	304.28	73.85	4139.76	638.53	1943.40	126.12	79369.04	---	24135.10
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

**Tabla 51. Resultados de concentraciones elementales de suelos subsuperficiales de la zanja 37 obtenidos por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
NR-S-37 (5-35)	19.90	19.50	30.67	161.67	253.33	180.67	ND	4509.67	17.00	33829.67
NR-S-37 (35-60)	444.33	354.00	210.33	9063.67	3112.67	6803.67	1254.33	197400.00	54.00	47500.00
promedio	232.12	186.75	120.50	4612.67	1683.00	3492.17	1254.33	100954.83	35.50	40664.83
minimo	19.90	19.50	30.67	161.67	253.33	180.67	1254.33	4509.67	17.00	33829.67
maximo	444.33	354.00	210.33	9063.67	3112.67	6803.67	1254.33	197400.00	54.00	47500.00
desviación estándar	300.12	236.53	127.04	6294.66	2021.85	4683.17	---	136394.06	26.16	9666.39
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica ya que es un elemento que no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

79

En las tablas 15 a la 51 se muestran las concentraciones totales en ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de los elementos determinados por FPXRF para las muestras analizadas a nivel subsuperficial. En estas tablas se observa que al igual que en los resultados obtenidos en los suelos a nivel superficial, los elementos As, Cd y Pb, sobrepasan los niveles permitidos por la NOM-147 tanto para suelos de uso residencial/agrícola como industrial. Las concentraciones de estos elementos son alarmantes, ya que como se observa en la tabla 23 (zanja 9), el Pb tiene un valor máximo de  $16222.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  lo cual sobrepasa 20 veces más lo permitido a nivel industrial; el As y el Cd no son la excepción, estos elementos también sobrepasan los valores permitidos para suelos de uso industrial 39 y 4.1 veces más, esto se puede observar en las tablas 33 (zanja 19) y 23 (zanja 9) respectivamente. En el caso de Fe y Zn, se encuentran en altas concentraciones alcanzando una concentración 25% masa/masa para Zn y un 7.5 % masa/masa para Fe a nivel subsuperficial. Las concentraciones máximas se encuentran en las zanjas 36 y 14 tablas 50 y 28 respectivamente.

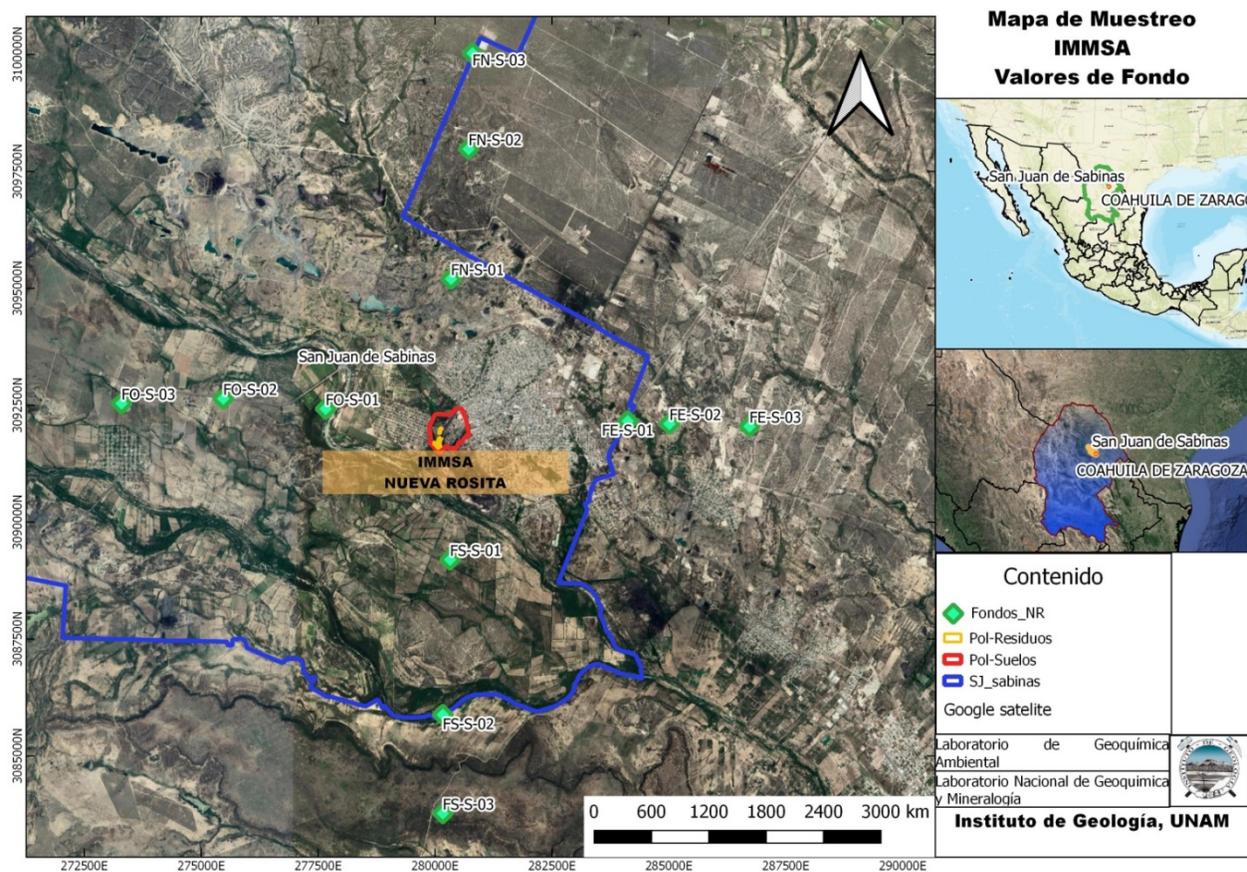


Figura 24. Mapa de distribución de los valores de fondo (Instituto de Geología UNAM, 2018)

Como se mencionó anteriormente para verificar que en la zona de estudio no existe un aporte natural de los elementos potencialmente tóxicos se muestrearon suelos superficiales de fondo y se analizaron también por FPXRF.

En la figura 24 se muestra la distribución de los valores de fondo con respecto a la zona de muestreo para suelos. Los resultados se muestran en la tabla 52.

En la tabla 52 se muestran las concentraciones obtenidas de los suelos de fondo analizados por FPXRF, en esta se puede observar que las concentraciones obtenidas de los elementos normados, no sobrepasan los niveles permitidos por la NOM-147 para uso residencial/agrícola así como industrial, lo cual indica que no existe aportación natural de los elementos potencialmente tóxicos en esta área. Por lo que los valores límite de la NOM-147 se pueden tomar como referencia para definir los límites de remediación.

**Tabla 52. Resultados de las concentraciones elementales de suelos de fondo determinados por FPXRF**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
	ppm									
Limite de detección	1-3	5-9	2-9	2-6	3-7	1-4	10-13	1-3	4-10	5-20
Clave de campo	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
FN-S-01	7.73	ND	29.67	6.40	219.33	18.70	ND	159.33	16.00	27366.00
FN-S-02	8.03	ND	35.97	16.00	430.00	51.00	ND	606.00	21.00	22144.33
FN-S-03	7.83	ND	17.20	7.00	180.33	15.90	ND	217.00	21.00	8588.67
F0-S-01	9.95	ND	25.00	ND	127.67	111.93	ND	505.33	17.00	23930.67
F0-S-02	6.03	ND	25.27	7.50	293.00	31.57	ND	1374.00	11.00	22145.00
F0-S-03	5.70	ND	35.57	ND	389.00	17.97	ND	124.57	17.00	25629.67
FE-S-01	7.27	ND	35.27	9.20	206.33	14.47	ND	71.77	26.67	31097.00
FE-S-02	5.90	ND	21.07	ND	153.00	8.13	ND	40.63	13.00	8605.00
FE-S-03	6.17	ND	15.20	ND	157.67	12.67	ND	84.40	22.00	7344.67
FS-S-01	7.33	ND	25.10	15.00	238.00	27.23	ND	383.33	20.33	11001.67
FS-S-02	5.60	ND	25.13	ND	200.67	12.23	ND	68.43	23.33	9490.33
FS-S-03	7.43	ND	72.00	11.13	704.00	28.10	ND	350.00	50.00	35924.67
promedio	7.08	ND	30.20	10.32	274.92	29.16	ND	332.07	21.53	19438.97
minimo	5.60		15.20	6.40	127.67	8.13		40.63	11.00	7344.67
maximo	9.95		72.00	16.00	704.00	111.93		1374.00	50.00	35924.67
desviación estándar	1.27		14.82	3.88	163.88	28.55		376.99	9.99	9978.19
NOM-147 residencial/agricola	22	37	280	NA	NA	400	NA	NA	1600	NA
NOM-147 industrial	260	450	510			800			20000	

NA: No aplica, ya que el elemento no se encuentra normado en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

ND: No detectado

En la tabla 53 se presenta la estadística descriptiva obtenida de la cuantificación de As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn, Ni y Fe en suelos superficiales y subsuperficiales, en esta tabla se muestran medidas de tendencia central (promedio o media aritmética) y medidas de dispersión (desviación estándar) al igual que el valor mínimo y máximo con el fin de conocer el intervalo de variación, obtenido del análisis completo por FPXRF. También se pueden observar los valores límite establecidos por la NOM 147 para uso de suelos a nivel residencial/agrícola e industrial. De los elementos cuantificados los regulados por la NOM-147 son As, Cd, Cr, Pb y Ni.

Tabla 53. Resumen de parámetros estadísticos para las concentraciones de suelos de fondo y suelos superficiales y sub-superficiales del área de

	Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
		ppm									
<b>Límites NOM 147</b>	<b>residencial/agricola</b>	<b>22</b>	<b>37</b>	<b>280</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>400</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>1600</b>	<b>NA</b>
	<b>industrial</b>	<b>260</b>	<b>450</b>	<b>510</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>800</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>20000</b>	<b>NA</b>
<b>Fondos</b>	<b>media</b>	7.08	ND	30.20	10.32	274.92	29.16	ND	332.07	21.53	19438.97
	<b>minimo</b>	5.60		15.20	6.40	127.67	8.13		40.63	11.00	7344.67
	<b>maximo</b>	9.95		72.00	16.00	704.00	111.93		1374.00	50.00	35924.67
	<b>desviación estándar</b>	1.27		14.82	3.88	163.88	28.55		376.99	9.99	9978.19
<b>Suelos</b>	<b>media</b>	148.37	134.45	55.23	881.82	419.18	1080.40	71.21	21854.02	14.75	32578.38
	<b>minimo</b>	3.00	ND	6.30	ND	ND	7.47	ND	1.63	ND	5293.00
	<b>maximo</b>	10163.33	1845.33	290.00	12903.00	4586.33	16222.00	1254.33	252966.67	185.67	75887.33
	<b>desviación estándar</b>	708.81	272.77	44.07	2206.76	671.05	2291.38	146.88	41733.07	19.61	14499.22

estudio

ND: No detectado

En la tabla 53 se muestra una comparación de las estadísticas obtenidas del análisis de FPXRF de los suelos de fondo y de suelos dentro del predio de estudio a diferentes profundidades, observándose una diferencia notable entre las concentraciones obtenidas en los suelos de fondos, las cuales no sobrepasan los valores permitidos por la NOM-147 para suelos de uso residencial/agrícola y que son un punto de referencia para conocer los valores de fondo de la zona para cada elemento analizado. Los resultados de las concentraciones de los elementos en los suelos dentro del predio indican altas concentraciones en As, Cd y Pb, superando incluso las concentraciones permitidas para suelos de uso industrial por esta misma norma.

Es importante mencionar que los elementos no normados Cu, Mn, Sb, Fe y Zn en los suelos pertenecientes al predio superan los valores de fondo, lo que indica la aportación de las actividades mineras a los suelos dentro del predio.

Para evaluar las correlaciones de los elementos identificados dentro de los suelos del predio en la tabla 54 se muestran los coeficientes de correlación de suelos superficiales y subsuperficiales obtenidos de un análisis de datos mediante el software comercial Excel (Microsoft Office).

**Tabla 54. Coeficientes de correlación entre resultados de las concentraciones elementales de As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn, Ni y Fe de suelos superficiales y subsuperficiales**

Elemento	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Sb	Zn	Ni	Fe
As	1									
Cd	0.2024	1								
Cr	0.1596	0.4557	1							
Cu	0.1395	0.4405	0.6780	1						
Mn	0.1085	0.3875	0.6400	0.9274	1					
Pb	0.3875	0.5739	0.4458	0.4066	0.3778	1				
Sb	0.1667	0.6129	0.5652	0.6246	0.6336	0.6363	1			
Zn	0.1465	0.5443	0.8926	0.7991	0.7153	0.4338	0.6232	1		
Ni	0.0090	-0.0772	0.2655	0.1608	0.2567	-0.0582	0.0766	0.2105	1	
Fe	-0.0084	0.0857	0.2920	0.4043	0.3174	0.1619	0.2470	0.2913	-0.0979	1

En la tabla 54 se muestran los coeficientes de correlación al hacer un análisis de datos de todos los resultados elementales de suelos superficiales y subsuperficiales, para ver si existe alguna relación entre ellos y poder determinar la presencia en conjunto de algunos. Se puede observar que el Cr está correlacionado con el Zn, esto quiere decir que cuando hay presencia de Cr es posible encontrar Zn; algo parecido sucede con Cu y Mn, los cuales están correlacionados.

Al igual que en la tabla 14 (correlaciones en suelos superficiales) en la tabla 55 se evalúa en suelos subsuperficiales, si existe correlación entre las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos As, Cd y Pb.

**Tabla 55. Coeficiente de correlación entre las concentraciones de As, Cd, Pb en suelos subsuperficiales**

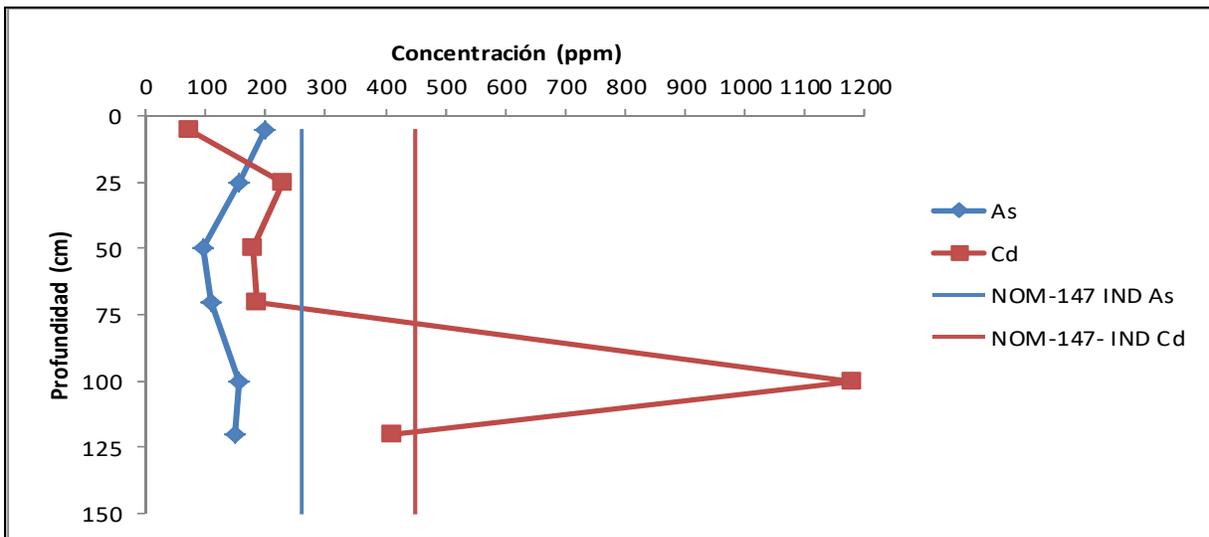
Elemento	As	Cd	Pb
As	1		
Cd	0.1778	1	
Pb	0.3609	0.5697	1

En la tabla 55 se muestran los coeficientes de correlación de As, Cd y Pb en suelos subsuperficiales que como ya ha discutido, se encuentran en concentraciones que sobrepasan

los valores permitidos para suelos de uso industrial por la NOM-147. Los resultados indican que en los suelos subsuperficiales As, Cd y Pb no presentan una correlación.

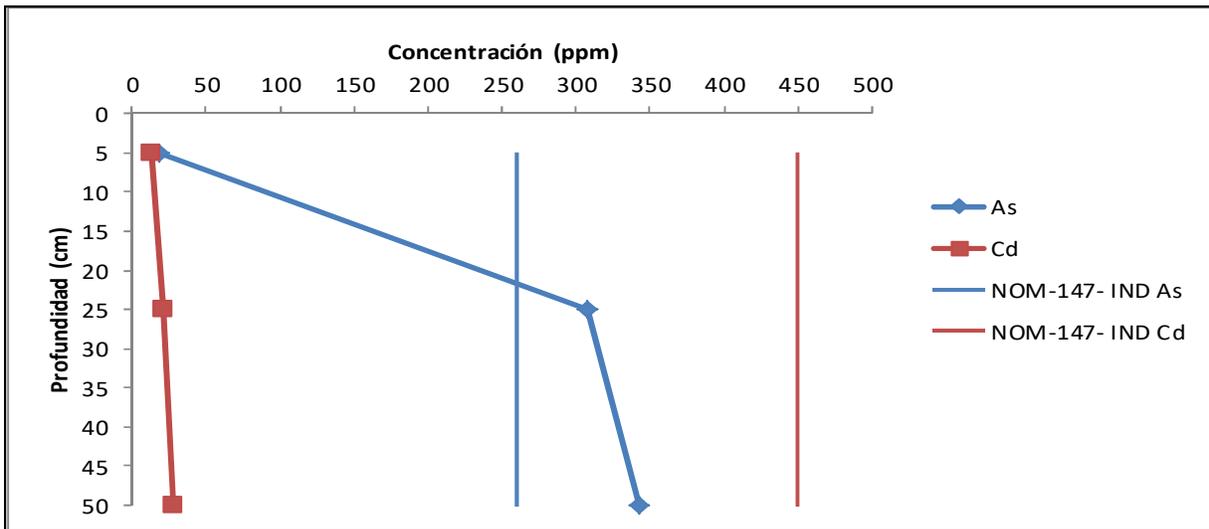
Continuando el análisis de resultados y con el objetivo de delimitar la contaminación dentro del predio se graficaron las concentraciones de As y Cd en función de la profundidad y se compararon con los valores límite de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelos de uso industrial, en los siguientes gráficos se mostraran únicamente los que indican que hubo migración vertical o la posible presencia de residuos enterrados dentro del predio.

**Gráfico 4. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 3**

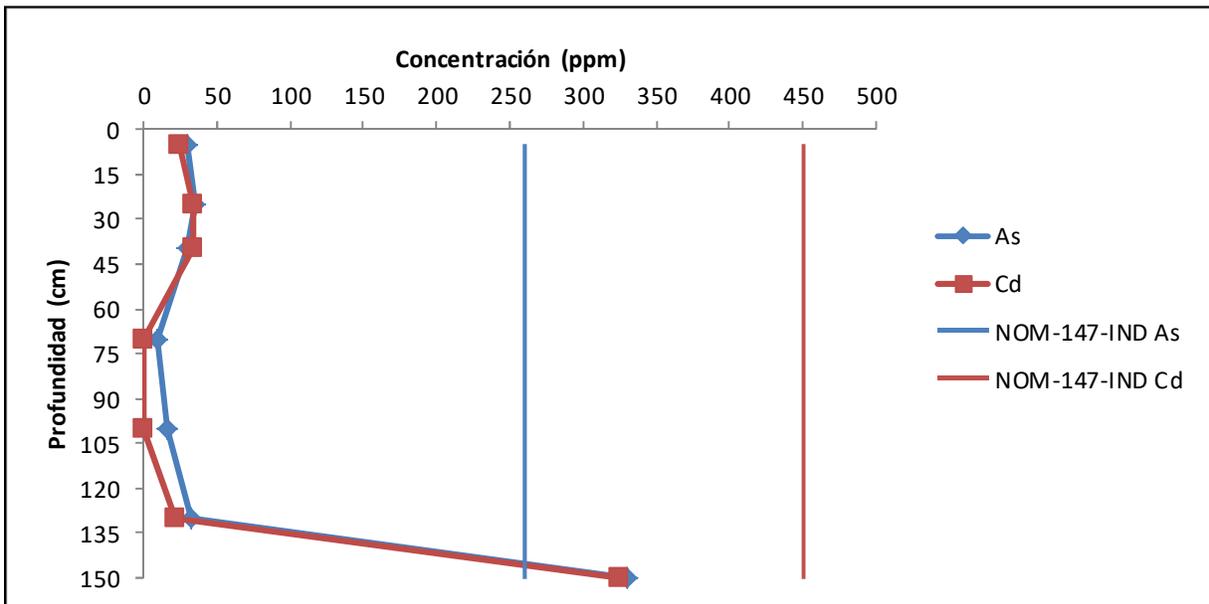


En el gráfico 4 se puede observar que la concentración de cadmio sobrepasa los valores permitidos para suelos de uso industrial según la NOM-147 a una profundidad de 100 cm, lo cual se denota como un comportamiento extraño ya que lo esperado es obtener mayores concentraciones a nivel superficial y que las concentraciones vayan disminuyendo conforme aumenta la profundidad de la excavación (Reinmann et al., 2001) por lo cual, esto puede ser un primer indicio de entierro de residuos.

**Gráfico 5. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 6**

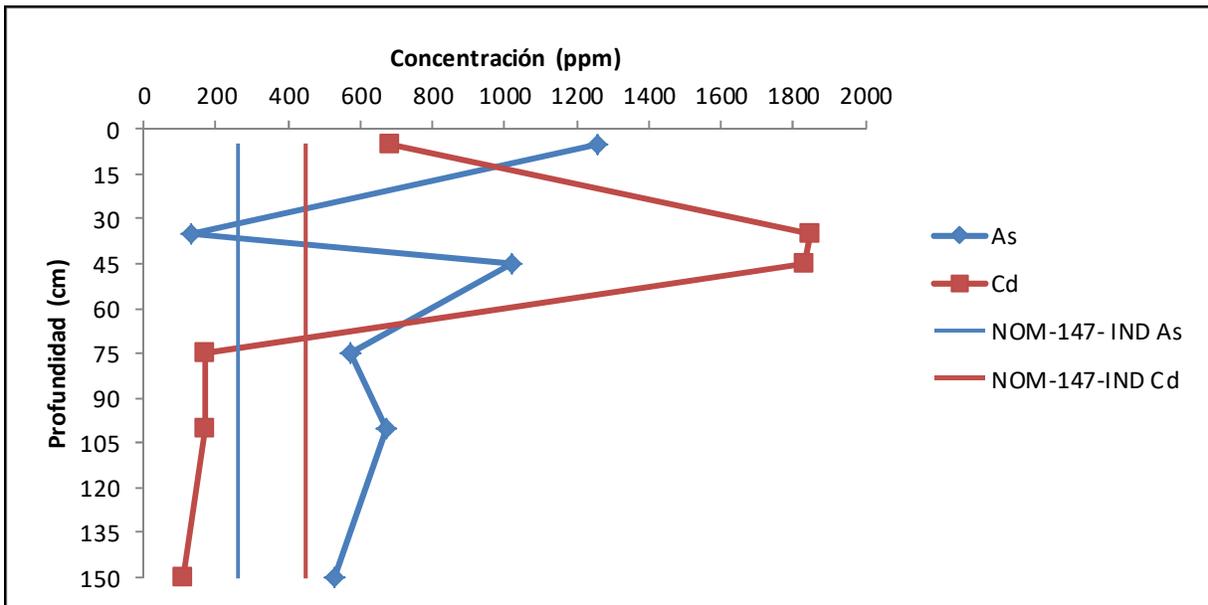


**Gráfico 6. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 8**



En los gráficos 5 y 6 se observa que la concentración de As sobrepasa el valor de referencia para suelos de uso industrial y aumenta conforme aumenta la profundidad de la zanja, lo cual denota un comportamiento inusual, ya que como se había mencionado para el gráfico 4, lo esperado es que al aumentar la profundidad disminuya la concentración de ambos elementos (Reinmann et al., 2001).

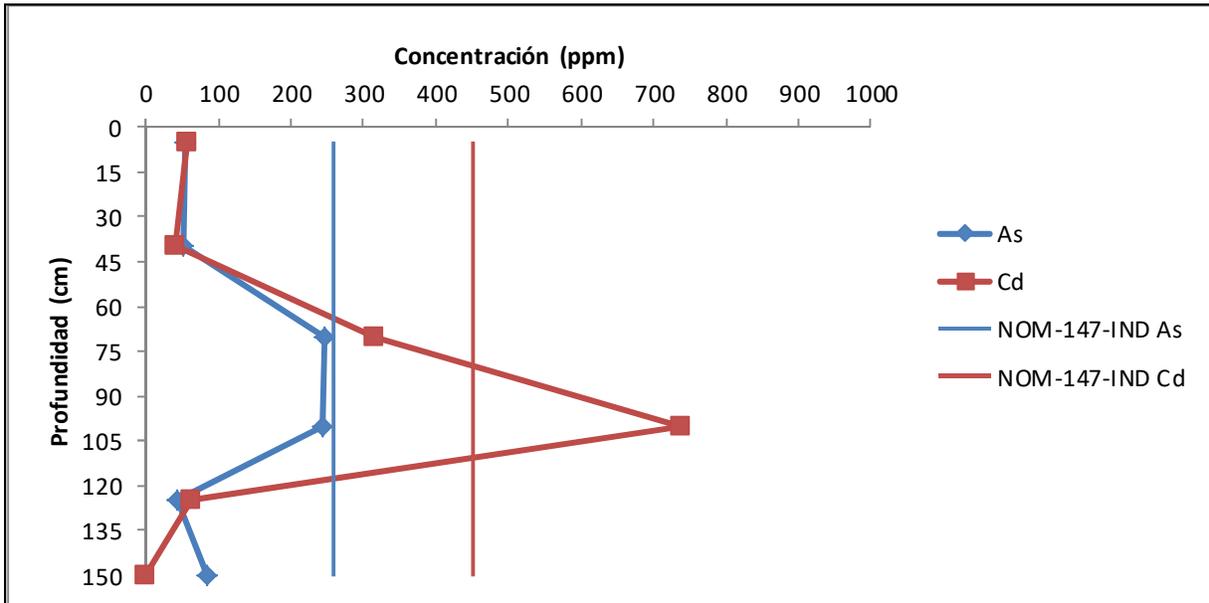
**Gráfico 7. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 9**



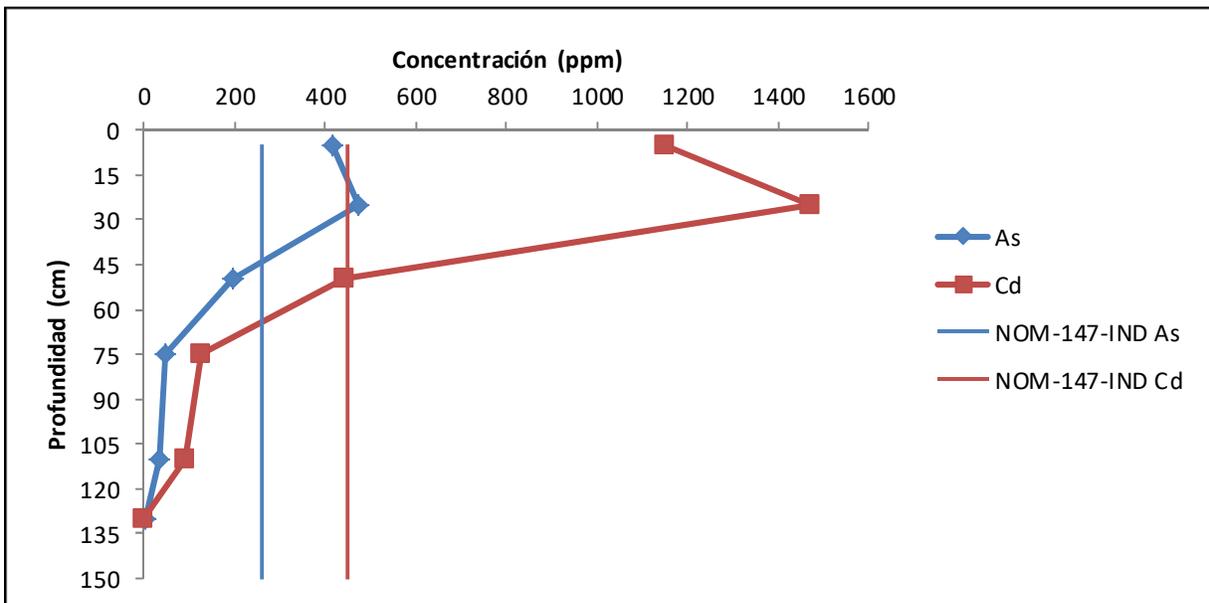
En el gráfico 7 se puede observar que para Cd, las concentraciones son mayores en las zonas menos profundas, aunque los valores obtenidos sobrepasan los límites de la NOM-147 para suelos de uso industrial. Esta zanja es la más contaminada por Cd entre 35-50 cm las concentraciones son mayores a  $1800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , siendo que a nivel superficial la concentración es de  $683 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , lo cual da indicio de migración y permeabilidad del suelo. Para el caso de As, se ve que la mayor concentración es a una profundidad de 0-5 cm, las concentraciones disminuyen conforme aumenta la profundidad, la mayoría de los puntos sobrepasan las concentraciones permitidas, a excepción del punto 2 que tiene una profundidad de 5-35 cm.

En el gráfico 8 donde se muestra el comportamiento de la zanja 10, se puede observar que el comportamiento que tiene el As en la parte superficial no es el esperado "Usualmente los valores en suelos superficiales son mayores que los valores en los subsuelos debido a la influencia superpuesta del desgaste de la roca y a la contribución de las actividades humanas en los medios superficiales" (Reinmann et al., 2001), en este caso se tienen concentraciones mayores a una profundidad de 70-100 cm, sin embargo no superan la concentración límite de  $260 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  para uso industrial. Para cadmio el suelo en la profundidad de 70-100 cm sobrepasa el valor permitido por la norma que es de  $450 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  para suelos de uso industrial.

**Gráfico 8. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 10**

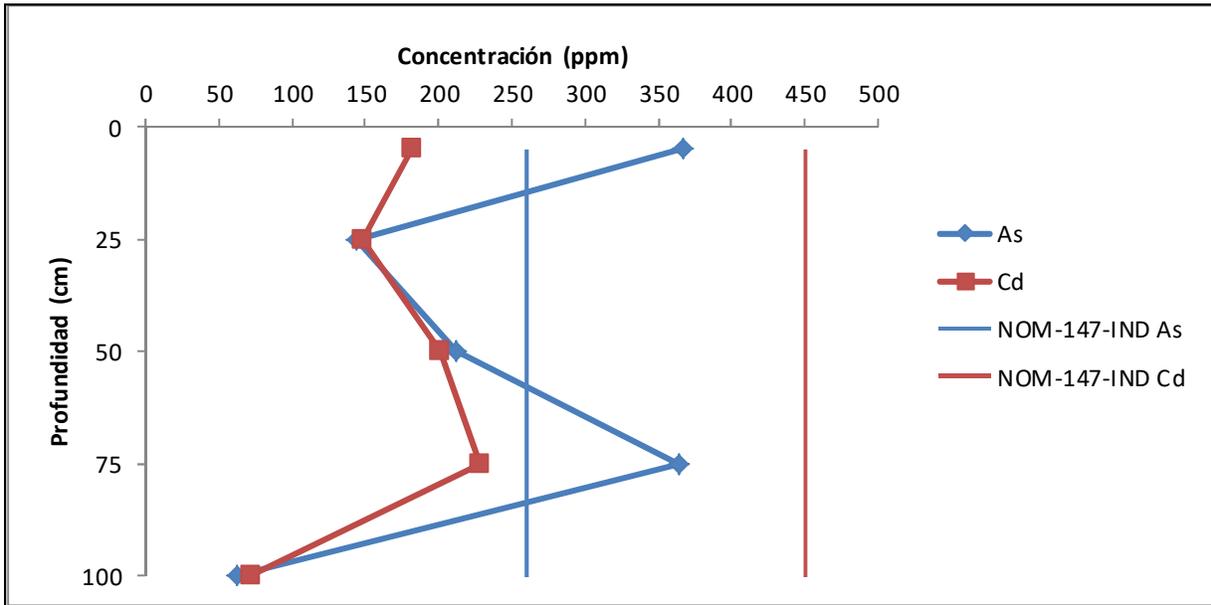


**Gráfico 9. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 14**



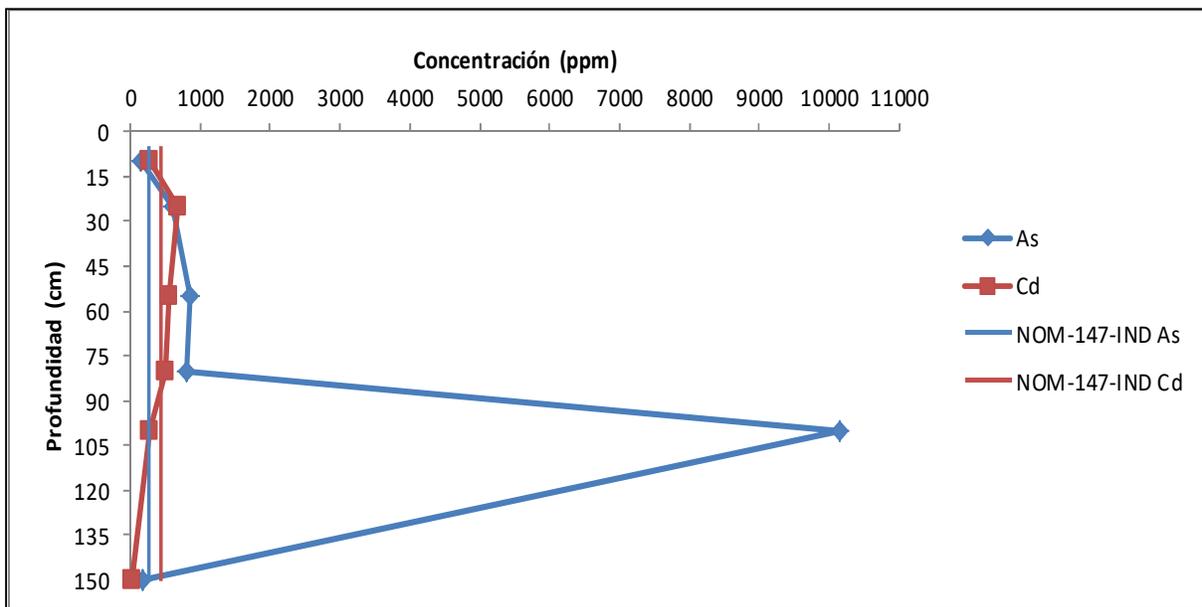
En este gráfico (zanja 14) se puede ver que en la parte superficial se encuentran altas concentraciones y conforme aumenta la profundidad las concentraciones disminuyen.

**Gráfico 10. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 15**



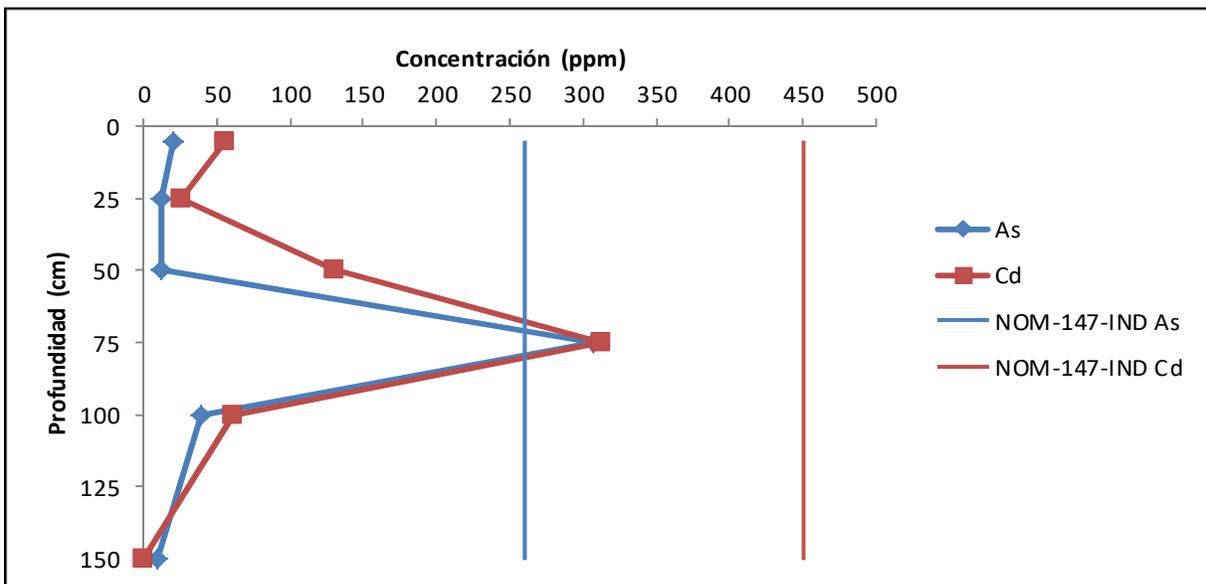
Para la zanja 15 (gráfico 10) se puede ver que las concentraciones determinadas en los suelos para Cd no sobrepasan el valor permitido por la norma. En el caso de As se observa que tanto de manera superficial como a una profundidad de 75 cm, las concentraciones superan el valor límite por la NOM-147.

**Gráfico 11. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 19**



Como se puede ver en el gráfico 11 la zanja 19 es una de las más contaminadas, alcanzando una concentración de  $10163 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  para As a una profundidad de 80-100 cm y  $680 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  para Cd a una profundidad de 10-25 cm, sobrepasando por mucho los valores límite para estos elementos en la NOM-147 para suelos de uso industrial, sin embargo es alarmante encontrar tales concentraciones para As a esa profundidad, ya que como se había mencionado anteriormente es de esperarse que la parte superficial sea la más contaminada sin embargo aquí sucede lo contrario.

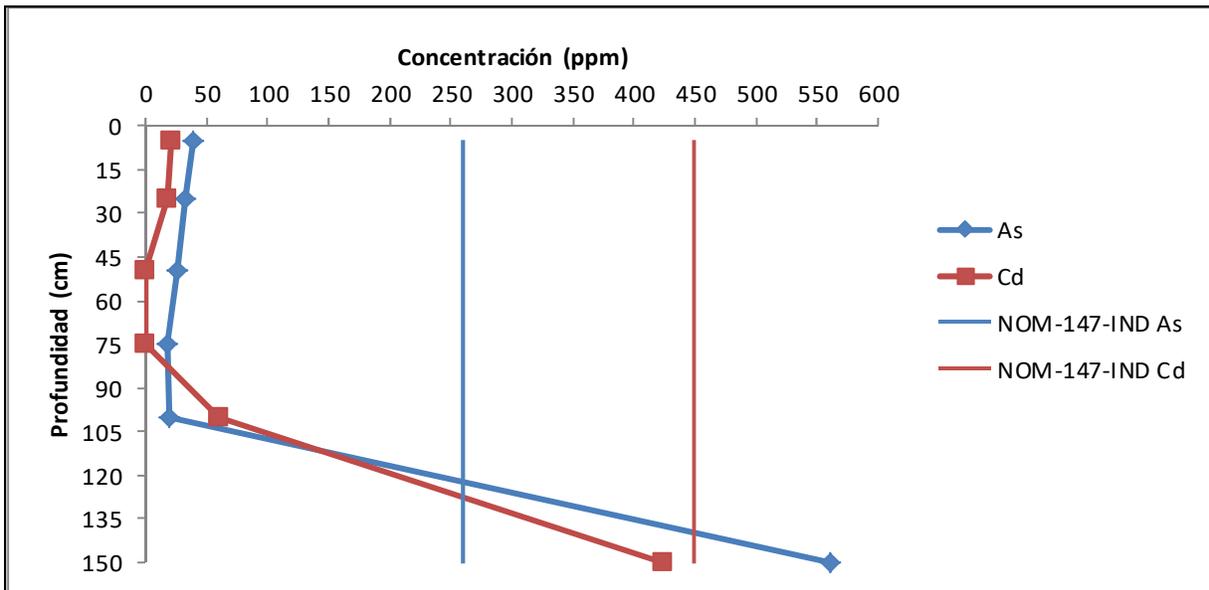
**Gráfico 12. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 20**



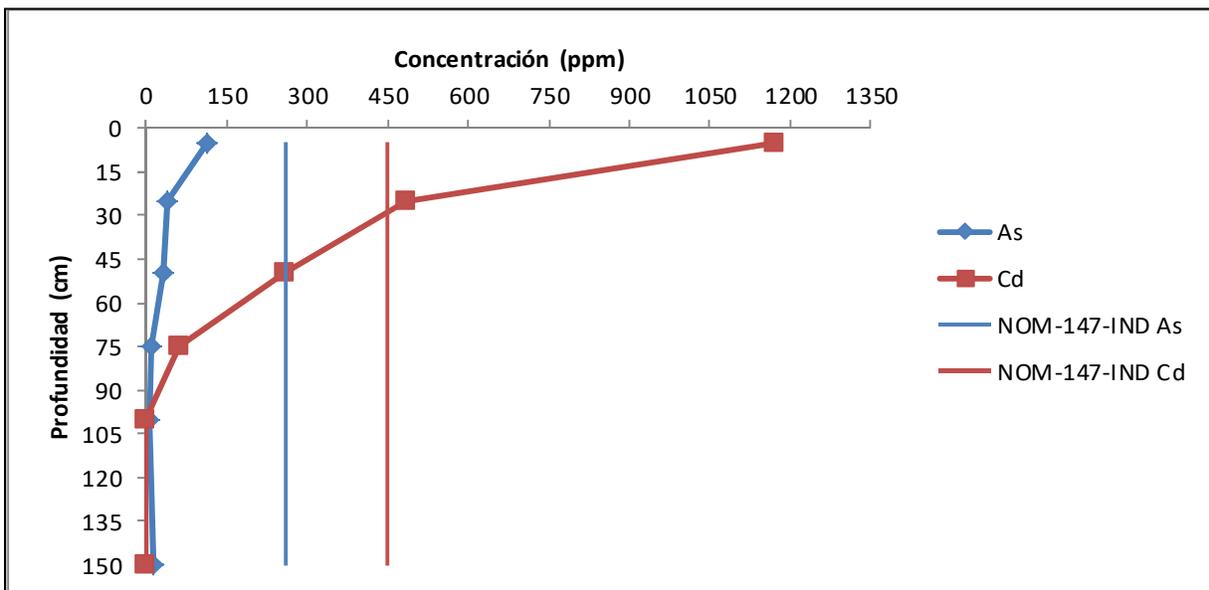
En el gráfico 12 se observa que el valor máximo que presentan las concentraciones para ambos elementos, es a una profundidad de 75-100 cm para esta zanja, el límite permitido por la norma solo es sobrepasado para As.

Para la zanja 23 (gráfico 13) se ve un comportamiento parecido al de la zanja 20, mostrado en el gráfico 12 en la que las concentraciones más altas aparecen a una mayor profundidad, alcanzando As un valor superior al permitido para suelos de uso industrial.

**Gráfico 13. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 23**

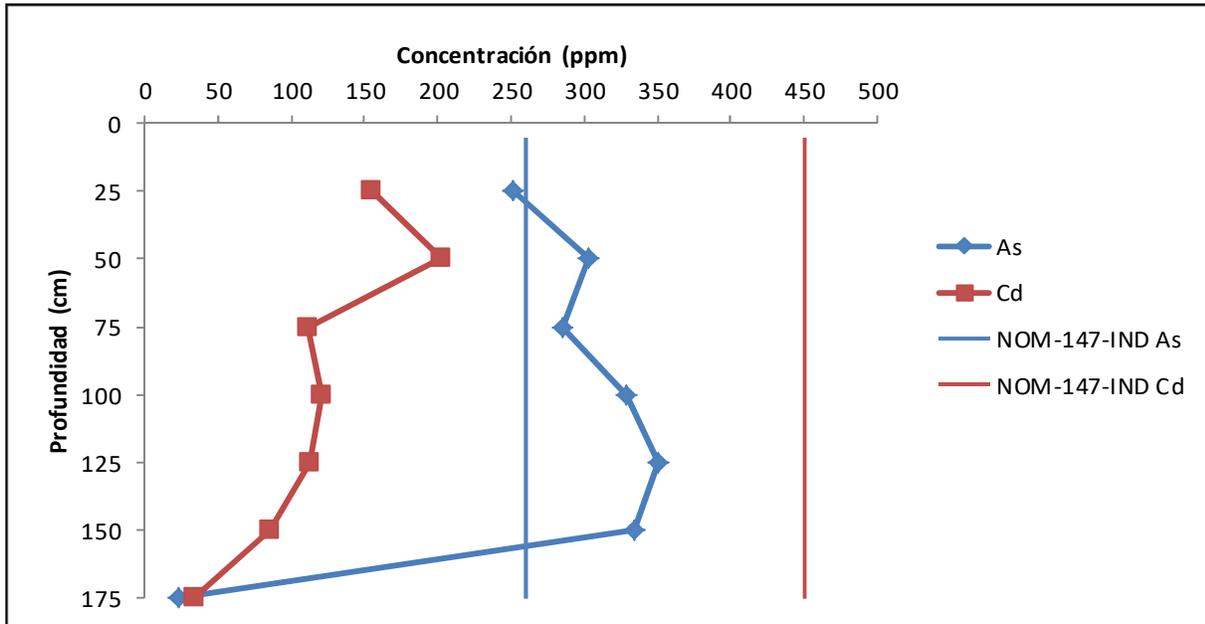


**Gráfico 14. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 24**



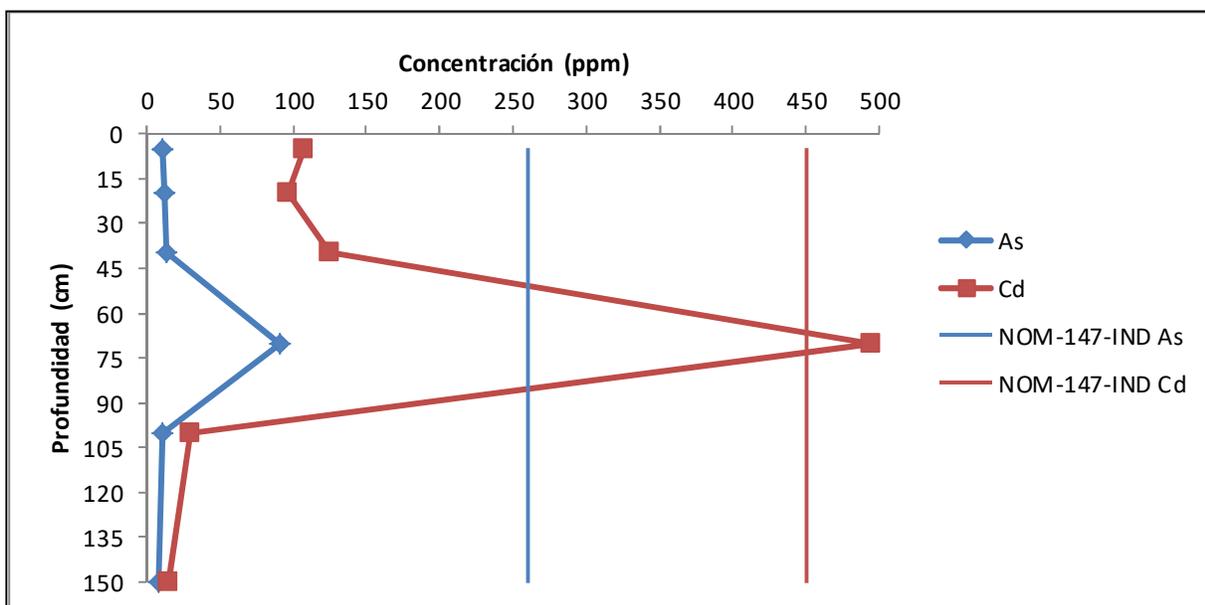
En el gráfico 14 (zanja 24) se observa que las concentraciones más altas son en la parte superficial de la zanja, por otro lado las concentraciones que superan los valores permitidos para Cd son alarmantes, alcanzando un valor máximo de  $1171 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

**Gráfico 15. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 25**



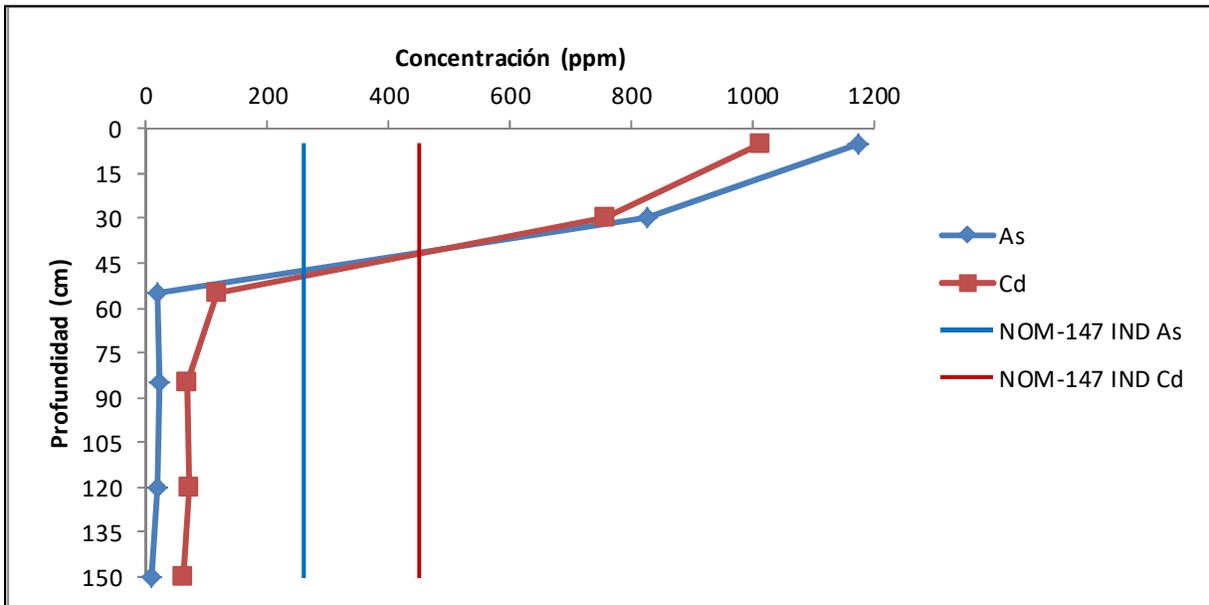
Para el gráfico 15 (zanja 25) se puede observar que conforme aumenta la profundidad las concentraciones de As son mayores, sin embargo de 150-175 cm se tiene una concentración mucho menor que en las profundidades anteriores, también se ve que a partir de los 50 cm de profundidad las concentraciones sobrepasan los límites permitidos por la norma, para cadmio se observa un comportamiento muy parecido al arsénico, sin embargo para este elemento no se supera el valor establecido para suelos de uso industrial.

**Gráfico 16. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 30**



En el gráfico 16 se observa que para la zanja 30 a una profundidad de 40-70 cm se tiene el valor máximo de concentración tanto de arsénico y cadmio, encontrándose este punto fuera del comportamiento normal, ya que al inicio se tienen concentraciones altas que van disminuyendo conforme aumenta la profundidad, además para Cd este valor supera la concentración límite para suelos de uso industrial.

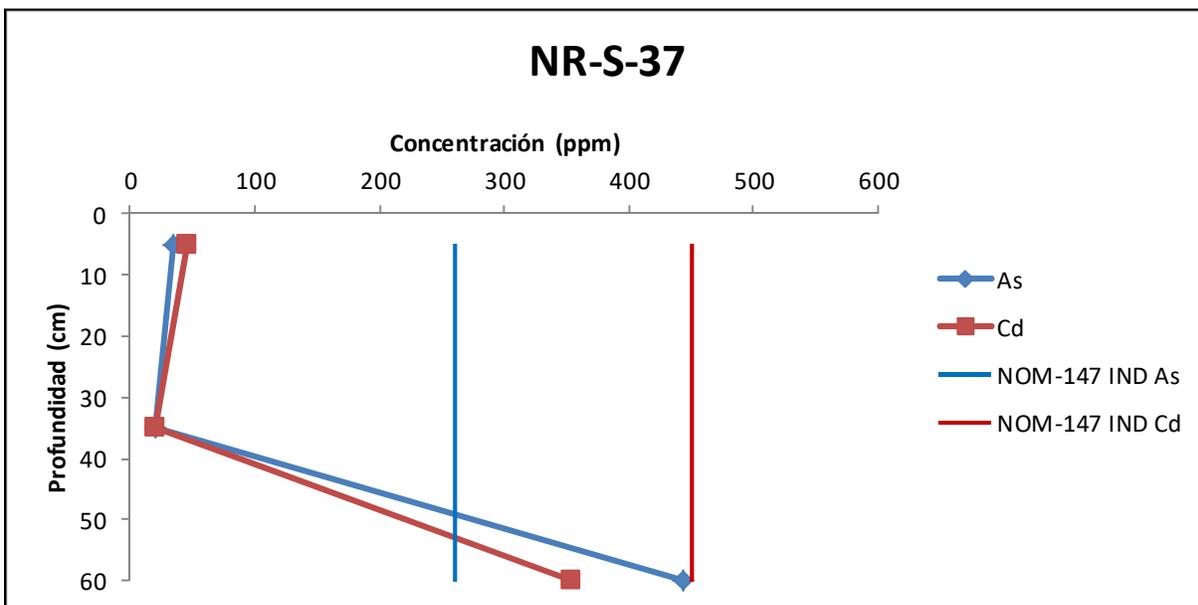
**Gráfico 17. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 36**



En el gráfico 17 (zanja 36) se observa que las concentraciones disminuyen conforme aumenta la profundidad de la zanja, sin embargo los valores que se tienen a nivel superficial son mayores que los niveles permitidos para suelos de uso industrial por la norma, siendo para As de  $1175 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  y para Cd de  $1013 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

A diferencia de la zanja 36, en la zanja 37 (gráfico 18) se observa que la concentración aumenta conforme aumenta la profundidad, solo que en este caso los niveles permitidos solo se superan para As, alcanzando un valor de  $444 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Gráfico 18. Concentración de As y Cd ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 37

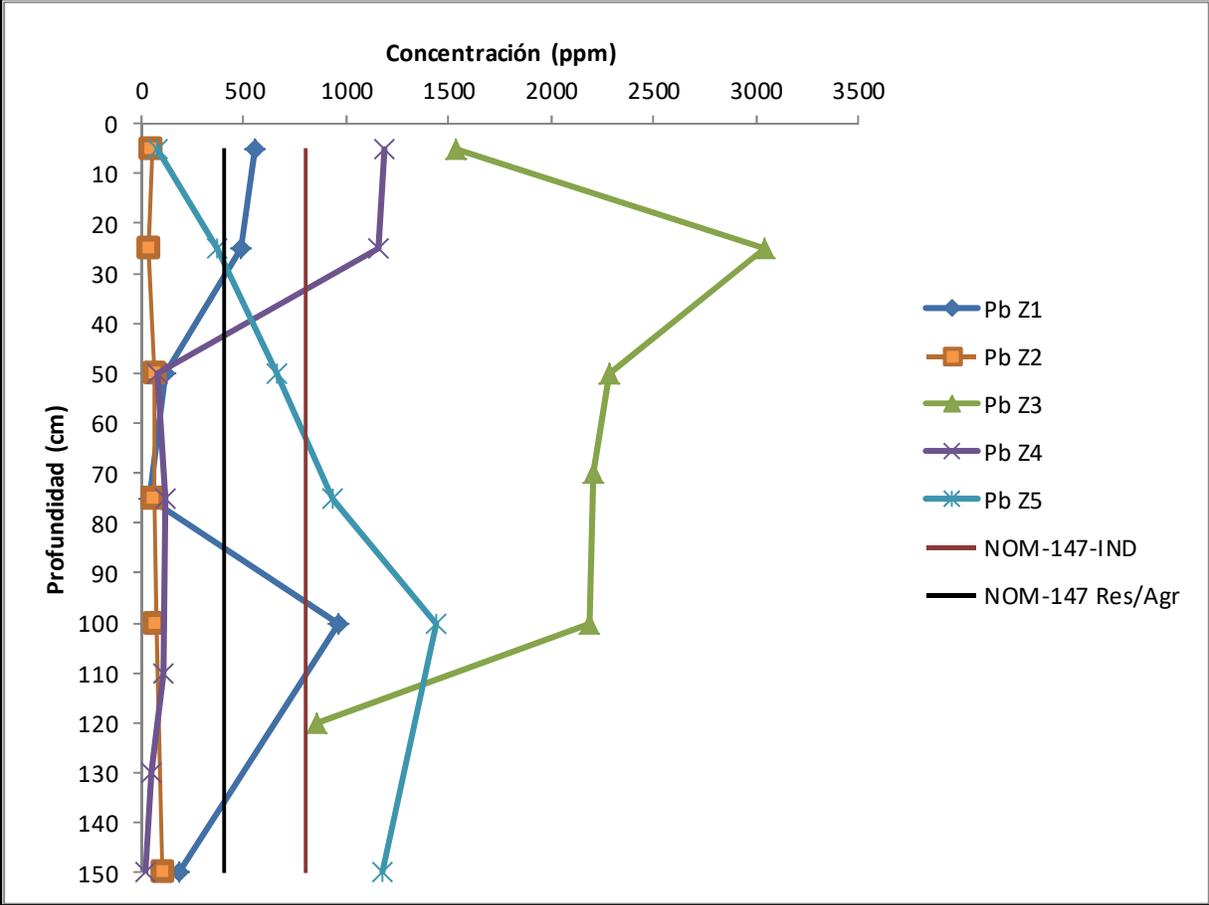


En las siguientes gráficas se muestra el comportamiento vertical de Pb que es el elemento con mayores concentraciones dentro del predio de estudio.

En el gráfico 19 se realiza una comparación entre las concentraciones de Pb obtenidas para los suelos de las zanjas 1 a la 5 y se compara con los valores permitidos por la NOM-147 para suelos de uso industrial así como suelos de uso residencial/agrícola.

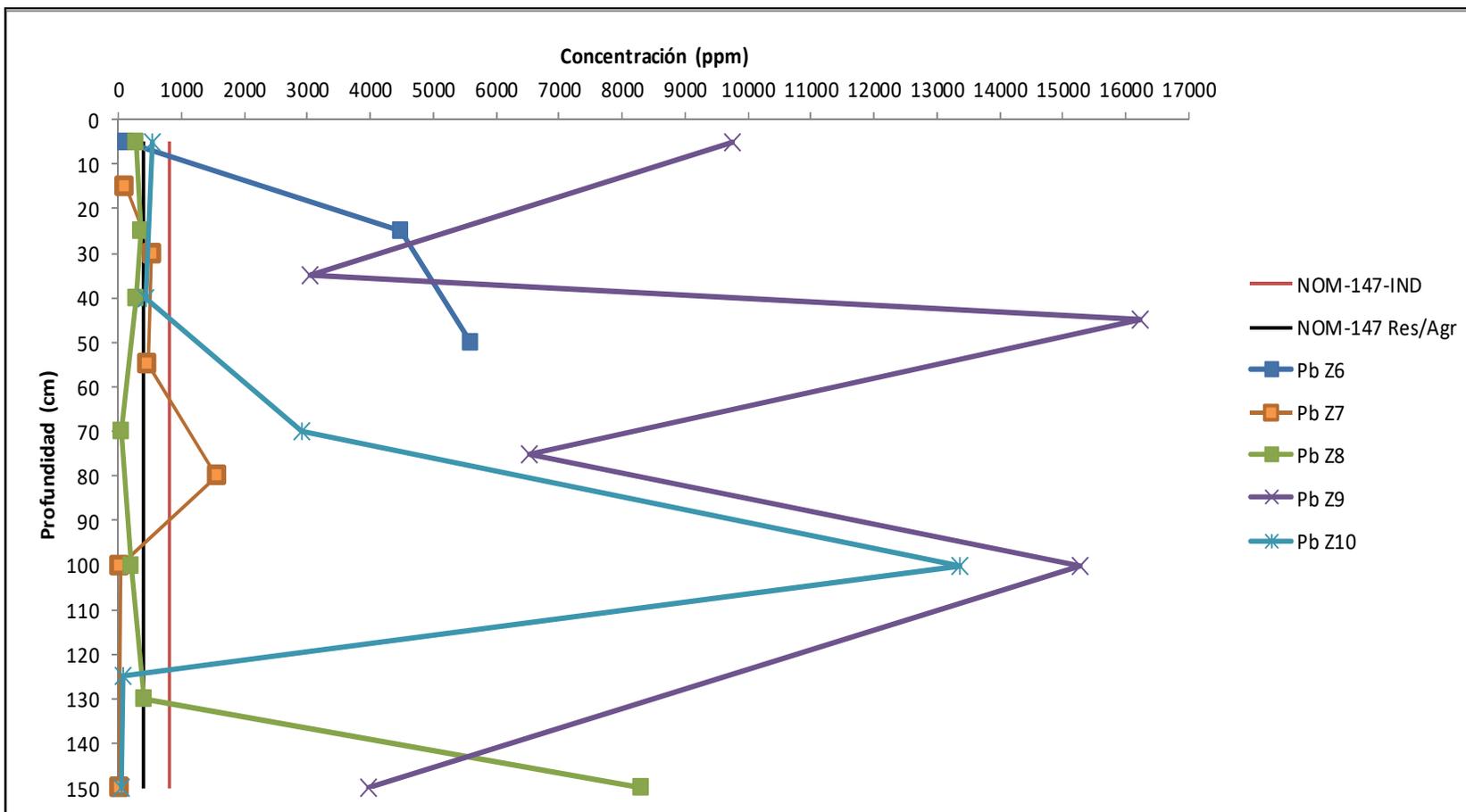
La zanja 3 presenta los valores mayores de Pb sobrepasando los niveles permitidos para suelos de uso industrial y se observan concentraciones mayores de Pb a mayores profundidades. La zanja 4 está contaminada solamente en la parte superficial y la zanja 5 en profundidades mayores a 80 cm.

**Gráfico 19. Concentración de Pb (mg·kg<sup>-1</sup>) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 1-5**

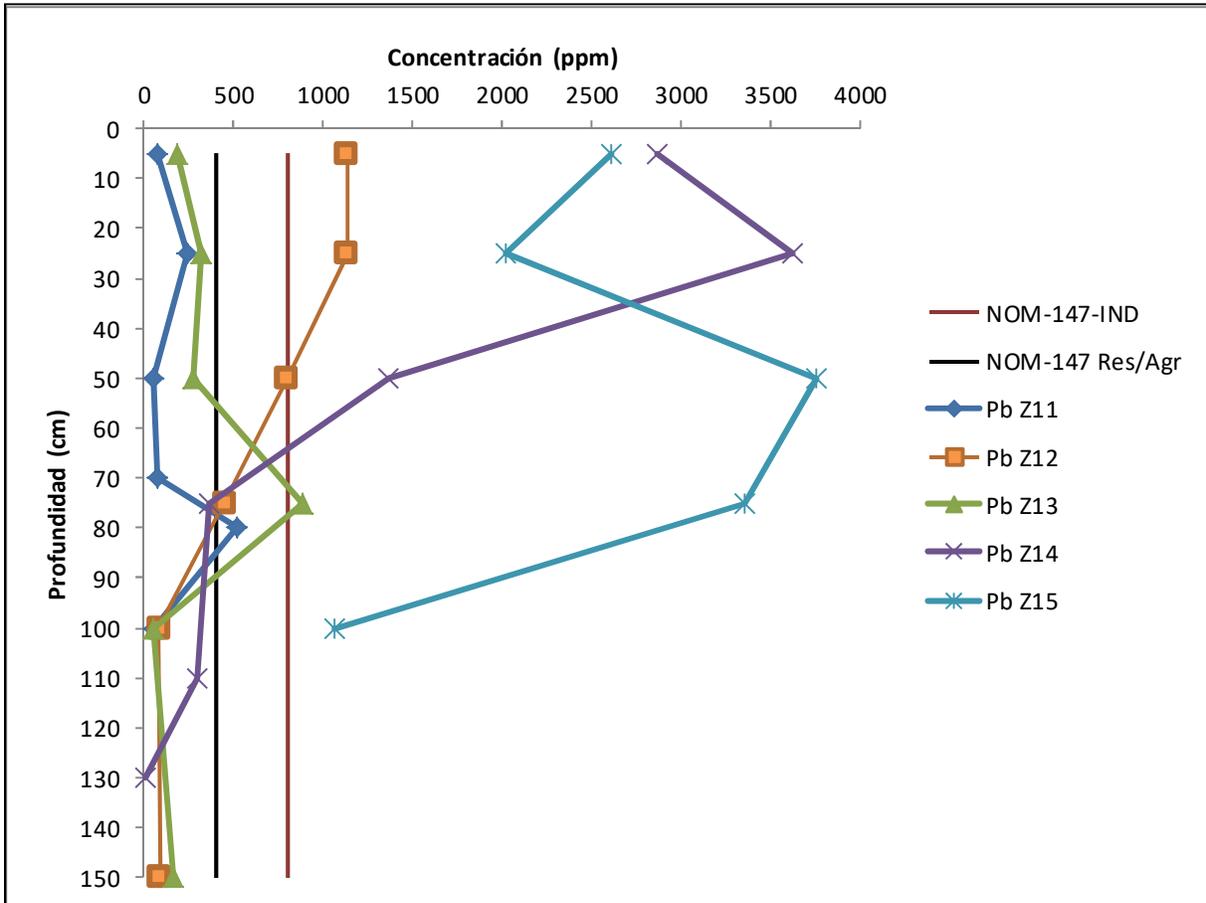


En el gráfico 20 se pueden observar las altas concentraciones de Pb que se presentan en las diferentes profundidades de la zanja 9, como se puede ver, esta zanja presenta concentraciones mayores al valor de 800 mg·kg<sup>-1</sup>, permitidos por la NOM-147 para suelos de uso industrial, encontrándose el valor máximo a una profundidad de 35-45 cm, tanto en la zanja 6 como en la 10 también se pueden observar valores que superan 800 mg·kg<sup>-1</sup>, sin embargo estos son menores a los de la zanja 9.

Gráfico 20. Concentración de Pb (mg·kg<sup>-1</sup>) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 6-10



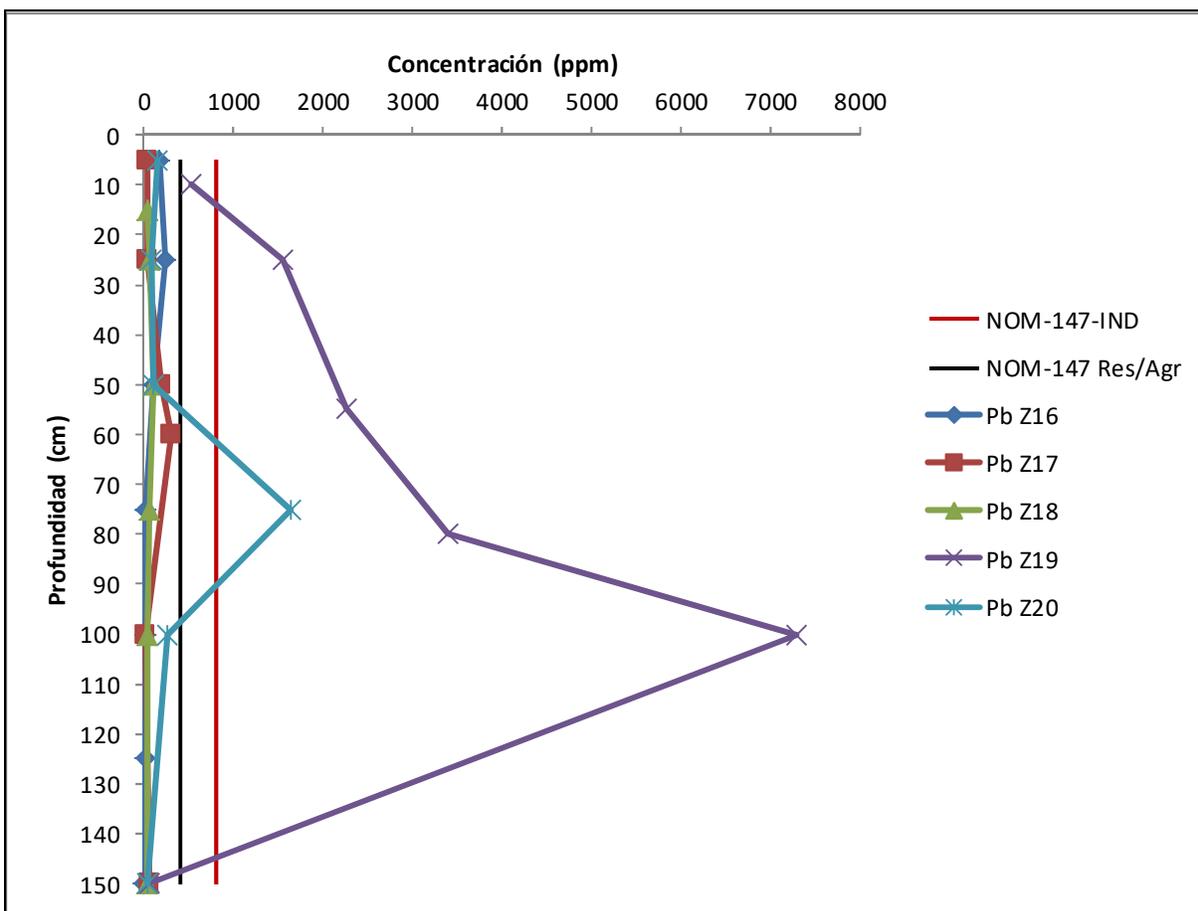
**Gráfico 21. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 11-15**



En el gráfico 21 se puede identificar que la zanja 15 así como la 14 son las que presentan las concentraciones más altas de Pb, siendo mayores a  $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . A diferencia de la zanja 15, en la zanja 14 la concentración de Pb disminuye con la profundidad. En la zanja 15 se observa que la concentración más alta se encuentra a una profundidad de 25-50 cm.

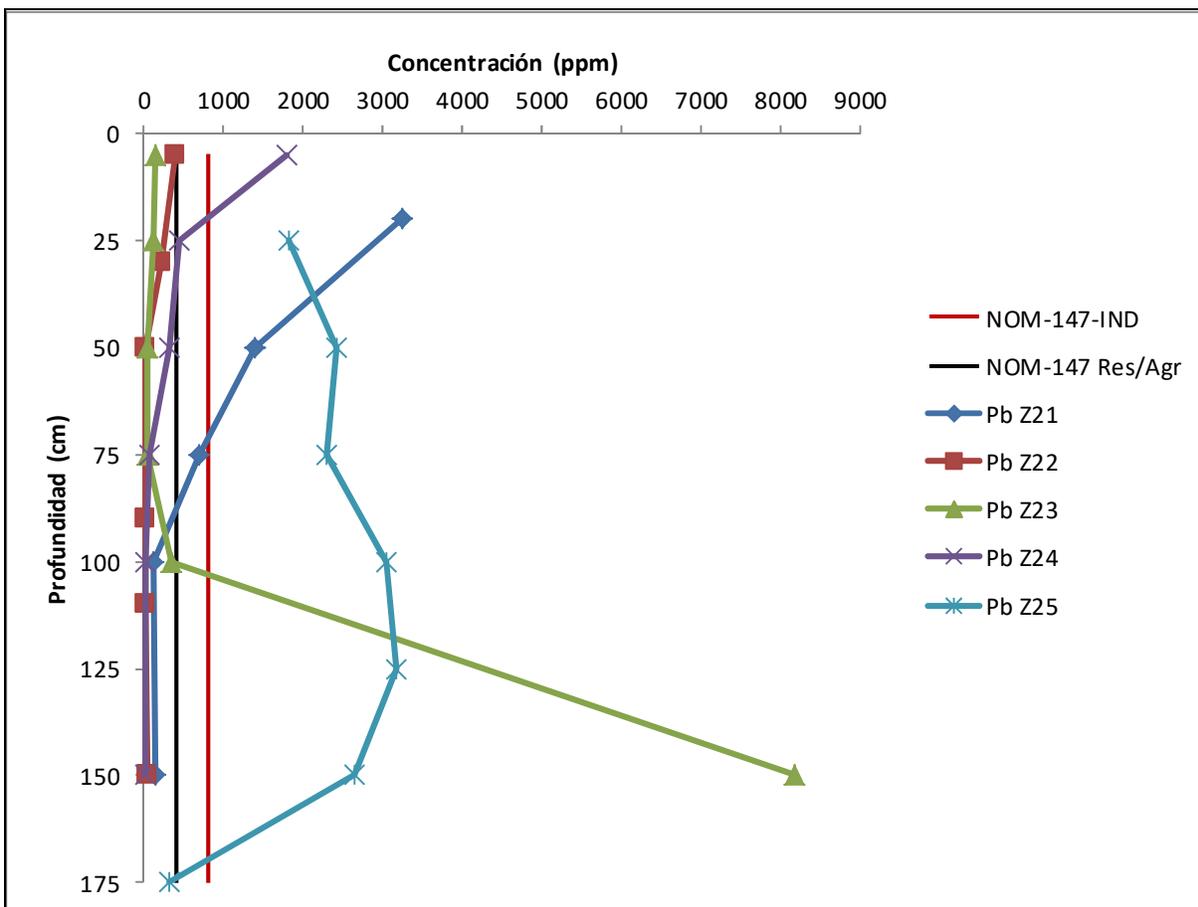
En el gráfico 22 se puede ver que la zanja 19 presenta un comportamiento alarmante ya que tiene concentraciones que superan las  $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  que permite la NOM-147 para suelos de uso industrial, la concentración aumenta con la profundidad, alcanzando un valor mayor a  $7000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  a una profundidad de 80-100 cm. La zanja 20 presenta a 80 cm de profundidad una concentración mayor a  $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

**Gráfico 22. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 16-20**



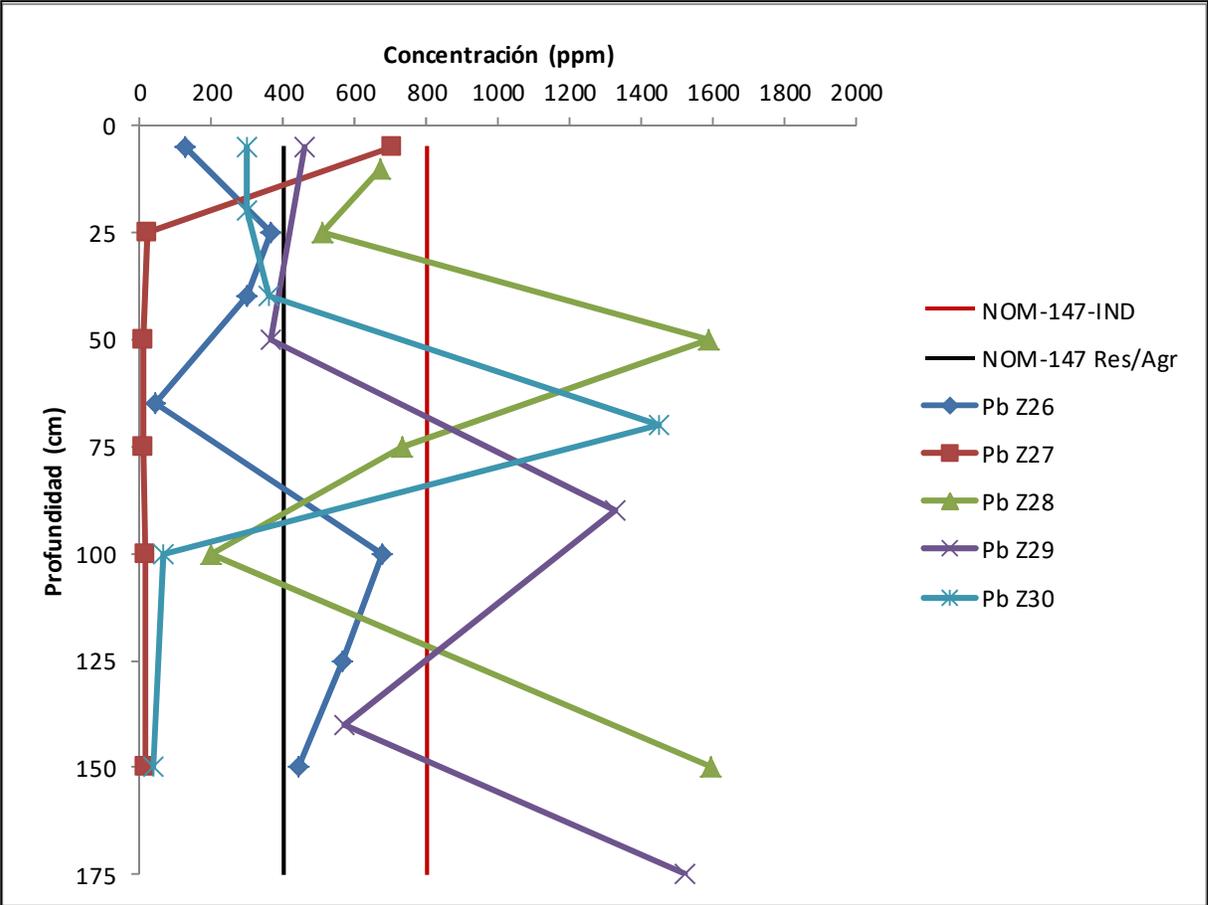
En el gráfico 23 se pueden identificar claramente 4 zanjas que sobrepasan el valor límite de la NOM-147 para suelos de uso industrial, en primera instancia se observa que la zanja 21 presenta altas concentraciones hasta los 50 cm, a partir de esta profundidad las concentraciones van disminuyendo hasta llegar a concentraciones menores al valor límite de suelos industriales. Por otro lado se observa que la zanja 23 tiene solo un punto que sobrepasa el valor límite, este se encuentra a una profundidad de 100-150 cm, mientras que la zanja 25 tiene concentraciones mayores a  $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en todos sus puntos a excepción de la profundidad 150-175 cm.

**Gráfico 23. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 21-25**



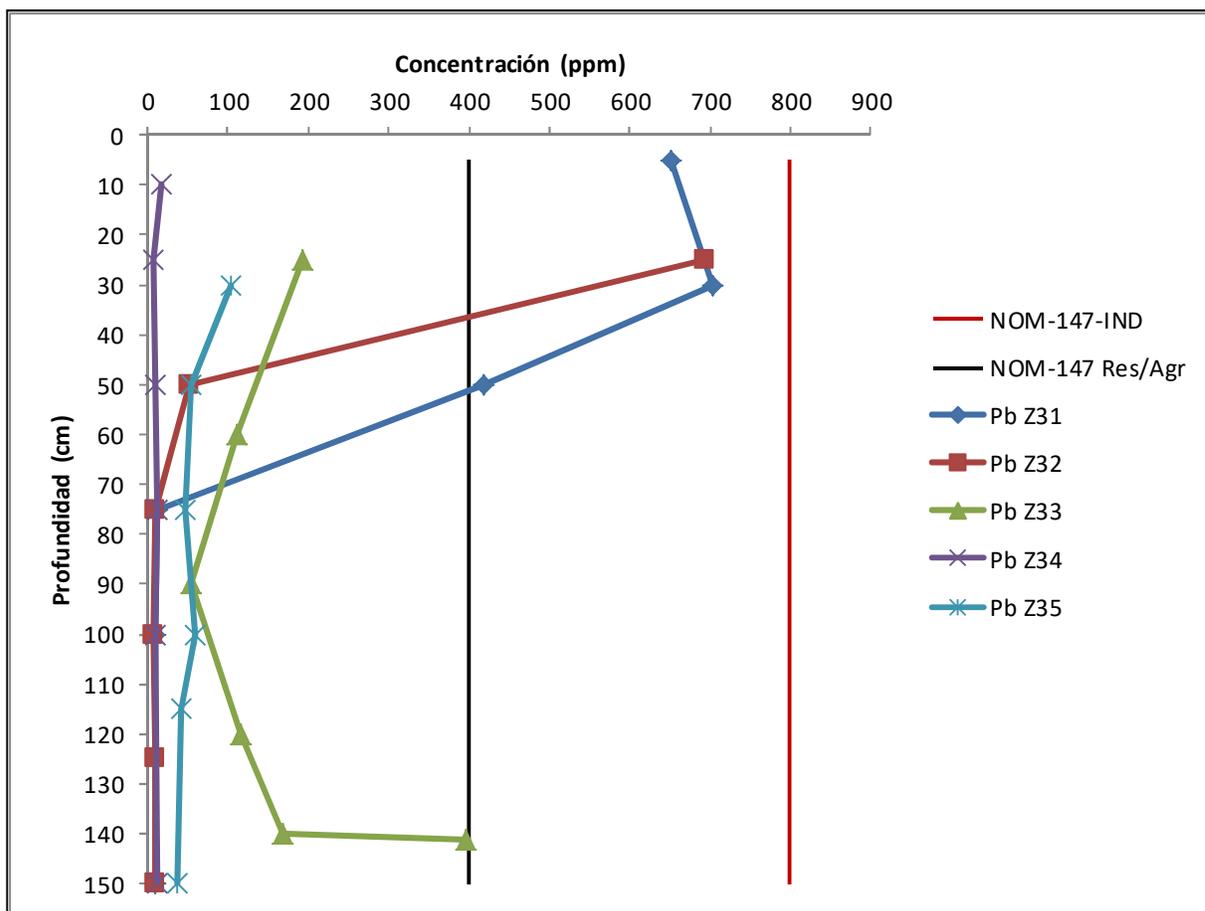
En el gráfico 24 se observa que las zanjas 28, 29 y 30 sobrepasan la concentración máxima permitida por la NOM-147 y tienen un comportamiento similar con la profundidad, ya que conforme aumenta la profundidad aumenta la concentración, en el caso de la zanja 30, se tiene que solo en una profundidad sobrepasa las  $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  establecidas para suelos de uso industrial, mientras que las zanjas 28 y 29 lo hacen en varias profundidades, siendo el valor máximo a una profundidad de 100-150 cm y de 140-175 cm respectivamente.

Gráfico 24. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 26-30



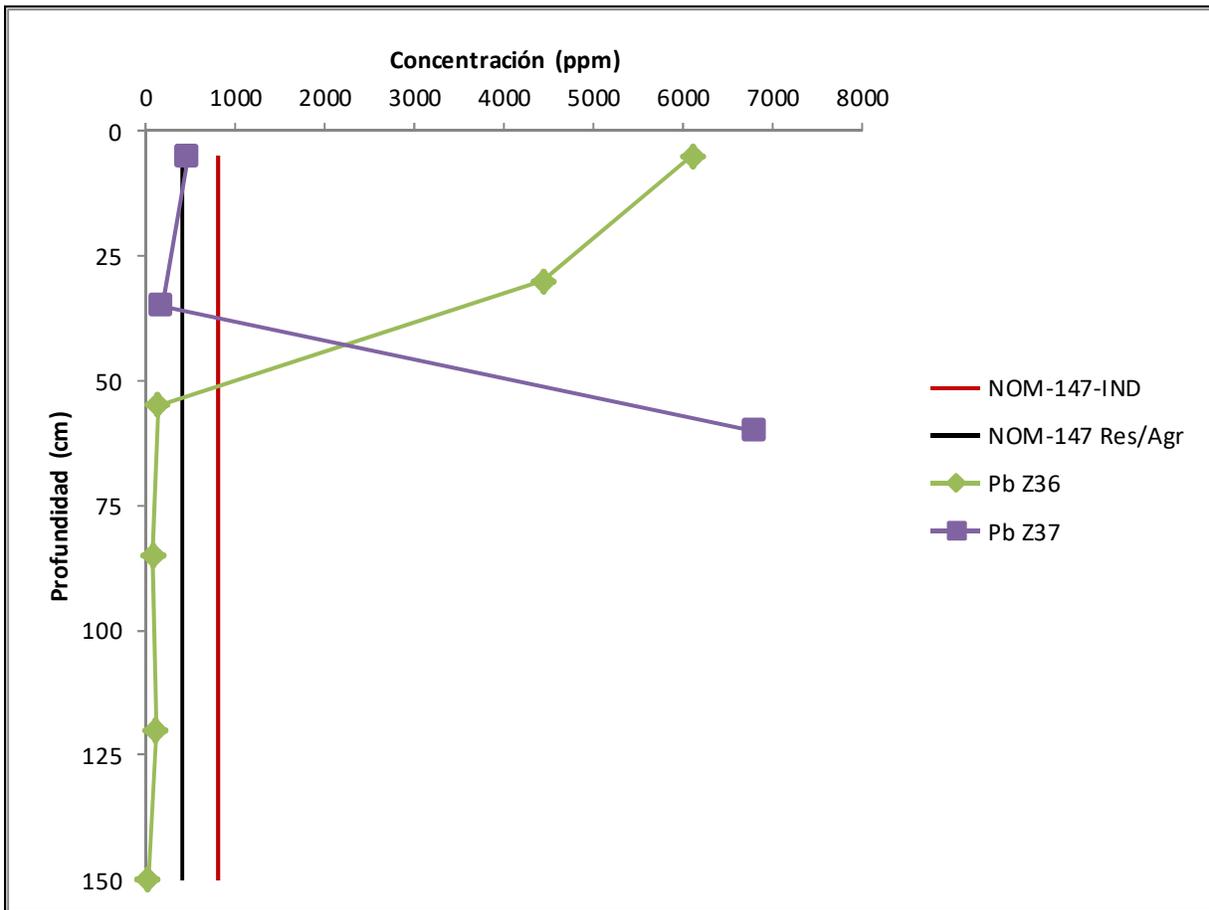
En el gráfico 25 a diferencia de todos los anteriores donde se muestra el comportamiento de Pb, se observa que ninguna de las zanjas sobrepasa el valor máximo permitido para este elemento en suelos de uso industrial.

**Gráfico 25. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 31-35**



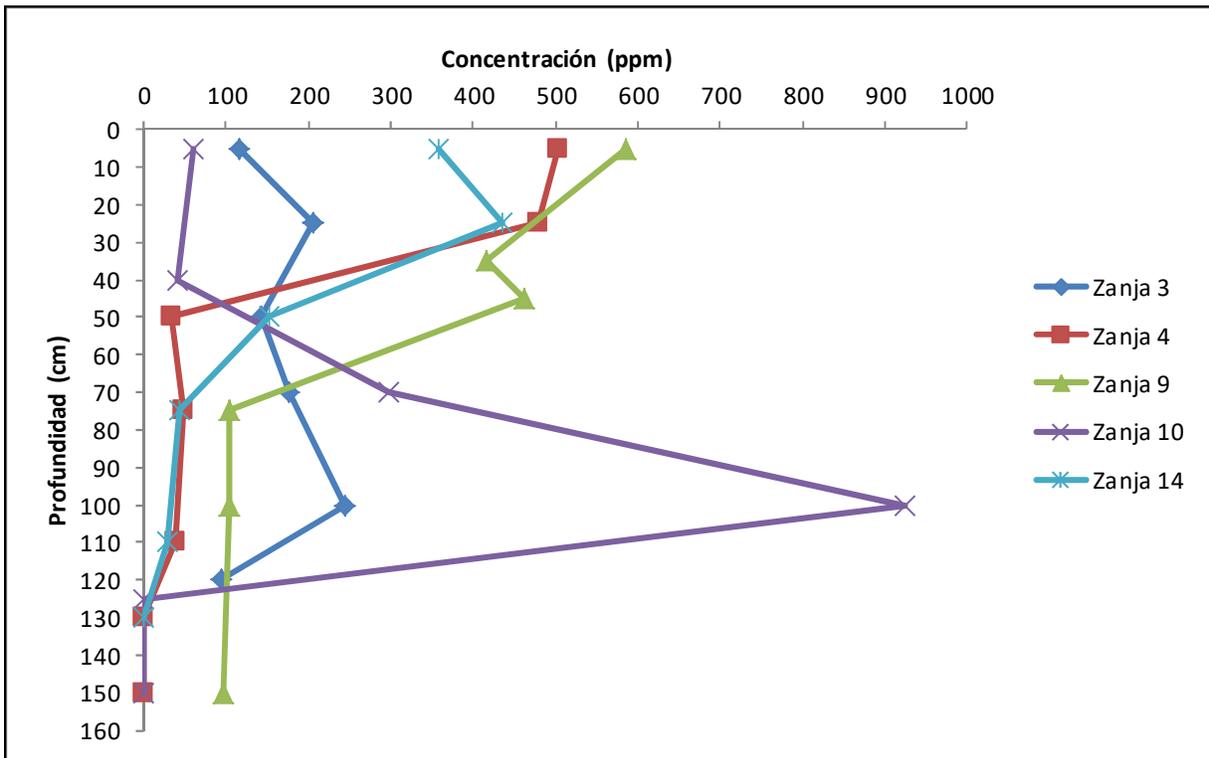
En el gráfico 26 se observa que ambas zanjas superan los niveles permitidos por la NOM-147 para suelos de uso industrial. La zanja 36 presenta un comportamiento donde las concentraciones disminuyen con la profundidad, solamente el suelo superficial de 0-5 cm muestra una concentración de Pb mayor a  $6000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En la zanja 37 se observa que el valor de concentración máxima lo presenta a una profundidad de 35-60 cm teniendo una concentración mayor de  $6800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , incluso mayor que para la zanja 36.

Gráfico 26. Concentración de Pb ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento de las zanjas 36-37

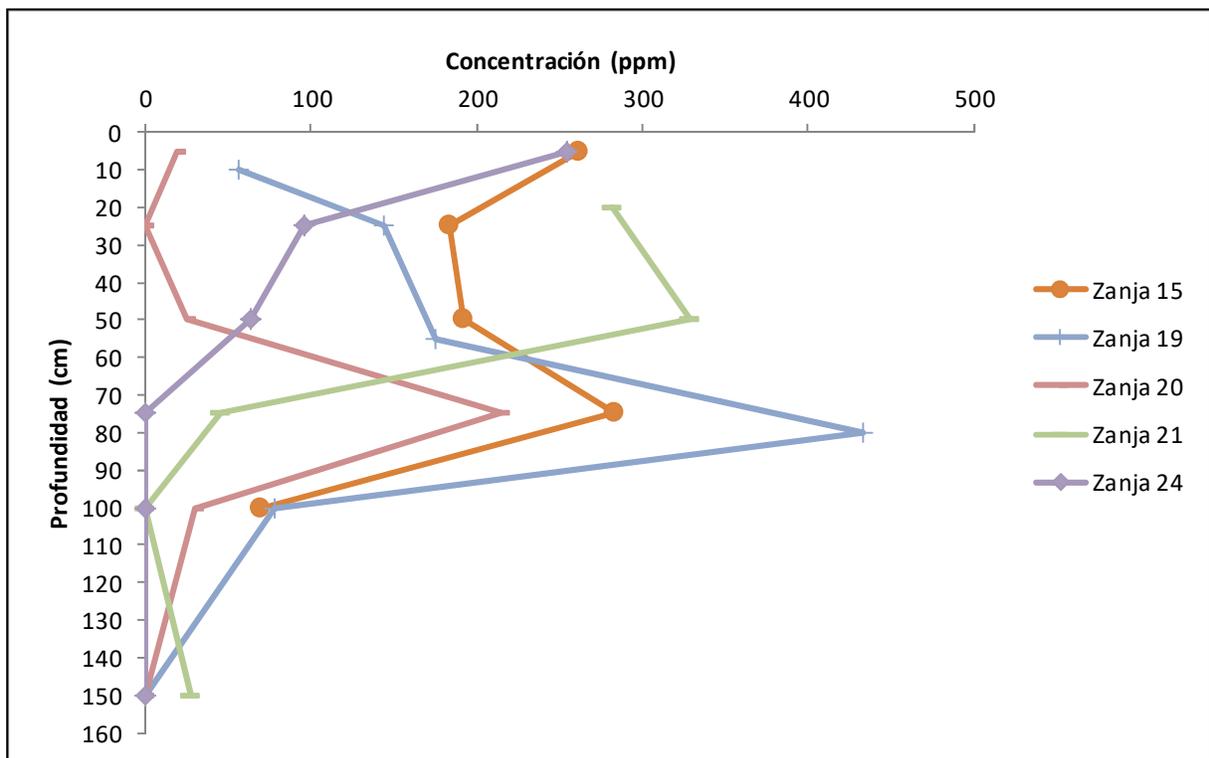


Analizando los resultados de las concentraciones obtenidas por espectrometría de fluorescencia de rayos X se observó que un elemento que, aunque no está normado para suelos en México y que se conoce como tóxico es el antimonio. Por lo que a continuación se presentan varios gráficos que mostraran las zanjas más significativas para analizar el comportamiento vertical del Sb y evaluarlo.

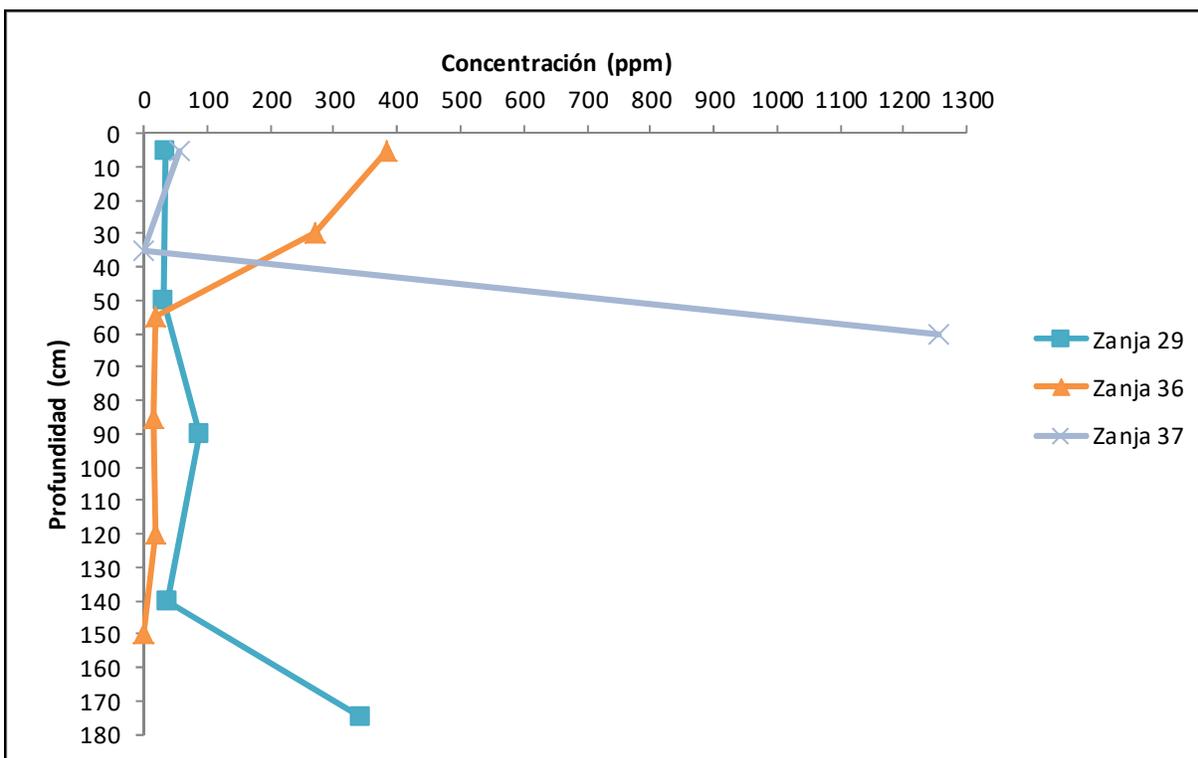
**Gráfico 27. Concentración de Sb ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 3, 4, 9, 10 y 14**



**Gráfico 28. Concentración de Sb ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 15, 19, 20, 21 y 24**



**Gráfico 29. Concentración de Sb ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 29, 36 y 37**



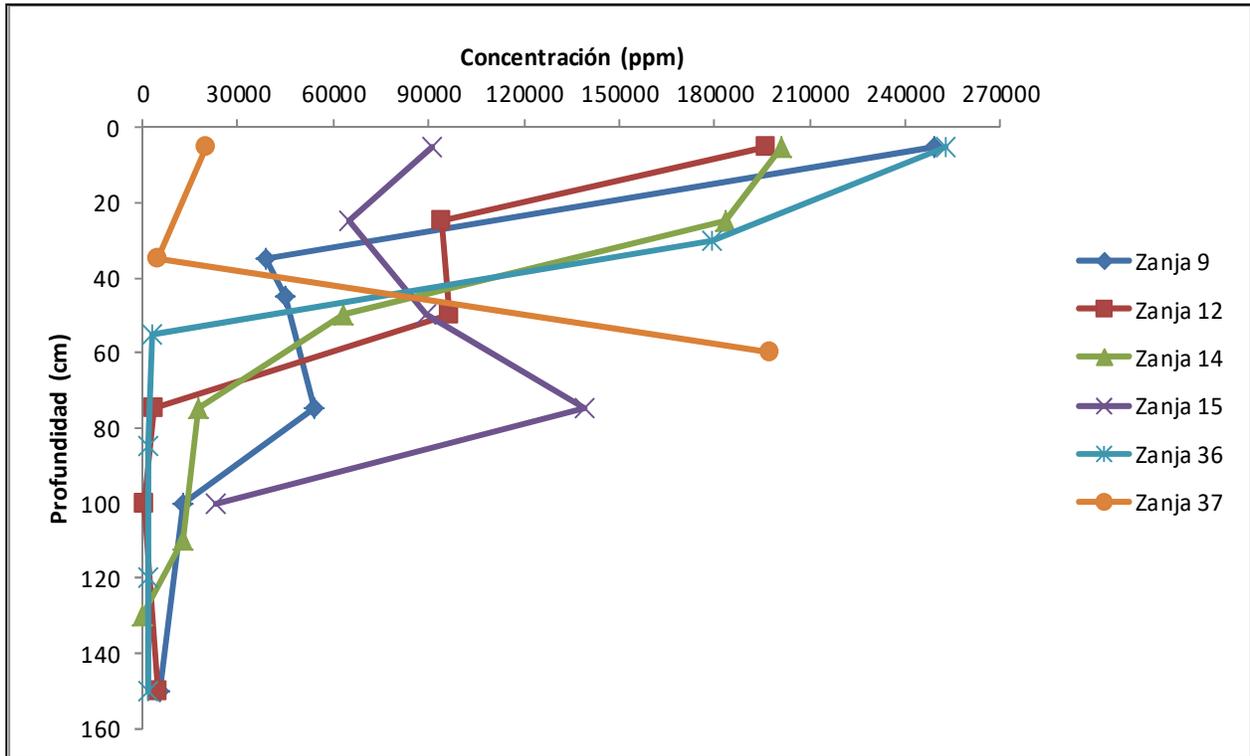
En los gráficos anteriores (27-29) se muestran las zanjas más significativas para describir el comportamiento vertical de Sb tomando en cuenta la concentración mínima (no detectada por el equipo) y máxima de este elemento ( $1254 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ).

En el gráfico 29 se observa que la zanja que presenta la mayor concentración de antimonio es la 37, la cual tiene un valor de  $1254 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ , por otro lado en el gráfico 27 la zanja que presenta la concentración mayor de Sb es la 10, con un valor de  $924 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ , en el gráfico 28 la zanja que presenta la concentración mayor de Sb es la 19 con un valor de  $434 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ . De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) el antimonio tiene un límite máximo permisible de  $36 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  en suelos (Chang et al, 2002), por lo cual también debe de considerarse como un EPT aunque no se encuentre regulado por la NOM-147-SEMARNAT.

Otro elemento que mostró altas concentraciones es el Zn, presentó una concentración máxima de 25 % masa/masa en la zanja 36. De acuerdo con Kabata-Pendias y Mukherjee, (2011) este elemento no tiene criterios nacionales o internacionales que representen un suelo industrial contaminado con riesgos potenciales para la salud humana. Sin embargo, señalaron que las

concentraciones de Zn mayores a  $125 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  se pueden atribuir a la contaminación con toxicidad potencial (Citado en Alvaréz et al. 2018) por lo cual este elemento es de notar.

**Gráfico 30. Concentración de Zn ( $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 9, 12, 14, 15, 36 y 37**



En el gráfico 30 se observan las zanjas más significativas para describir el comportamiento vertical de Zn, la zanja que presenta el valor mayor de este elemento es la 36, con una concentración de  $252967 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  (25% masa/masa), seguido de la zanja 9 la cual tiene una concentración de  $249300 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  (24.93% masa/masa) ambas zanjas presentan concentraciones mayores a nivel superficial. Las zanjas 12, 14 y 37 tienen valores muy cercanos. Sin embargo, la zanja 14 presenta la concentración mayor que es de  $201300 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  (20.13% masa/masa). En resumen, se observa que para la mayoría de las zanjas exploradas, la concentración de Zn es mayor en la superficie.

A continuación, en la figura 25 y 26 se presentan algunos mapas que se realizaron a diferentes profundidades para mostrar el comportamiento vertical de las concentraciones de As y la delimitación de la contaminación por As, lo que permitirá calcular el volumen de suelo

contaminado y que sería necesario remediar o confinar para evitar un riesgo al ambiente o a la población.

En la figura 25 se observa la delimitación por medio de un triángulo rojo de las zanjas más contaminadas por As a nivel subsuperficial, estas zanjas se encuentran en el segundo y cuarto cuadrante de la zona de muestreo de acuerdo con la división por cuadrantes, siendo las zanjas 9, 6, 36 y 25 las que sobrepasan el límite de  $260 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de As permitido para suelos de uso industrial por la NOM-147.

En la figura 26 se observa la delimitación por medio de un triángulo rojo de una zona más extensa que incluye las zanjas más contaminadas por As a nivel subsuperficial, estas zanjas se encuentran en el segundo, tercer y cuarto cuadrante de la zona de muestreo, en la figura se puede observar que las zanjas 9 y 25 vuelven a tener concentraciones mayores a  $260 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de As, mientras que la zanja 19 se encuentra en color rojo, ya que la concentración de esta zanja está por arriba de  $1000 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de As.

De acuerdo con las figuras 25 y 26, las zanjas 9 y 25 presentan concentraciones superiores a los  $260 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  en ambas profundidades (de 25-50 y de 75-100 cm), sin embargo la zanja que presenta mayor contaminación es la 19.

Por lo que la zona a remediar para el elemento As sería al menos la que comprende los triángulos marcados tanto en la figura 25 como en la 26, que es una extensión aproximada de 10 hectáreas (QGIS 3.2).

Del mismo modo que para As para delimitar y evaluar el volumen de suelo contaminado se presentan en las figuras 27, 28 y 29 algunos mapas que se realizaron a diferentes profundidades para mostrar el comportamiento horizontal y vertical de las concentraciones de Cd.

En la figura 27 se observa la delimitación por medio de un triángulo rojo de las zanjas más contaminadas por Cd a nivel subsuperficial, estas zanjas se encuentran en la zona central del muestreo en el primer y tercer cuadrante de acuerdo con la división del mapa, siendo las zanjas 14, 19 y 24 las que sobrepasan el límite de  $450 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de Cd permitido para suelos de uso industrial por la NOM-147. La zanja 14 tiene una concentración mayor de  $1000 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de Cd.

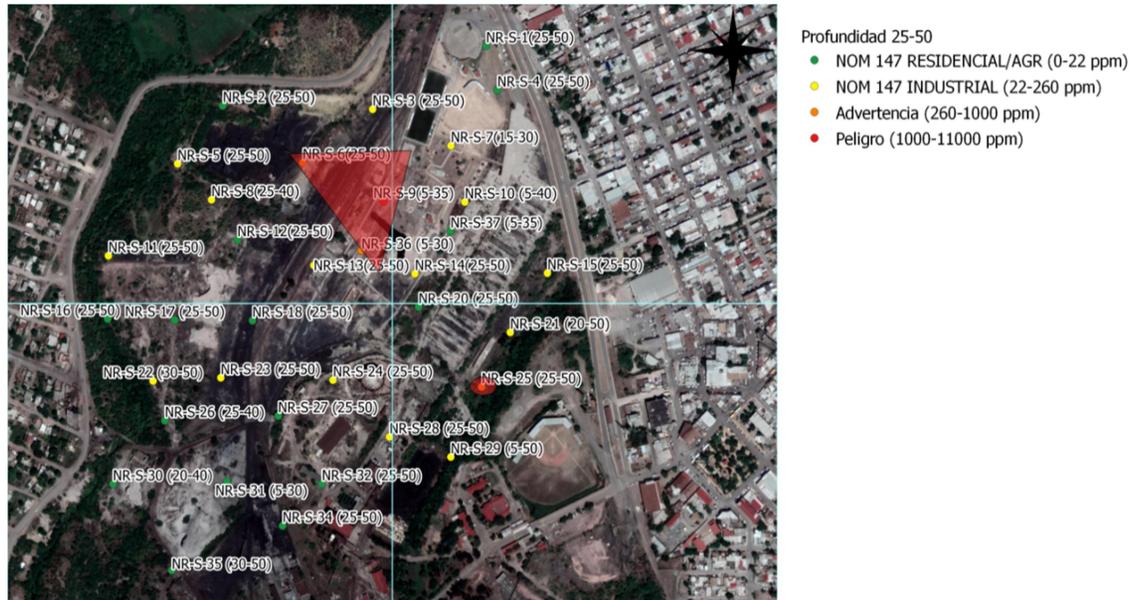


Figura 25. Mapa de distribución de concentraciones de As a una profundidad de 25-50 cm

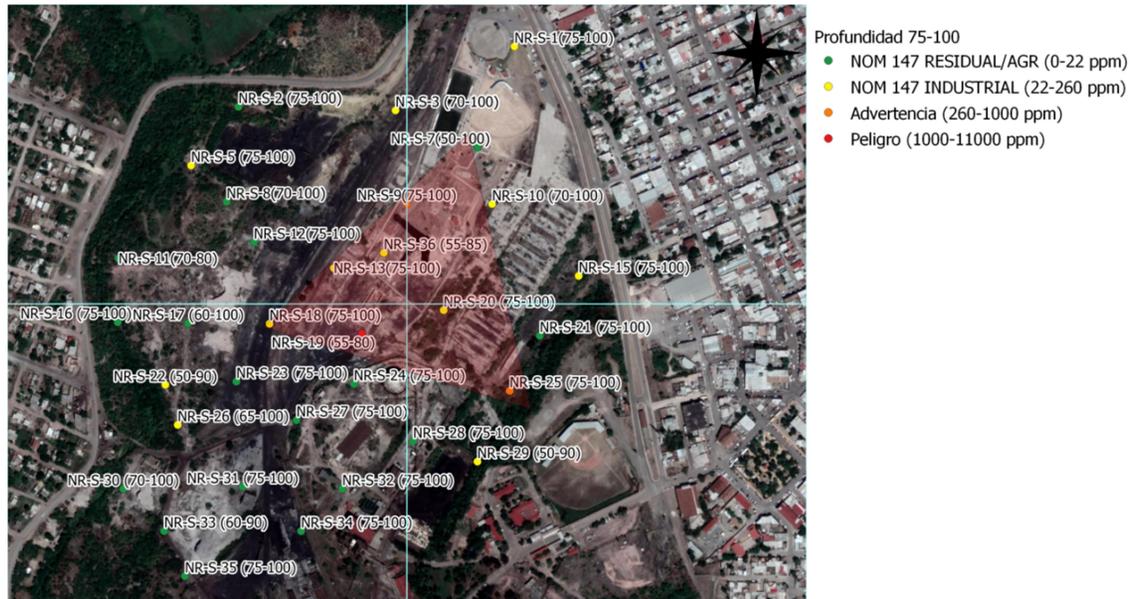


Figura 26. Mapa de distribución de concentraciones de As a una profundidad 75-100

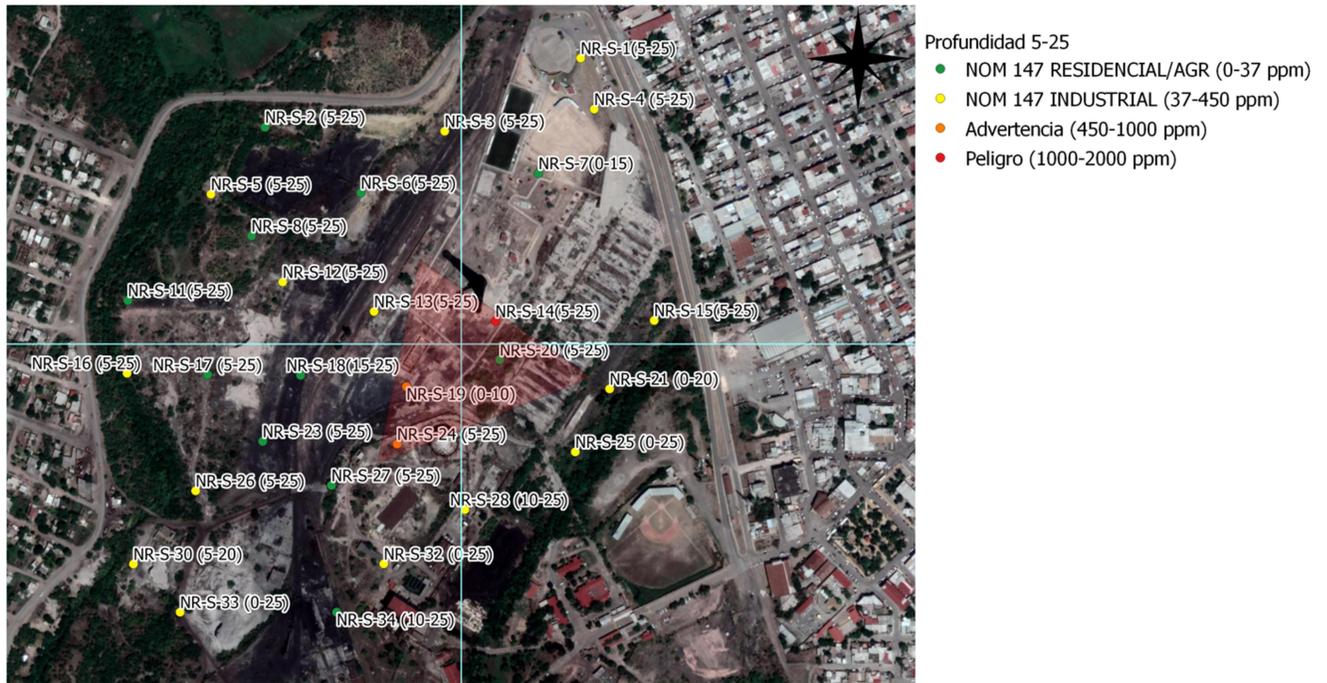
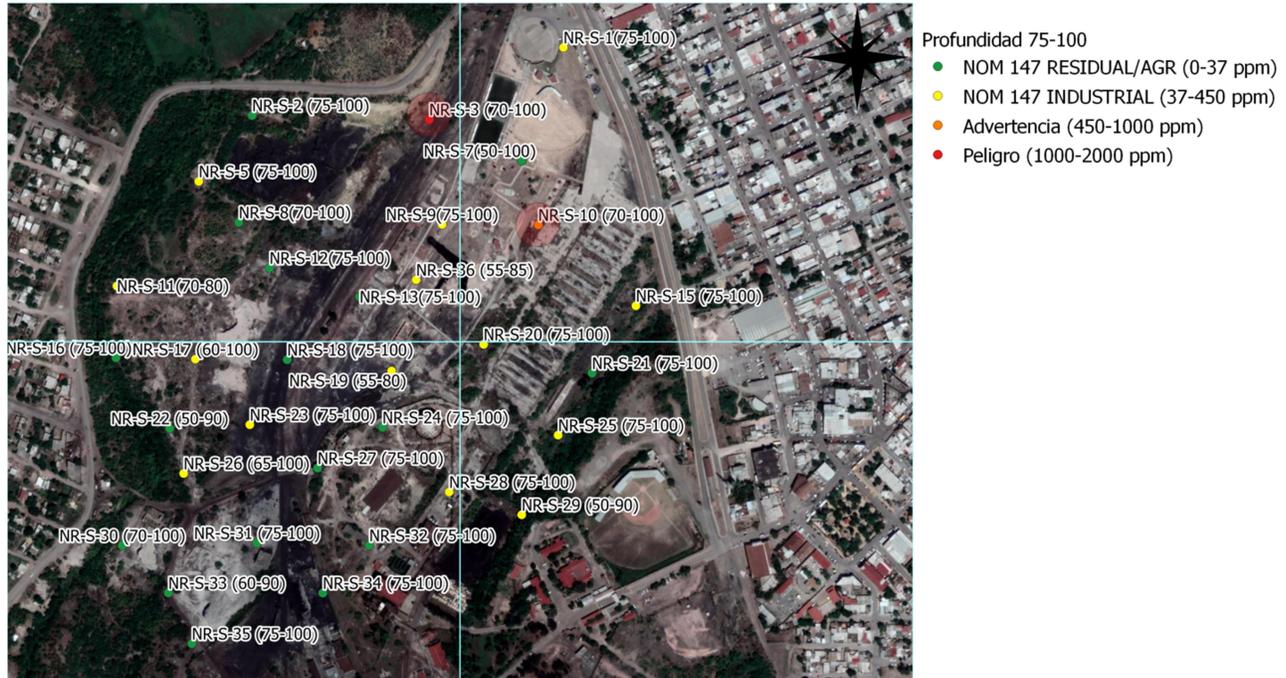


Figura 27. Mapa de distribución de concentraciones de Cd a una profundidad de 5-25 cm



Figura 28. Mapa de distribución de concentraciones de Cd a una profundidad de 25-50 cm

En la figura 28 se puede observar que la zona delimitada por una elipse de color rojo, contiene únicamente a las zanjas 9 y 36 las cuáles tienen concentraciones mayores a las 450 mg·Kg<sup>-1</sup> de Cd, estas zanjas se encuentran en la parte inferior interna del segundo cuadrante de la zona de muestreo, también se puede ver que la zanja 9 tiene una concentración mayor a 1000 mg·Kg<sup>-1</sup> de Cd.



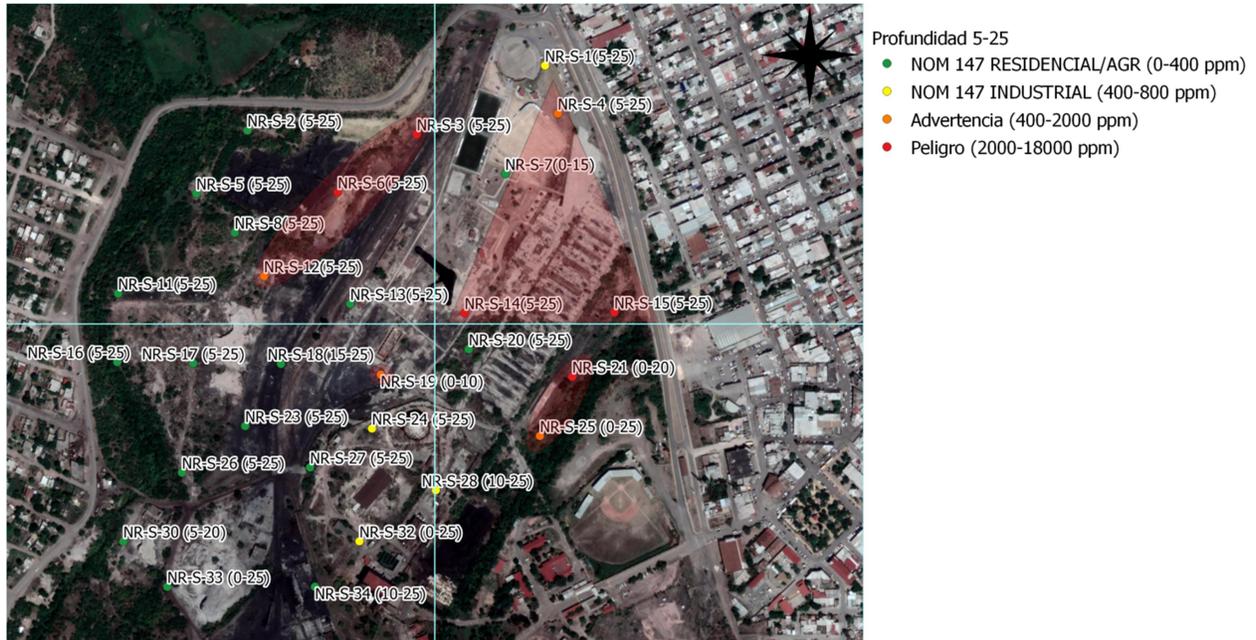
**Figura 29. Mapa de distribución de concentraciones de Cd a una profundidad de 75-100 cm**

En la figura 29 vemos que la localización de las zanjas mayormente contaminadas están en el primer y segundo cuadrante, las concentraciones de ambas zanjas son mayores a 450 mg·Kg<sup>-1</sup> de Cd, sin embargo la zanja que presenta una concentración mayor a 1000 mg·Kg<sup>-1</sup> de Cd es la zanja 3.

De acuerdo con las figuras 27, 28 y 29 se tiene que para este elemento la contaminación se da a diferentes profundidades, desde los 5 a los 100 cm, también se observa que las zanjas que presentan mayor contaminación no coinciden en ninguna de las 3 figuras, a diferencia de lo que pasaba con As, por lo cual se puede decir que la contaminación se encuentra ampliamente distribuida.

Por lo que la zona a remediar para el elemento Cd sería al menos la misma que comprende las zonas marcadas en la figura 25 y 26 para la remediación de As, pero aumentando la extensión a las zanjas delimitadas con rojo para los mapas de Cd, que es una extensión aproximada de 15 hectáreas (QGIS 3.2).

Del mismo modo que para As y Cd a continuación se presentan de las figuras 30-35 algunos mapas que se realizaron a diferentes profundidades para mostrar el comportamiento horizontal y vertical de las concentraciones de Pb.



**Figura 30. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 5-25 cm**

En la figura 30 al igual como ya se había denotado en la figura 22 del mapa de Pb a nivel superficial, la localización de las zanjas mayormente contaminadas no se encuentra delimitada a solo uno o dos cuadrantes, está distribuida en los cuatro cuadrantes de la zona de estudio, las zanjas que se encuentran resaltadas por áreas de color rojo, son las que presentan concentraciones mayores a  $800 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$  de Pb, que es la máxima concentración permitida para suelos de uso industrial según la NOM-147. Estas zanjas son las siguientes: primer cuadrante: 4, 14,15; segundo cuadrante: 3, 6,12; tercer cuadrante: 19; cuarto cuadrante: 21, 25. Las zanjas con concentraciones mayores a  $2000 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$  de Pb son las zanjas 14, 15, 3, 6, 21.

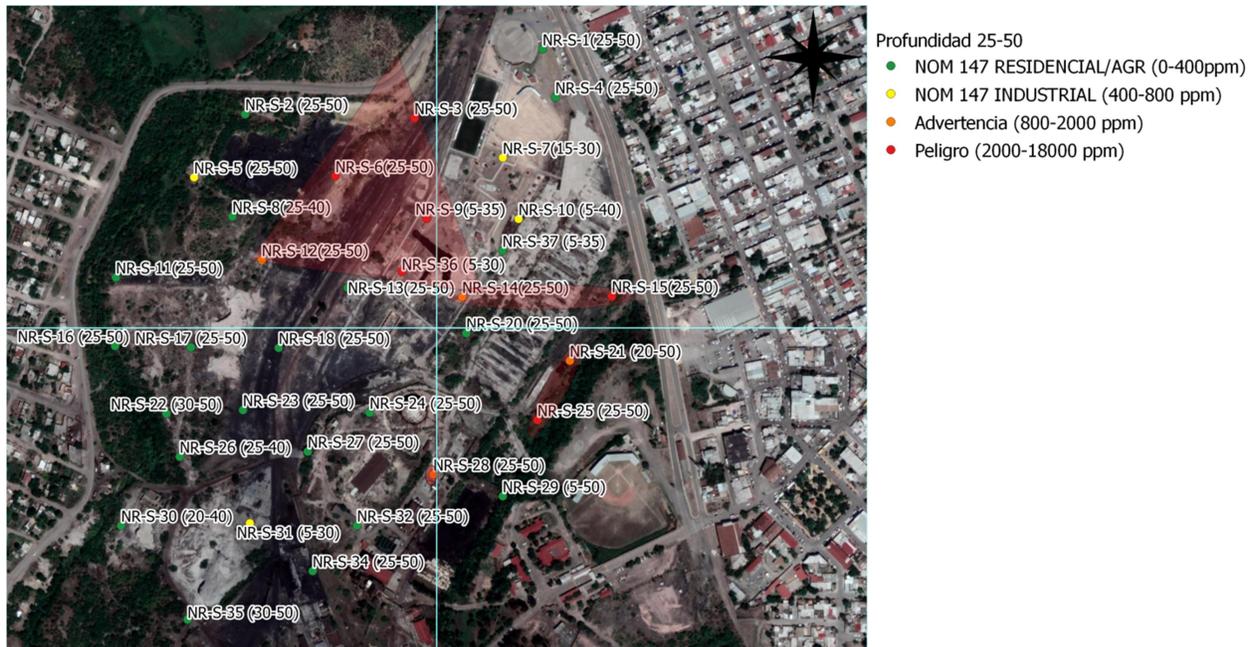


Figura 31. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 25-50 cm

En la figura 31 se puede observar que al igual que en la figura 30, las zanjas mayormente contaminadas se encuentran resaltadas por superficies de color rojo y distribuidas en los 4 cuadrantes, las zanjas que presentan valores que sobrepasan las  $2000 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de Pb son las zanjas: 15, 6, 9, 36 y 25, de acuerdo con esto y lo observado en la figura 29, las zanjas 15 y 6 vuelven a presentar concentraciones de Pb mayores a  $2000 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ .

En la figura 32 se observa nuevamente que las zanjas 3, 9 y 15 tienen concentraciones que exceden  $2000 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de Pb, aunque en estos puntos se vuelven a presentar concentraciones de este nivel, no son los únicos, también las zanjas 10, 37, 19 y 35 presentan valores mayores de  $2000 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ . A diferencia de los mapas anteriores de Pb, en los que se observaba que a pesar de localizarse los puntos contaminados en los cuatro cuadrantes, se encontraban en las partes internas de estos, aquí se ve que hay puntos con concentraciones mayores a  $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  pero menores a  $2000 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de Pb en la parte externa de los cuadrantes, las zanjas que tienen este comportamiento son las zanjas 30 y 5.

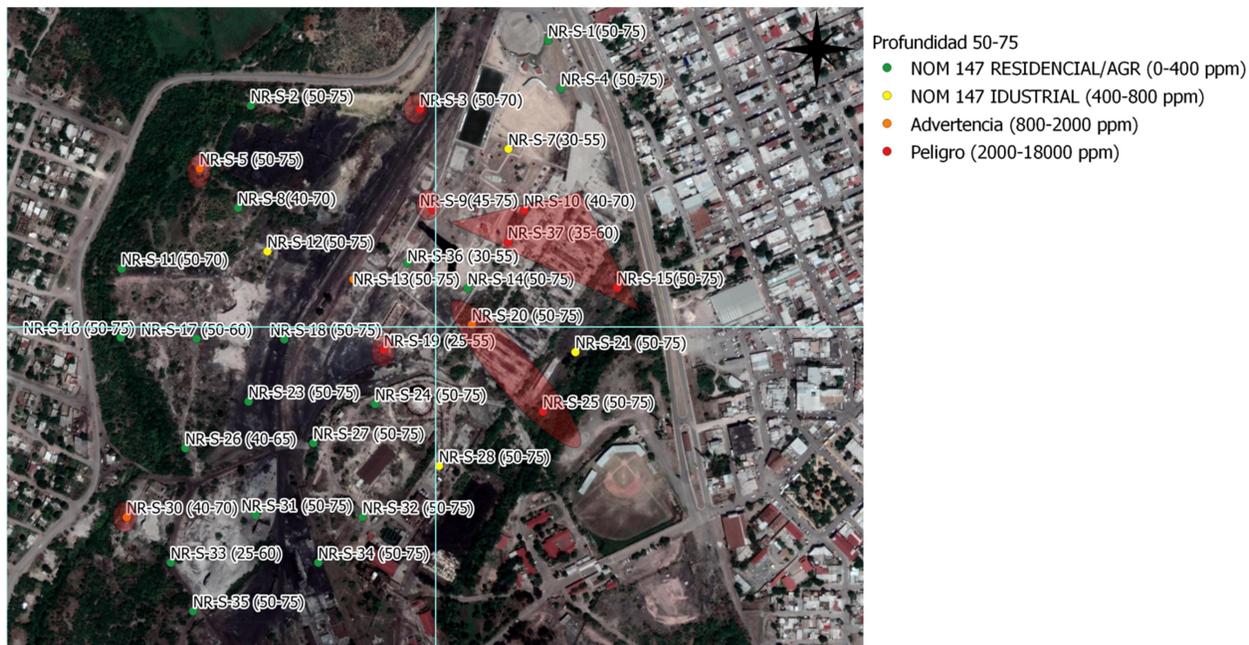


Figura 32. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 50-75 cm



Figura 33. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 75-100 cm

En la figura 33 observamos que nuevamente las zanjas 3, 9, 10, 19 y 25, presentan valores que sobrepasan  $2000 \text{ mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de Pb, la distribución de estas zanjas se encuentra en los 4 cuadrantes.



**Figura 34. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 100-125 cm**

En la figura 34 observamos que las zanjas mayormente contaminadas y que sobrepasan 800  $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de Pb se encuentran en el segundo y cuarto cuadrante, de acuerdo con los mapas anteriores de Pb se tiene que la zanja 25 nuevamente tiene una concentración mayor de 2000  $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  de Pb.

En la figura 35 observamos que la distribución de las zanjas con concentraciones por arriba de 800  $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$  están en el segundo, tercer y cuarto cuadrante de la zona de muestreo, se ve una reincidencia de las zanjas 9 y 25 con concentraciones mayores a 2000  $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ , aunque también esta concentración la presentan las zanjas 8 y 23.



**Figura 35. Mapa de distribución de concentraciones de Pb a una profundidad de 125-150 cm**

Con base en los resultados distribuidos en tablas, gráficas y mapas del comportamiento vertical de Pb tenemos que este elemento es el que se encuentra distribuido por la mayor parte de la zona de muestreo, de acuerdo con el comportamiento vertical de este elemento también se puede observar que la distribución de la contaminación es desde 0-150 cm de profundidad a diferencia de lo que pasa para As y Cd.

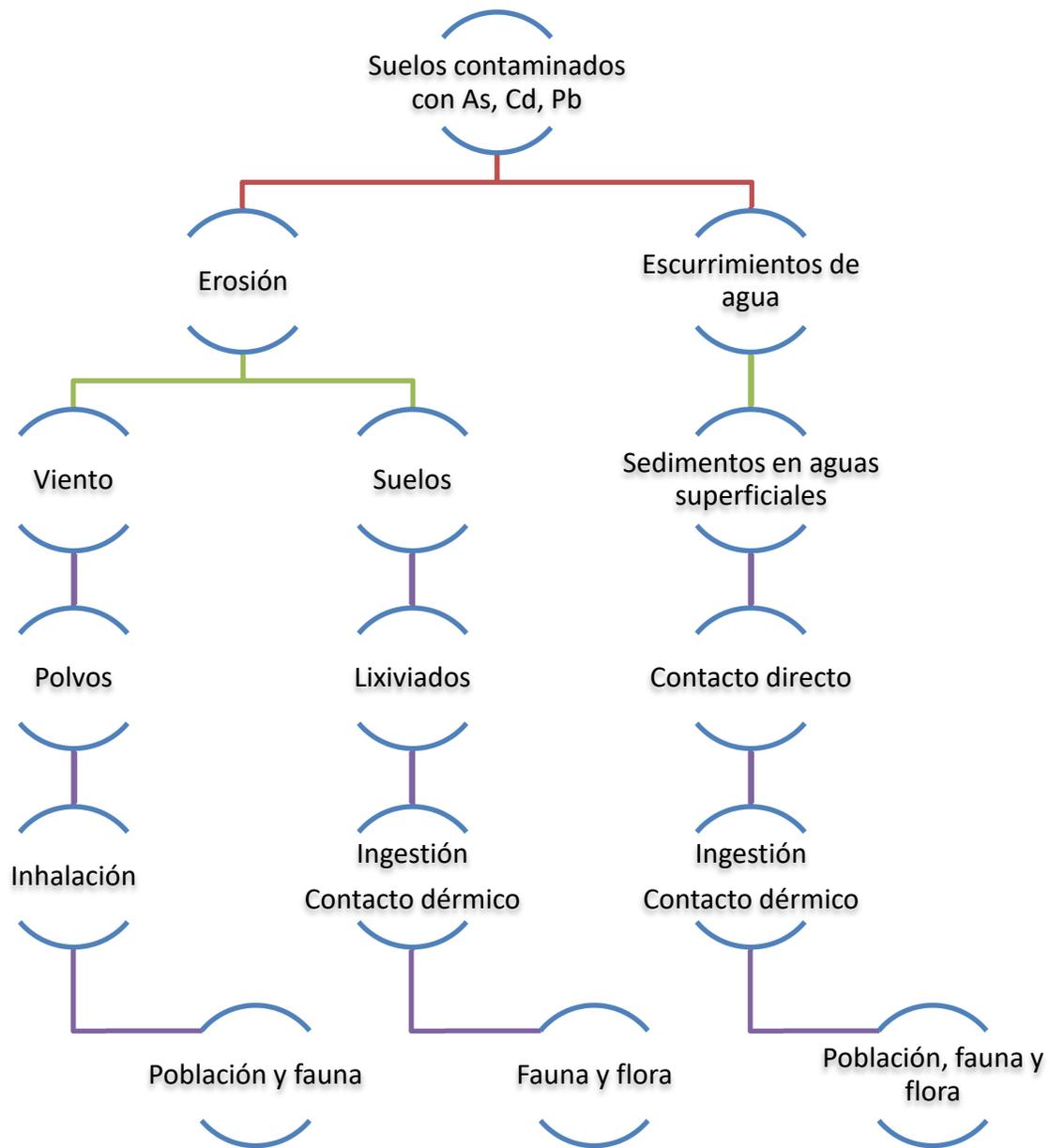
Por lo que la zona a remediar para el elemento Pb sería la comprendida para As y Cd y aumentando la extensión hasta aproximadamente 30 hectáreas (QGIS 3.2).

Haciendo un seguimiento de los resultados obtenidos para los elementos normados (As, Cd y Pb), plasmados en tablas, al comportamiento vertical que estos presentan descrito en gráficos mapas de la zona de muestreo y en la información de la zona de estudio provista en el marco teórico se planteará la propuesta de remediación de acuerdo con el modelo conceptual descrito en la NOM-147.

En la tabla 56 se muestra la información que se utilizará para poder realizar el modelo conceptual (figura 36) y proyectar a futuro una propuesta de remediación de acuerdo con las necesidades y características de la zona de estudio.

**Tabla 56. Información para la caracterización de sitio y elaboración del modelo conceptual**

	Área temática	Información
Identificación de los contaminantes esenciales	Origen de la contaminación y ubicación espacial y determinación de coordenadas geoestadísticas	En el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila se realizó un muestreo de tipo exploratorio para llevar a cabo un análisis de FPXRF, el cual dio como resultado que los elementos que presentan concentraciones superiores a los niveles permitidos por la NOM-147-SEMARNAT para suelos de uso industrial son: As, Cd y Pb, otro elemento que a pesar de no encontrarse normado y que también presento concentraciones muy altas fue Sb, este elemento debe de considerarse también como EPT de acuerdo con la OMS. Las coordenadas geoestadísticas para la ubicación de los puntos de muestreo se encuentran en la tabla 15
Características físicas	Topografía	La extensión del municipio está constituida principalmente por una planicie con pequeñas elevaciones de tierra de poca altura.
	Edafología	Suelos dominantes, calcisol, chernozem y vertisol.
	Hidrología superficial	Atraviesa el municipio de noreste a suroeste el río Álamos, que proviene del sureste de Zaragoza. Por el sureste pasa, en su límite, un río que al prolongarse en Sabinas forma el río del mismo nombre
Características Climáticas	Patrones de viento	Información no reportada
	Velocidad de viento	Variable 15-25 Km/h
	Precipitación pluvial	400-600 mm
Características biológicas	Flora silvestre	Huizache, mezquite, chaparro, álamo, sabino, nogal, nopal, lechuguilla, cenizo, guajillo, zacate de varias clases, como búfalo, barreguero, tabasco, arrastrado.
	Fauna silvestre	Zopilote, ceniztle, gorrión, codorniz, pato, guajolote, lechuga, cardenal, carpintero, paloma, cuervo, tuza, murciélago, liebre, rata, conejo, ardilla, coyote, zorrillo, mojarra, carpa, robalo, bagre, piltontle.
Características socioeconómicas	Población	43,232 habitantes (INEGI, 2010)
	Mortalidad	346 (INEGI, 2017)
	Uso previo y actual del suelo	Previo: Procesamiento de Zn Actual: planta abandonada



**Figura 36. Modelo conceptual para la representación del riesgo potencial de exposición a organismos vivos presentes en la zona de estudio**

La contaminación por elementos potencialmente tóxicos causada por actividad minera presenta varias características como: altas concentraciones, persistencia y complejidad (You citado de Giannis et al., 2009; Adriano et al., 2004), bioacumulación potencial en organismos vivos y falta

de capacidad de biodegradación (González citado de Duruibe et al., 2007) planteando un riesgo significativo para la salud humana y el ambiente. Mientras el suelo es la fuente principal de elementos biológicamente activos que soportan la vida de plantas y animales, y puede ser la fuente de elementos potencialmente tóxicos dependiendo de su naturaleza geológica (González citado de Sharma, 2005) el agua sirve como un vehículo para la disolución y transporte de metales (González, citado de Schonoor, 1996). Mientras tanto la atmósfera también puede transportar elementos potencialmente tóxicos como materia particulada, estos pueden ser depositados a grandes distancias de la fuente inicial (González citado de DeVries et al. 2013).

Cuando se selecciona un método de remediación es importante considerar los costos de la tecnología, resultados a corto o largo plazo y generación de contaminación secundaria (Wang citado de Dermont et al., 2008; Tang et al., 2016; Boente et al., 2018).

Como se había mencionado anteriormente la biorremediación y la fitorremediación son técnicas más adecuadas para suelos baja o moderadamente contaminados, que presentan resultados a largo plazo. Por otro lado, la electrorremediación tiene altos costos de aplicación. Es necesario considerar las desventajas anteriores para poder proyectar una propuesta de remediación para estudios posteriores, tomando en cuenta la elaboración del modelo conceptual de la figura 36 así como la información planteada en la tabla 56.

De acuerdo con la información obtenida del análisis de FPXRF y el modelo conceptual para la representación del riesgo potencial de exposición a organismos vivos presentes en la zona de estudio, se tiene que estos suelos presentan riesgo a la flora, fauna y población y que las concentraciones sobrepasan los límites establecidos por la norma, así como la extensión de suelo impactado es alta, adquiriendo un valor aproximado de 30 hectáreas. Considerando lo anterior, se proyecta a posterioridad como técnica de posible remediación el lavado de suelos. Esta es una técnica más flexible que otras debido al amplio rango de concentraciones que ofrece para diferentes EPTs así como la reducción del volumen de residuos con eficiencias de remoción altas (You citado de Zupanc et al., 2014; Kwon et al., 2017; Yoo et al., 2018).

De acuerdo con un estudio realizado a escala-piloto en Hunan Province, China (You et al., 2019), se tiene que una combinación entre un tamizado y lavado de suelos proporciona resultados favorables para la remediación de As, Cd, Pb y Zn.

El estudio fue llevado primeramente a escala de laboratorio para obtener las condiciones óptimas en cuanto a pH, temperatura y proporción líquido/suelo. Las cuales son pH: 2, T: 30°C y proporción líquido suelo 10:1. Posteriormente, para evaluar la viabilidad del lavado de suelo, la remoción de elementos fue monitoreada durante una demostración de campo, en la cual se decidió realizar 3 extracciones sucesivas de 30 minutos con una concentración de ramnolípidos<sup>1</sup> que fue utilizada como eluyente, el pH=2 de la solución de lavado fue regulado con HCl y NaOH para incrementar la concentración de los elementos removidos de suelos, las condiciones de T y proporción fueron las mencionadas como óptimas. Los resultados obtenidos fueron: remociones efectivas de 37.1-51.1% As, 44.3-78.1% Cd, 21.2-64.3% Pb y 29.2-59.4% Zn. Lo anterior muestra un incremento de 11.2-36.2% con respecto al primer ciclo de lavado. También es importante mencionar que el rendimiento de extracción aumento conforme el tamaño de partícula aumenta indicando que los elementos estaban unidos débilmente a partículas grandes. Finalmente, para evitar una contaminación secundaria los residuos fueron tratados, en el caso de la solución de lavado se realizó un procedimiento de floculación/sedimentación y adsorción.

Como se puede ver el desarrollo de nuevos procesos y equipos para la remediación de suelos sigue siendo un tema de gran interés, para lograr una eficiencia óptima en la remoción de EPTs es de gran importancia seleccionar un agente de lavado adecuado considerando todas las características que este involucra para la zona a remediación. También es importante considerar que el lavado tiene que ser en varios ciclos o etapas ya que no es suficiente un lavado de suelos en solo un paso (Qiao citado de Elliott and Brown, 1989; Steele and Pichtel, 1998).

---

<sup>1</sup> Ramnolípido: Biotensoactivo aniónico de estructura simple de tipo glicolípido formado por mono y disacáridos de ramnosa ligados por un enlace glicosídico a una molécula de  $\beta$ -hidroxidecanoil- $\beta$ -hidroxidecanoato. Presenta ventajas debido a su compatibilidad con el medio ambiente, baja toxicidad y biodegradabilidad. (Jiménez citado de Nitschke *et al.* 2005b, Gautam y Tiagy 2006, Mukherjee *et al.* 2006)

## Capítulo 4. Conclusiones

- Se realizó la cuantificación de elementos potencialmente tóxicos As, Cd, Cr, Pb, Sb, y Ni además de Cu, Mn, Zn, Fe por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X de campo portable en suelos superficiales y sub-superficiales.
- Del análisis cualitativo y cuantitativo ofrecido por FPXRF se obtuvo que los elementos que se presentan en concentraciones superiores a los niveles permitidos para suelos de uso residencial/ agrícola e industrial fueron el As, el Cd y el Pb, las concentraciones máximas fueron  $10163 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $1845 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  y  $16222 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  respectivamente. Otros elementos de interés que no se encuentran normados por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 fueron Sb y Zn de los cuales se obtuvieron concentraciones máximas de  $1254 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  y 25% m/m respectivamente.
- A partir del comportamiento vertical analizado en gráficos se delimito la profundidad de la contaminación hasta 100 cm, también con ayuda del Software QGIS versión 3.2 se delimitó la extensión contaminada por As, Cd y Pb, la cual abarca una superficie aproximada de 30 hectáreas.
- Con base en la caracterización de la zona de estudio y la identificación y cuantificación de los EPTs se realizó un modelo conceptual el cual propone las posibles rutas que pueden seguir los elementos que sobrepasan los valores límite para suelos de uso residencial/agrícola por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (As, Cd y Pb) hasta los organismos receptores, las cuales son erosión y escurrimientos de agua que pueden afectar a población, flora y fauna por medio de inhalación, contacto dérmico o ingestión. Por lo que, en primera instancia se debe evitar la dispersión de los suelos y el contacto con ellos.
- La técnica de FPXRF se propone como método alternativo cuando se realizan análisis de suelos provenientes de muestreos de tipo exploratorio, entre las ventajas que ofrece esta técnica son costos ya que se reducen hasta una tercera parte en comparación con un análisis realizado por ICP-OES. Otra ventaja es el tiempo invertido en el análisis ya que la preparación de muestra es menor y no se requiere una digestión, por lo que el tiempo de análisis se reduce a la mitad y, por último, no se generan residuos ácidos por lo cual se considera como una técnica de análisis sostenible.

- Un prospecto a futuro de remediación de acuerdo con la determinación de elementos potencialmente tóxicos en suelos superficiales y sub-superficiales, y el modelo conceptual propuesto, podría ser un lavado de suelos combinado con un tamizado, esto se plantea como un proyecto a posterioridad con base en ciertas similitudes del suelo analizado y un estudio a escala piloto en Hunan Province, China, con el cual los resultados son favorables para la remediación de As, Cd, Pb y Zn considerando las siguientes condiciones: pH= 2, T=30°C, proporción líquido suelo 10:1 y realización de 3 extracciones sucesivas de 30 minutos con una concentración de 0.5% ramnolípidos que fue utilizada como eluyente, los residuos secundarios se trataron por floculación/sedimentación y adsorción.

## Referencias

1. Albella, J.M.; Cintas, A.M.; Miranda, T. y Serratos, J.M. (1993). *Introducción a la Ciencia de Materiales: Técnicas de preparación y caracterización*. Textos Universitarios. Madrid.
2. Alvaréz, Isela, Sosa, Fabiola, Vazquez, Jorge. (2018) *Spatial distribution, mobility and bioavailability of arsenic, lead, copper and zinc in low polluted forest ecosystem in North-western Mexico*. *Chemosphere*. 210. pp. 320-333. <https://doi-org.10.1016/j.chemosphere.2018.07.004>
3. Artigas, Duran. (2004). *Catedras de Edafología*. UDELAR. Uruguay.
4. Bravo, Rodrigo. (2015). *Fitorremediación de suelos contaminados. Análisis del proceso de extracción empleando funciones de distribución*. UNAM
5. Calvero. (2006). Imagen de dominio publico
6. Certini, Giacomo y Ugolini, Fiorenzo C. (2013). An updated, expanded, universal definition of soil. *Geoderma*. 192. 378-379.
7. Chang, A. C., Pan, G. X., Page, A. L., & Asano, T. (2002). *Developing human Healthrelated chemical guidelines for reclaimed water and sewage sludge applications in agriculture*. Division of Environmental Health, World Health Organization
8. Cornelis, Klein. *Manual de Mineralogía*. Cuarta edición. 2001. Pag.147
9. De la Rosa David, Teutli Maura y Ramírez Martha. (2007). *Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo*. Contaminación ambiental. 23. (3). pp. 129-138.
10. EPA METHOD 6200. *Field portable X-Ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment*.
11. Gobierno de la ciudad de Alta Gracia (2017). *Educación ambiental-El Suelo*. Figura. Recuperado de <http://www.madrimsd.org/blogs/universo/2008/10/02/102439>
12. González-Acevedo, Z.I.,García-Zarate, M.A., Núñez-Zarco, E.A. y Anda-Martín, B.I. (2018). *Heavy metal sources and anthropogenic enrichment in the environment around the Cerro Prieto Geothermal Field, México*. *Geothermics*. 72. 170-181.
13. González, Nerea. (2017). *Determinación de metales en tabaco y cenizas mediante técnicas espectroscópicas*. Universidad de Burgos.
14. Honorato Pinto, Ricardo. (2000). *Manual de Edafología*. 4ta. Alfa Omega. México.
15. Huang, Ting. C. *X-Ray Fluorescence. X-Ray Emission Techniques*. 338-348.
16. INEGI. (2007). *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II, escala 1: 250 000 (Continuo Nacional)*. México.

17. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2006). *Metales en agua por plasma acoplado por inducción*.
18. IUSS, Grupo de Trabajo WRB. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103*. FAO. Roma.
19. Jiménez, Donahiu, et. al. (2010). *Propiedades , aplicaciones y producción de biotensoactivos: una revisión*. 26.
20. Juárez M. Cerdán M. & Sánchez A. (2019). *Hierro en el sistema suelo-planta*. Universidad Alicante.
21. Juan Jose Ibañez (2008). *El perfil de los suelos*. Figura. Recuperado de <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/10/02/102439>
22. Limón Genoveva. (2017). *El meridiano de los suelos*. Figura. Recuperado de <http://elmeridianodelossuelos.blogspot.com/2017/02/que-se-acerca-del-suelo.html>
23. López Hernández, L., López Santiago, N. R., & Gutiérrez Ruiz , M. (2018). Análisis estadístico de un método semicuantitativo: fluorescencia portátil de rayos X. Memorias in extenso del XXXI Congreso Nacional de Química Analítica, 1(1), 580-585.
24. López Lucero. (2018). *Caracterización de escorias de aluminio para su recuperación a través de espectroscopía de emisión atómica con plasma por acoplamiento inductivo (ICP-OES) y fluorescencia de rayos X*. UNAM.
25. López Linda. (2013). *Residuos mineros y la generación de drenaje ácido: Pruebas de laboratorio y su aplicación en el diseño, construcción y operación de depósitos*. UNAM.
26. López, Rúben & López, Vizcaíno. (2013). *Remediación electrocinética de suelos de baja permeabilidad contaminados con compuestos orgánicos hidrófobos*. UCLM.
27. López-Santiago, N. R., López Hernández, L. K., Román Franco, J. L., Roldán Armas, R., & Gutiérrez Ruiz, M. (2018). Validación de la determinación multielemental en suelo por fluorescencia portátil de rayos X. Memorias in extenso del XXXI Congreso Nacional de Química Analítica, 1(1), 575-579.
28. Martínez, Martín. (2019). *Cristalografía*. Figura. Recuperado de <https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/>
29. NMX-EC-17025-IMNC-2018
30. NORMA MEXICANA NMX-AA-132-SCFI-2016. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.

31. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
32. NORMA Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009. Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
33. Piorek, Stanislaw. (1994). *Principles and applications of man-portable X-ray fluorescence spectrometry. Trends in analytical chemistry.* 13 (7). 281-286.
34. Porta, Jaume, López, Martha & Poch, Rosa. (2014). *Edafología. Uso y protección de Suelos.* 3ra. Ediciones Mundi Pesa.
35. Qiao Jiangbo, et al. (2017). *EDTA-assisted leaching of Pb and Cd from contaminated soil.* Chemosphere. 167. 422-428.
36. R. Conklin, Alfred. (2005). *Introduction to soil chemistry: analysis and instrumentation.* Jonh Wiley & Sons. United States of America.
37. Rui Dahu, et al. (2019). *Remediation of Cd- and Pb- contaminated clay soils through combined freeze-thaw and soil washing.* Journal of Hazardous Materials. 369. 87–95.
38. SEMARNAT. (2012). *Suelos.* Recuperado de [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_12/pdf/Cap3\\_suelos.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf)
39. Sparks, Donald. L. (2003). *Environmental Soil Chemistry.* 2da. Academic Press. United States of America.
40. Universidad Politécnica de Cartagena. Consultado 03 de marzo de 2019. Recuperado de: [https://www.upct.es/~minaees/difraccion\\_rayosx.pdf](https://www.upct.es/~minaees/difraccion_rayosx.pdf)
41. Van Bokhoven, Jeroen A. y Lamberti, Carlo. (2015) *X-ray absorption and X-ray emission spectroscopy : theory and applications.* Wiley & Sons. United Kingdom.
42. Vivoda, V., (2018). How do national mining industry associations compare on sustainable development? *The Extractive Industries and Society.* <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.06.002>
43. Wang An-Ting, Wang Qi, Li Ju, Yuan Guo-Li. (2018). *Geo-statistical and multivariate analyses of potentially toxic elements' distribution in the soil of Hainan Island (China): A comparision between the topsoil and subsoil at a regional scale.* Journal of Geochemical Exploration. 197. 48-59
44. Wang Lu, et al. (2019). *A comprehensive mitigation strategy for heavy metal contamination of farmland around mining areas-Screening of low accumulated cultivars, soil remediation and risk assessment.* Environmental Pollution. 245. 820-828

45. You Li, Xiaoyong Liao, Wunan Li. (2019). *Combined sieving and washing of multi-metal-contaminated soils using remediation equipment: A pilot-scale demonstration*. *Journal of Cleaner Production*. 212. 81-89.

## Anexo I. Especificaciones del Analizador de FRX Olympus Delta Professional

Dimensiones	260 x 240 x 90 mm
Fuente de excitación	Tubos de rayos X con ánodos de plata (Ag), rodio (Rh), oro (Au) o tántalo (Ta) [según aplicación] y de 4 W de potencia.
Detector	Detector de deriva de silicio.
Rango de temperatura ambiental	De -10 °C a 50 °C
Rango analítico	Aleaciones y minerales: magnesio (Mg) y elementos superiores hasta Rodio/Plata; y aluminio (Al) hasta elementos superiores como tántalo/ oro. Suelos: fósforo y superiores.
Proceso electrónico	CPU (siglas del inglés central processing unit) de 530 MHz de frecuencia con FPU (siglas del inglés floating point unit) de 128 MB de RAM; procesador digital de pulso (DPP) de propiedad legal Olympus.
Sistema electrónico inteligente	Barómetro para la corrección de la presión atmosférica en mediciones de elementos ligeros.
Alimentación	Batería de Li-ion recargable; cambio de batería en modo «Intercambio en caliente» para mantener el analizador encendido
Pantalla	De 32 bits de resolución gráfica QVGA, a color, táctil y con retroiluminación transmisiva «Blanview»; 57 mm x 73 mm de dimensión.
Almacenamiento de datos	Tarjeta de memoria MicroSD 1 GB (almacena hasta 75 000 lecturas)
Transferencia de datos	Cable USB

## Anexo II. Pruebas iniciales de desempeño (PIDs)

Parámetros de validación de la Determinación de concentraciones por FP-RX matrices sólidas

Periodo de realización: 180528:180601

Equipo: Analizador portátil de fluorescencia de rayos X Delta Premium DP-6000

Materiales de referencia certificados (MRC): Montana Soil NIST2710a, Montana Soil

NIST2711a, DO99540

Elemento	MRC	Concentración de referencia (mg/Kg)	Semiquantitativo				Cualitativo
			Media	Unidades	DER	Recobro (%)	
As	NIST2711a	67200.00	59400.00	mg/Kg	0.66	88.45	100
Al	NIST2710a	1540.00	1528.50	mg/Kg	0.19	99.25	100
Ca	NIST2711a	24200.00	25052.61	mg/Kg	0.22	103.52	100
Cd	NIST2711a	54.10	58.83	mg/Kg	3.68	108.75	100
Cr	NIST2711a	52.30	54.28	mg/Kg	2.07	103.78	100
Cu	NIST2710a	3420.00	3380.56	mg/Kg	0.31	98.85	100
Mn	NIST2710a	2140.00	2115.78	mg/Kg	0.24	98.87	100
Pb	NIST2710a	5520.00	5458.17	mg/Kg	0.24	98.88	100
Se	D099-540	206.00	237.10	mg/Kg	0.45	115.10	100
Sb	NIST2710a	52.50	50.06	mg/Kg	6.86	95.35	100
V	NIST2711a	80.70	88.19	mg/Kg	0.70	109.29	100
Zn	NIST2710a	4180.00	4208.11	mg/Kg	0.31	100.67	100

## **Anexo III. Historia y fundamentos sobre FPXRF**

### **Historia**

Uno de los grandes acontecimientos de la historia en el ámbito científico fue el descubrimiento de los rayos X en 1895, debido a la vocación, dedicación, perseverancia y esfuerzo del físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen, ganador del Premio Nobel de Física en 1901. Cuando éste se encontraba en su laboratorio de la Universidad de Würzburg en Alemania realizando una serie de experimentos relacionados con las características de los rayos catódicos se percató de la fluorescencia de algunos cristales de  $\text{BaPt}(\text{CN})_4$  que se encontraban encima de una mesa a una distancia cercana del tubo. Desde ese momento se dedicó a realizar varios experimentos con el propósito de saber qué era lo que producía la fluorescencia de esos cristales, al inicio alejó los cristales del tubo pero la fluorescencia persistía, después colocó varios objetos entre el tubo de rayos catódicos y la pantalla, observando que la fluorescencia atravesaba el objeto aunque la fluorescencia disminuía. También intentó con diferentes metales, observando que la intensidad de la fluorescencia dependía del metal utilizado y que metales como el plomo y el platino absorbían la radiación impidiendo que pasara. Después de estudiar las propiedades físicas de la radiación misteriosa decidió llamarla radiación X o rayos X, debido a que la X representa una incógnita matemáticamente. Los beneficios de su descubrimiento en términos de diagnóstico y tratamiento médico, así como en la investigación molecular y estructuras atómicas son incontables (Van Bokhoven, 2015).

### **Fundamento de fluorescencia de rayos X**

Un filamento calentado eléctricamente, por lo general tungsteno emite electrones los cuales son acelerados por una diferencia alta en el potencial (2-50 KV) y permite golpear el objetivo de un metal o un ánodo el cual es enfriado por agua. El ánodo emite un espectro continuo de radiación X “blanca”, pero sobrepuesto en este, existen picos afilados e intensos de rayos X ( $K_\alpha$ ,  $K_\beta$ ). Las frecuencias de las líneas  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  son características del ánodo del metal. Los objetivos metálicos más comúnmente usados en estudios cristalográficos de rayos X son cobre y molibdeno, los cuales tienen líneas  $K_\alpha$  a 154.18 pm y 71.01 pm respectivamente. Estas líneas se producen debido a que el bombardeo de electrones eyecta a los electrones de la capa interna K ( $n=1$ ), y esto a su vez crea vacancias las cuales son llenadas por electrones descendientes de las capas superiores. El descenso de energía aparece como radiación, los electrones descendiendo de la capa L ( $n=2$ ) dan las líneas  $K_\alpha$  y los electrones descendientes de la capa M ( $n=3$ ) dan las líneas  $K_\beta$ . Conforme el número atómico del elemento objetivo incrementa las líneas cambian a una longitud de onda más pequeña.

## Ley de Bragg

Un rayo difractado puede definirse como un rayo compuesto de un gran número de rayos dispersados que se refuerzan mutuamente. La difracción es, por tanto, esencialmente un fenómeno de dispersión. Los átomos dispersan la radiación incidente en todas direcciones, y en algunas direcciones los rayos dispersados estarán completamente en fase y por tanto se refuerzan mutuamente para formar rayos difractados.

Los rayos dispersados estarán completamente en fase si esa diferencia de fase es igual a un número entero  $n$  de longitudes de onda:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Esta relación se conoce como Ley de Bragg y establece la condición esencial que debe cumplirse para que ocurra la difracción;  $n$  se denomina orden de difracción y debe ser un  $n^\circ$  entero consistente con  $\sin \theta$  menor o igual que 1. Aunque físicamente no es un proceso de reflexión los términos planos de reflexión y rayo reflejado se usan con frecuencia para referirse a los planos de difracción o rayos difractados respectivamente (UPCT).

En la siguiente figura se observa que cuando los rayos X de longitud de onda  $\lambda$  inciden sobre dos planos de átomos paralelos como en la figura 37, y son difractados en un ángulo  $\theta$ , las ondas difractadas producirán intensidad máxima en un detector si la diferencia entre las trayectorias de los rayos es un número entero de veces la longitud de onda de los rayos X empleados,  $n\lambda$ , donde  $n$  es un número entero. La dirección en la que sale el haz difractado forma también un ángulo  $\theta$  con la superficie de la familia de planos que difractan, es decir, un ángulo  $2\theta$  con la dirección de incidencia del haz de rayos X. Además, la dirección del haz incidente y la dirección del haz difractado están contenidas en un plano que es perpendicular a la familia de planos que difractan (Martínez, 2019).

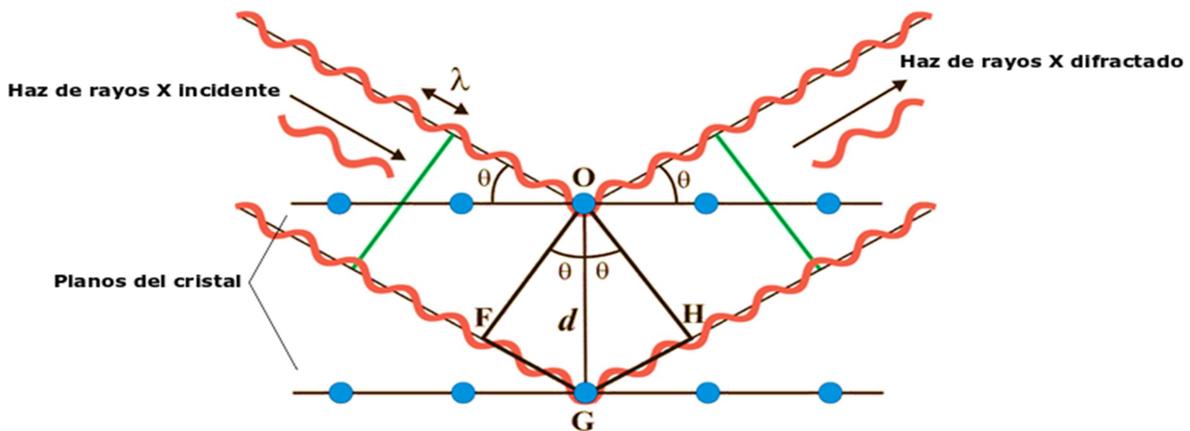


Figura 37. Difracción de los rayos X por los planos de un cristal (Martínez, 2019)

#### **Anexo IV. Modos de análisis de FPXRF**

i) Modo suelo

Este es el primer modo que se escogió para realizar el análisis elemental de las muestras, por lo cual todas se analizaron por modo suelo, cuando algunos elementos se encontraron en altas concentraciones (porcentaje mayor a 1.5 %) también se analizaron por modo geoquímico ya que en este modo el intervalo de lectura que se tiene es mayor, por lo cual el resultado es más confiable (Procedimientos internos LABQA).

ii) Modo geoquímico

Este modo se utilizó cuando las muestras presentan un porcentaje mayor a 1.5 % en Zn y Fe debido a que los intervalos de detección por este modo son mayores en comparación con modo suelo (Procedimientos internos LABQA).

## **Anexo V. Cuantificación de elementos por medio de PFXRF**

- i) La obtención de los datos generada por el equipo de PS-FRX se hace a través de un software llamado Innovx, el cual nos genera un archivo de tipo Excel delimitado por comas y el cual nos da todo el análisis realizado por el equipo, desde fecha, hora, modo de análisis, así como el contenido elemental y sus respectivas unidades.
- ii) Habiendo obtenido el archivo delimitado por comas de Excel, se le cambia el nombre a la primer hoja de cálculo a “Datos Crudos”, posteriormente se crea una nueva hoja de cálculo con el nombre de “Selección de datos”, en la cual se colocarán solamente los datos de interés, de las lecturas (Fecha, hora, modo, As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn, Ni, Fe, Unidad) y que también servirán para el llenado de las respectivas bitácoras en la parte de control de calidad, por lo cual se crean dos hojas de cálculo más “QC Suelo” y “QC Geoquímico”, por último se crea la hoja de cálculo (“TD L(del lote Respectivo)) en la cual se realiza una estadística (Promedio, Desviación estándar, Desviación Estándar Relativa) de las 3 repeticiones realizadas, siendo valor de aceptación de la lectura un DER < 15%, si se obtiene un DER mayor se realiza nuevamente el empaquetado de la muestra y se vuelve a analizar.
- iii) Llenado de bitácora, para llenar hojas de control de calidad por modo suelos y modo geoquímico.
- iv) La bitácora de cada lote consta de tres hojas de cálculo, una para llevar el control de las muestras a leer, así como los datos de la calibración del equipo, otra llamada “Verificaciones” en la cual se colocan los datos obtenidos de los controles (Blanco, y materiales de referencia) así como de una muestra y su duplicado, y finalmente la de control de calidad “QC” en la cual se verifica que tanto el blanco utilizado, los materiales de referencia, así como una muestra y su duplicado cumplan con los parámetros indicados que nos dan confiabilidad de los resultados obtenidos de cada lote, esta hoja de control de calidad se copia y se pega después de “Selección de Datos” dependiendo si el control de calidad es en modo suelo o geoquímico.
- v) Resumen de datos obtenidos. El resumen de la parte de tratamiento de Datos consta de colocar los valores obtenidos por modo Suelos, a excepción de los valores que fueron mayores a 1.5 % en Zn y Fe, los cuales se obtuvieron por modo Geoquímico, los resultados obtenidos de Zn y Fe para las muestras correspondientes se

multiplican por 10000 con el fin de transformar los porcentajes en ppm y poder tener datos homogéneos y comparables.

## Anexo VI. Costos FPXRF e ICP-OES de acuerdo con el LABQA, 2017

Área	Concepto	Método/Norma	Precio por muestra
Muestreo y preparación de muestras	Muestreo superficial.	LABQA-PIII-MPM-01 NMX-AA-132-SCFI-2016	\$690
	Plan de muestreo	LABQA-PIII-MPM-01 NMX-AA-132-SCFI-2016	\$2,000
	Preparación de muestras para su análisis: secado, cuarteo, tamizado, molido	LABQA-PIII-MPM-01 NMX-AA-132-SCFI-2016	\$280
Parámetros	Determinación de pH en matrices sólidas (suelo). No incluye preparación.	LABQA-PIII-PH EPA 9045D	\$230
	Determinación de la conductividad en matrices sólidas (suelo)	LABQA	\$230
	Determinación del potencial redox en matrices sólidas (suelo)	LABQA	\$230
Espectroscopia	Extracción de elementos por digestión ácida asistida por microondas. Digestión parcial	LABQA-PIII-DA NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	\$575
	Extracción de elementos por digestión ácida asistida por microondas. Digestión total	EPA 3052	\$1,035
	Extracción de solubles con agua en equilibrio con CO <sub>2</sub>	LABQA-PIII-SA NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	\$230
	Determinación por elemento en ICP-OES. De 1 a 8 elementos.	LABQA-PIII-ICP NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	\$ 280/ elemento-muestra
	Determinación por elemento en ICP-OES. Elementos acreditados de la NOM-147 (As, Ag, Ba, Be, Cd, Ni, Pb, Se, Tl, V)	LABQA-PIII-ICP NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	\$2,300
Parámetros	Determinación de elementos por EP-FRX en matrices sólidas. Incluye preparación de muestra.	LABQA-PIII-FRX-01 EPA6200	\$700

## **Anexo VII. Alcance de la técnica FPXRF en comparación con ICP-OES**

A continuación, se muestra un análisis estadístico de los resultados de fluorescencia de rayos X de campo portable para ver el alcance de esta técnica en comparación con la técnica de espectrometría de emisión óptica por medio de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) con la cual se analizaron 26 muestras de un total de 228 muestras analizadas por medio de FPXRF.

Para poder efectuar la comparación de resultados de la técnica de FPXRF con métodos confirmatorios se realiza un análisis de regresión lineal en el cual se tiene que los valores de:

$$f(ICP) = f(FPXRF)$$

Para la interpretación de  $r$ , se tiene lo siguiente:

1. **Cuando  $r \geq 0.7$**  los datos de FPXRF se consideran datos de nivel de screening.
2. **Cuando  $r \geq 0.9$**  y las estadísticas inferenciales indican los datos de FPXRF y los datos confirmatorios son estadísticamente equivalentes en un nivel de confianza del 99 %.

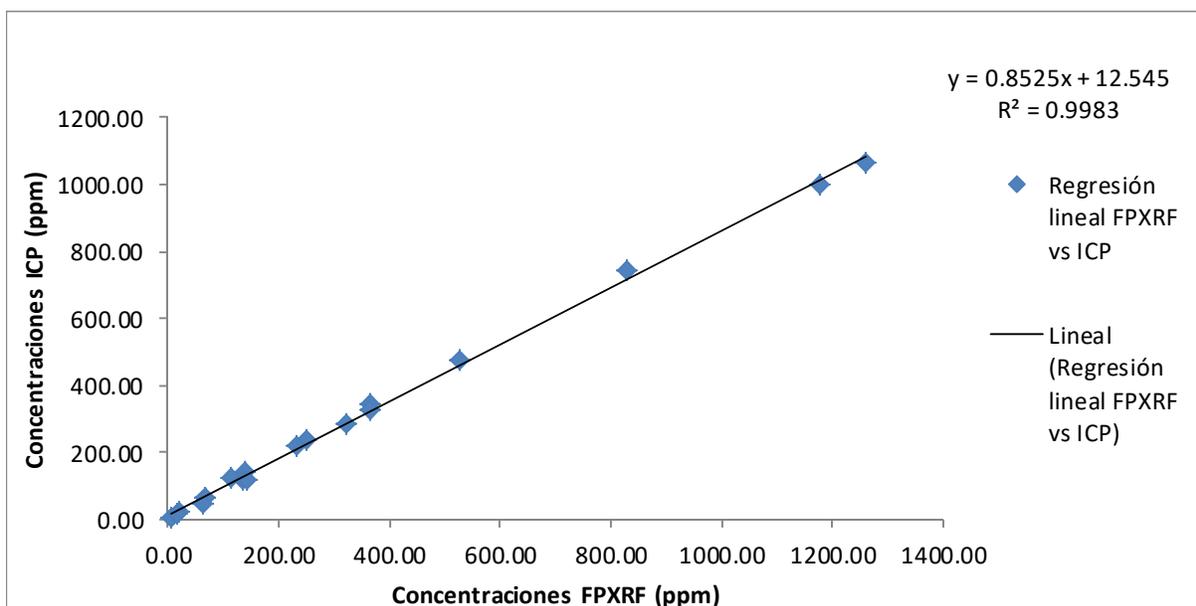
De la interpretación de la pendiente y de la ordenada al origen se tiene que:

1. **Ordenada al origen:** el intervalo de confianza de la ordenada al origen incluye al cero al nivel de confianza seleccionado.
2. **Pendiente:** el intervalo de confianza debe de incluir al uno; por otro lado la pendiente da una aproximación-estimación de la concentración en el intervalo de super estimación o subestimación (cuando la correlación es aceptable, se sugiere  $r \geq 0.9$ ).

Existen 3 posibles resultados para la pendiente:

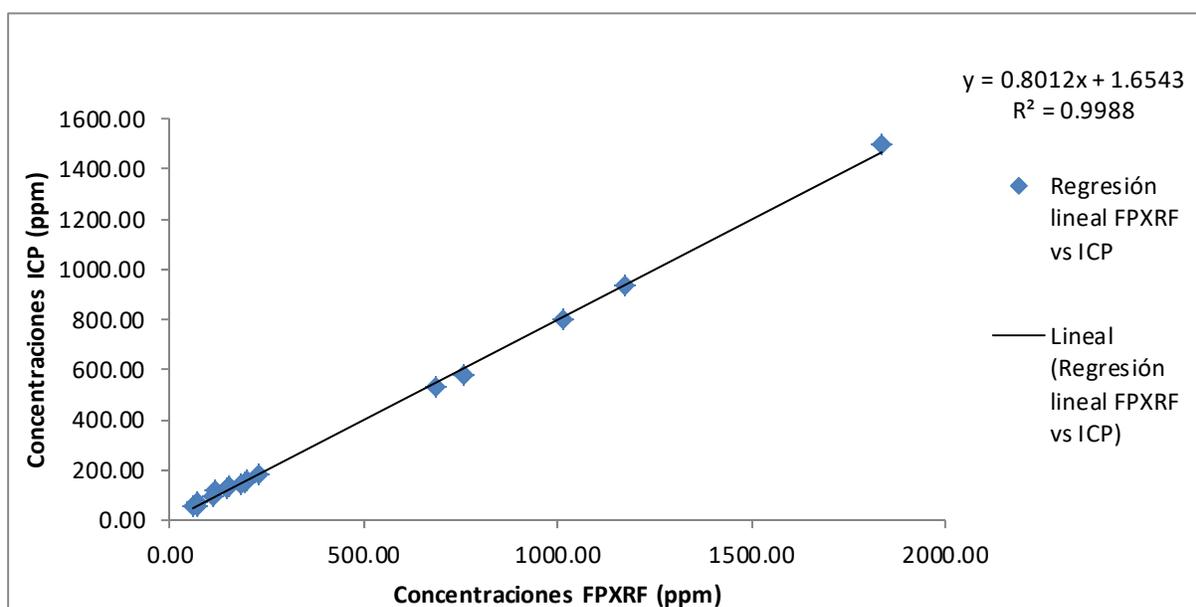
- Cuando  $m < 1$ : este resultado significa que el equipo FPXRF superestima la concentración del elemento respecto a lo medido por ICP (con el método de preparación de muestra empleado para el análisis por ICP)
- Cuando  $m = 1$ : se tiene que las concentraciones que se miden por FPXRF e ICP son similares (con el método de preparación de muestra empleado para el análisis por ICP)
- Cuando  $m > 1$ : el Equipo de FPXRF subestima la concentración del elemento respecto a la medida por ICP (con el método de preparación de muestra empleado para el análisis por ICP)

Gráfico 31. Regresión lineal de concentraciones de ICP vs FPXRF para As



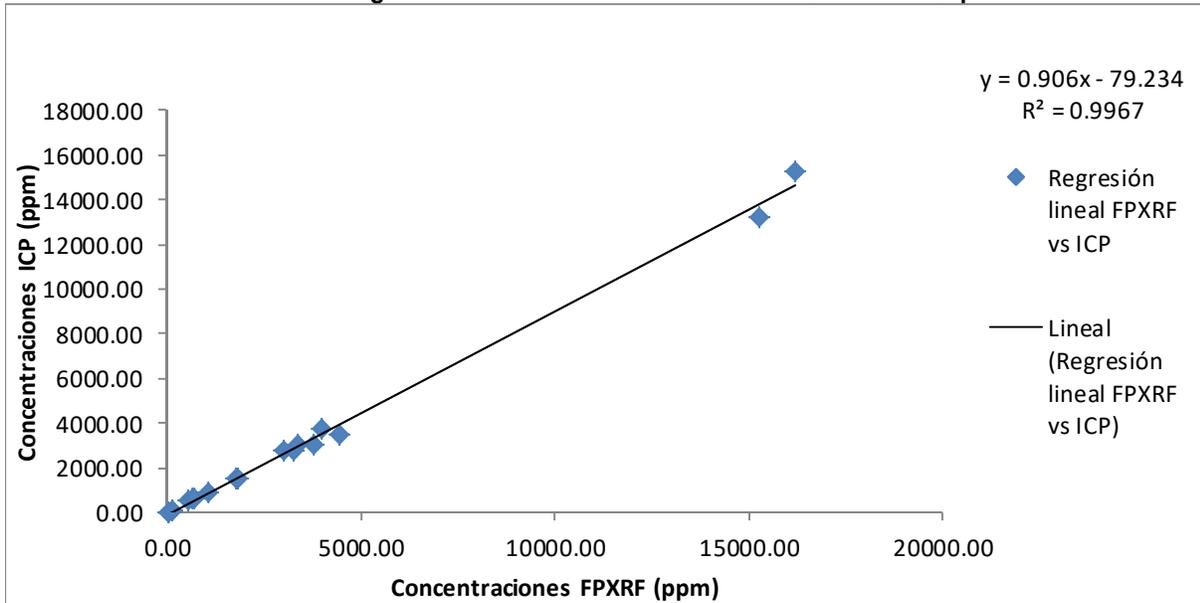
De la regresión lineal realizada para As se tiene, que el valor de la pendiente es  $m=0.8525$  por lo cual podemos decir que el equipo de FPXRF superestima la concentración de As en un **14.75%** ( $1-m$ ). Bajo las condiciones experimentales del equipo de ICP (digestiones con ácido nítrico).

Gráfico 32. Regresión lineal de concentraciones de ICP vs FPXRF para Cd



De la regresión lineal realizada para Cd se tiene, que el valor de la pendiente es  $m=0.8012$  por lo cual podemos decir que el equipo de FPXRF superestima la concentración de As en un **19.88%** (1-m). Bajo las condiciones experimentales del equipo de ICP (digestiones con ácido nítrico).

**Gráfico 33. Regresión lineal de concentraciones de ICP vs FPXRF para Pb**



De la regresión lineal realizada para Pb se tiene, que el valor de la pendiente es  $m=0.906$  por lo cual podemos decir que el equipo de FPXRF superestima la concentración de As en un **9.4%** (1-m). Bajo las condiciones experimentales del equipo de ICP (digestiones con ácido nítrico).

En la tabla 57 se muestra un resumen de los resultados obtenidos por regresión lineal para As, Cd y Pb, para cada uno el coeficiente de determinación tuvo un valor mayor a 0.9, por lo cual se puede decir que la técnica de FPXRF e ICP-OES son estadísticamente equivalentes en un nivel de confianza del 99%.

**Tabla 57. Resumen de la comparación entre FPXRF e ICP-OES**

Elemento	Parámetro	Coeficientes	Intervalos de confianza				Recobro		
			Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 99.0%	Superior 99.0%	Media de los recobros (%)	Superestimación(%)	
								m	Recobro
As	Intercepción	12.54	3.28	21.81	-0.22	25.31	107.60	14.75	7.60
	FRX	0.85	0.83	0.87	0.83	0.88			
	r	0.9991							
Cd	Intercepción	1.65	-8.98	12.29	-13.11	16.42	120.43	19.88	20.43
	FRX	0.80	0.79	0.82	0.78	0.82			
	r	0.9994							
Pb	Intercepción	-79.23	-237.63	79.17	-297.48	139.01	113.66	9.40	13.66
	FRX	0.91	0.88	0.93	0.87	0.94			
	r	0.9983							
Cr	Datos no comparables								
Ni 231									
Ni 216									

Nota: Para el caso de los elementos Cr y Ni, los resultados obtenidos no son comparables entre la técnica de análisis de FPXRF vs ICP, para poder obtener resultados confiables se recomienda realizar determinación de concentraciones a un número mayor de muestras.

## Anexo VIII. Coordenadas y clave de campo de las muestras tomadas como suelos de fondo geoquímico y de suelos superficiales y subsuperficiales

Tabla 58. Coordenadas y clave de campo de las muestras tomadas como suelos de fondo geoquímico

Número	Clave		X	Y
1	NR	FN-S-01	280342	3095202
2	NR	FN-S-01-DUP	280342	3095202
3	NR	FN-S-02	280716	3097980
4	NR	FN-S-03	280800	3100028
5	NR	FO-S-01	277660	3092422
6	NR	FO-S-02	275471	3092641
7	NR	FO-S-03	273296	3092538
8	NR	FE-S-01	284121	3092159
9	NR	FE-S-02	285012	3092102
10	NR	FE-S-03	286724	3092047
11	NR	FS-S-01	280321	3089197
12	NR	FS-S-02	280165	3085878
13	NR	FS-S-03	280166	3083771

Tabla 59. Coordenadas, profundidad y clave de campo de las muestras de suelos superficiales y subsuperficiales

Número	Clave	Profundidad	X	Y
1	NR-S-1	0-5	280559	3092356
2		5-25		
3		25-50		
4		50-75		
5		75-100		
6		100-150		
7	NR-S-2	0-5	280130	3092271
8		5-25		
9		25-50		
10		50-75		
11		75-100		
12		100-150		
13	NR-S-3	0-5	280373	3092261
14		5-25		
15		25-50		

Número	Clave	Profundidad	X	Y
16		50-70		
17		70-100		
18		100-120		
19	NR-S-4	0-5	280576	3092287
20		5-25		
21		5-25		
22		25-50		
23		50-75		
24		75-110		
25		110-130		
26		130-150		
27	NR-S-5	0-5	280055	3092182
28		5-25		
29		25-50		
30		50-75		
31		75-100		
32		100-150		
33	NR-S-6	0-5	280258	3092180
34		5-25		
35		25-50		
36	NR-S-7	0-15	280499	3092202
37		15-30		
38		30-55		
39		55-80		
40		80-100		
41		100-150		
42	NR-S-8	0-5	280109	3092125
43		5-25		
44		25-40		
45		40-70		
46		70-100		
47		100-130		
48		130-150		
49	NR-S-9	0-5	280388	3092117
50		5-35		
51		35-45		
52		45-75		
53		75-100		

Número	Clave	Profundidad	X	Y
54		75-100		
55		100-150		
56	NR-S-10	0-5	280520	3092114
57		5-40		
58		40-70		
59		40-70		
60		70-100		
61		100-125		
62		125-150		
63	NR-S-11	0-5	279940	3092041
64		5-25		
65		25-50		
66		50-70		
67		70-80		
68		80-100		
69	NR-S-12	0-5	280150	3092062
70		5-25		
71		25-50		
72		50-75		
73		75-100		
74		100-150		
75	NR-S-13	0-5	280273	3092020
76		5-25		
77		25-50		
78		50-75		
79		75-100		
80		100-150		
81	NR-S-14	0-5	280437	3092004
82		5-25		
83		25-50		
84		50-75		
85		75-110		
86		110-130		
87	NR-S-15	0-5	280652	3092001
88		5-25		
89		25-50		
90		50-75		
91		75-100		

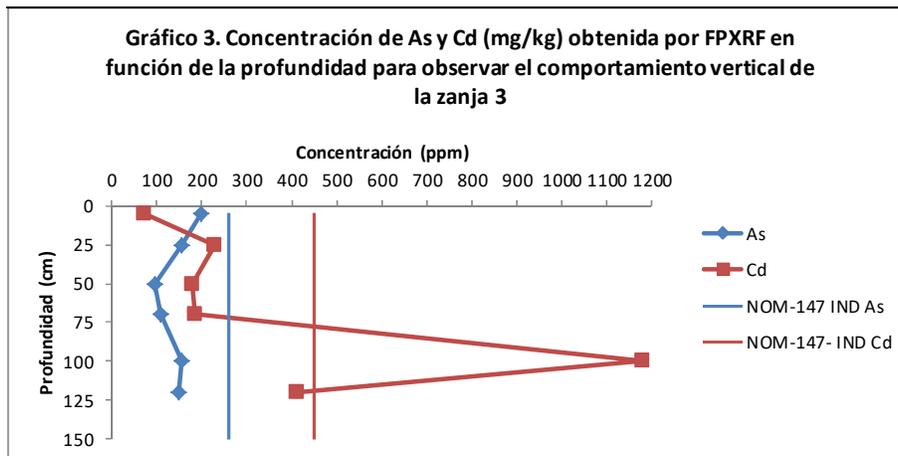
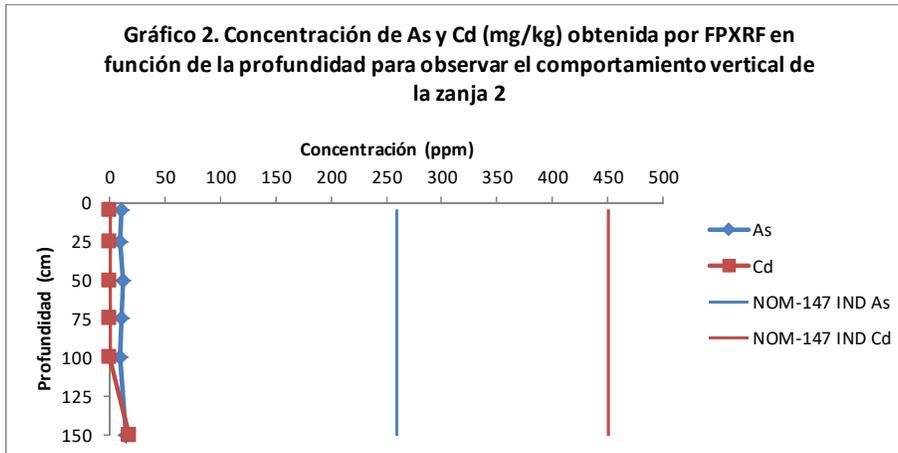
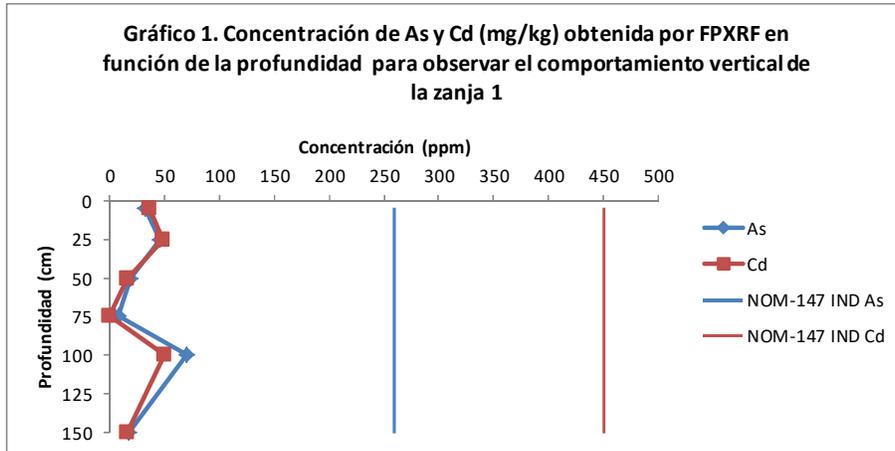
Número	Clave	Profundidad	X	Y
92		75-100		
93	NR-S-16	0-5	279937	3091943
94		5-25		
95		25-50		
96		50-75		
97		75-100		
98		100-125		
99		125-150		
100	NR-S-17	0-5	280046	3091939
101		5-25		
102		25-50		
103		50-60		
104		60-100		
105		100-150		
106	NR-S-18	0-15	280172	3091936
107		15-25		
108		25-50		
109		25-50		
110		50-75		
111		75-100		
112		100-150		
113	NR-S-19	0-10	280315	3091918
114		5-25		
115		25-55		
116		55-80		
117		80-100		
118		80-100		
119		100-150		
120	NR-S-20	0-5	280442	3091952
121		5-25		
122		25-50		
123		50-75		
124		75-100		
125		75-100		
126		100-150		
127	NR-S-21	0-20	280590	3091910
128		20-50		
129		50-75		

Número	Clave	Profundidad	X	Y
130		75-100		
131		100-150		
132	NR-S-22	0-5	280009	3091845
133		5-30		
134		30-50		
135		50-90		
136		90-110		
137		110-150		
138	NR-S-23	0-5	280119	3091848
139		5-25		
140		25-50		
141		50-75		
142		75-100		
143		100-150		
144		100-150		
145	NR-S-24	0-5	280301	3091841
146		5-25		
147		25-50		
148		50-75		
149		75-100		
150		100-150		
151	NR-S-25	0-25	280542	3091826
152		25-50		
153		50-75		
154		75-100		
155		100-125		
156		125-150		
157		150-175		
158	NR-S-26	0-5	280027	3091783
159		5-25		
160		25-40		
161		40-65		
162		65-100		
163		100-125		
164		125-150		
165		NR-S-27		
166	5-25			
167	25-50			

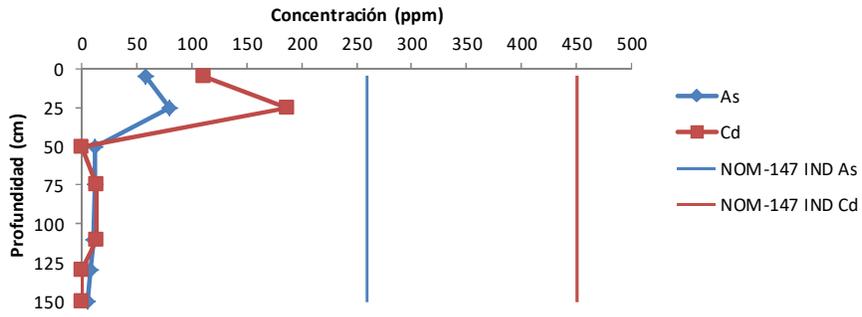
Número	Clave	Profundidad	X	Y
168		50-75		
169		50-75		
170		75-100		
171		100-150		
172	NR-S-28	0-10	280391	3091751
173		5-25		
174		25-50		
175		50-75		
176		75-100		
177		100-150		
178	NR-S-29	0-5	280490	3091718
179		5-50		
180		50-90		
181		90-140		
182		140-175		
183	NR-S-30	0-5	279941	3091686
184		5-25		
185		20-40		
186		40-70		
187		70-100		
188		100-150		
189	NR-S-31	0-5	280126	3091686
190		5-25		
191		30-50		
192		50-75		
193		75-100		
194		100-150		
195	NR-S-32	0-25	280280	3091680
196		25-50		
197		50-75		
198		75-100		
199		100-125		
200		125-150		
201		125-150		
202	NR-S-33	0-25	280003	3091620
203		25-60		
204		60-90		
205		90-120		

Número	Clave	Profundidad	X	Y
206		120-140		
207		>140		
208	NR-S-34	0-10	280215	3091616
209		5-25		
210		25-50		
211		50-75		
212		75-100		
213		100-150		
214	NR-S-35	0-30	280034	3091550
215		30-50		
216		50-75		
217		75-100		
218		100-115		
219		115-150		
220	NR-S-36	0-5	280351	3092042
221		5-25		
222		30-55		
223		55-85		
224		85-120		
225		120-150		
226	NR-S-37	0-5	280496	3092069
227		5-35		
228		35-60		

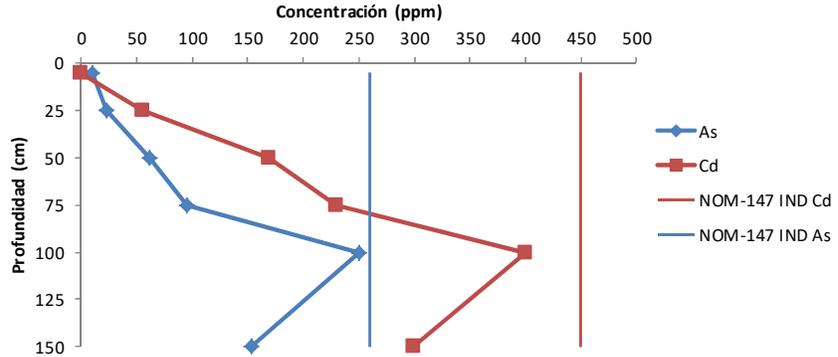
**Anexo IX. Compendio de gráficos y figuras a partir de los cuales fueron seleccionados los de mayor interés para la discusión de resultados**



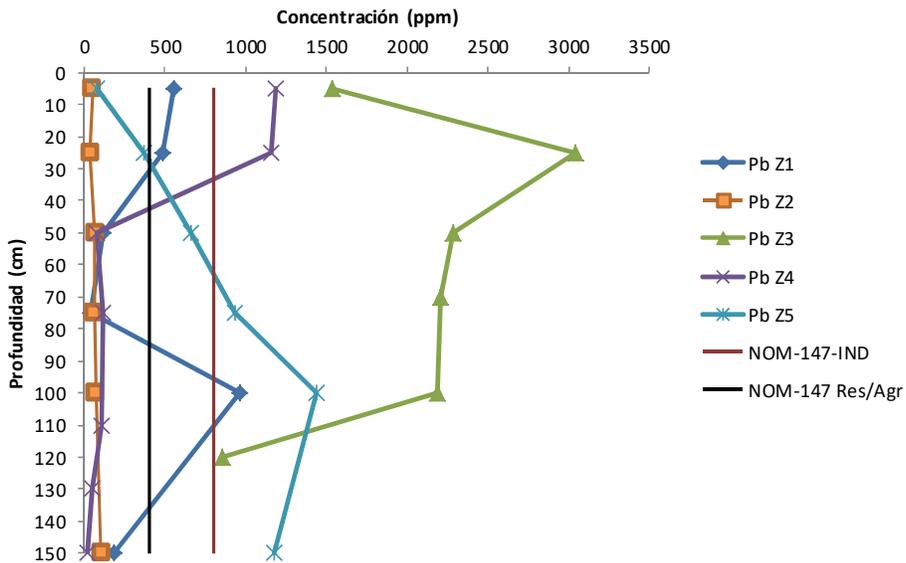
**Gráfico 4. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 4**



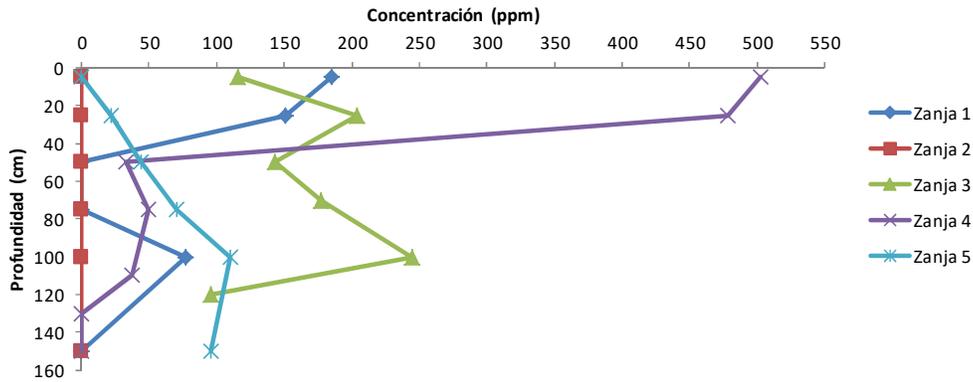
**Gráfico 5. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 5**



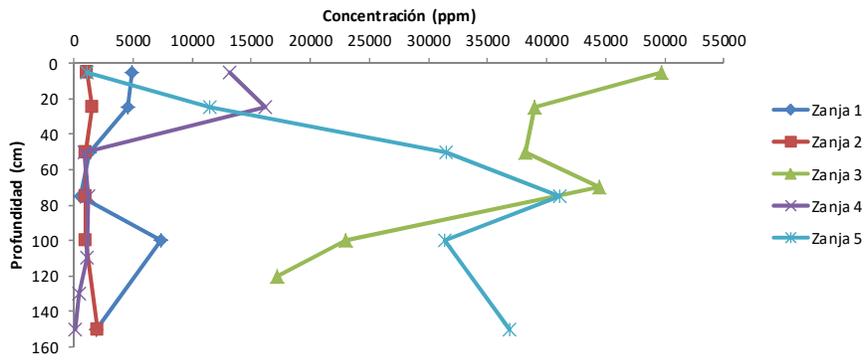
**Gráfico 6. Concentración de Pb(mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 1-5**



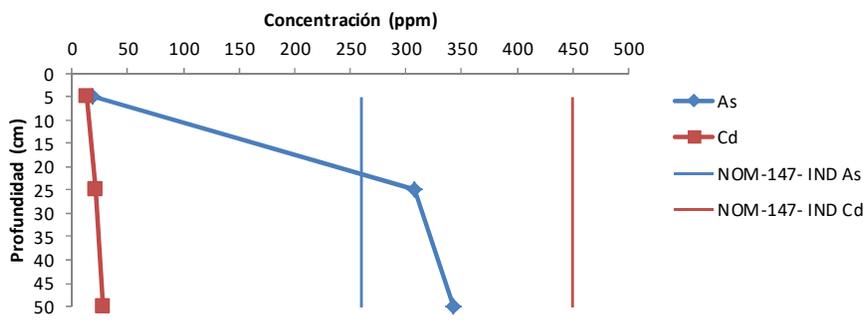
**Gráfico 7. Concentración de Sb (mg/Kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 1-5**



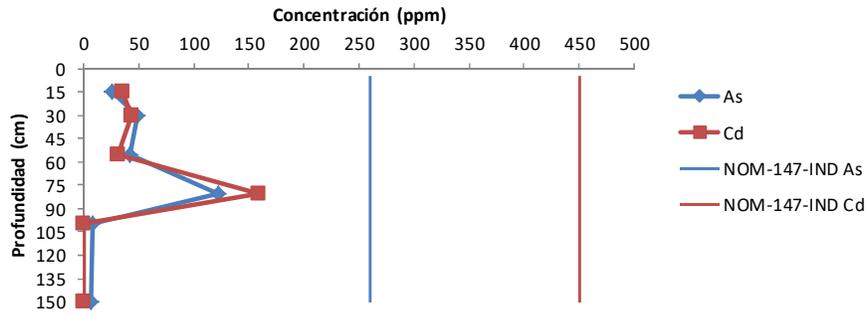
**Gráfico 8. Concentración de Zn (mg/Kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 1-5**



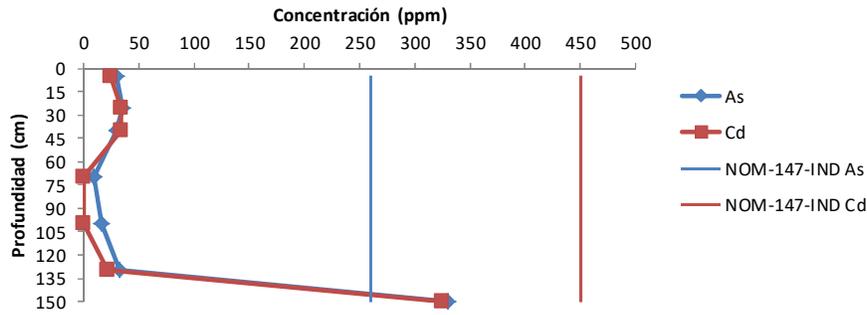
**Gráfico 9. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 6**



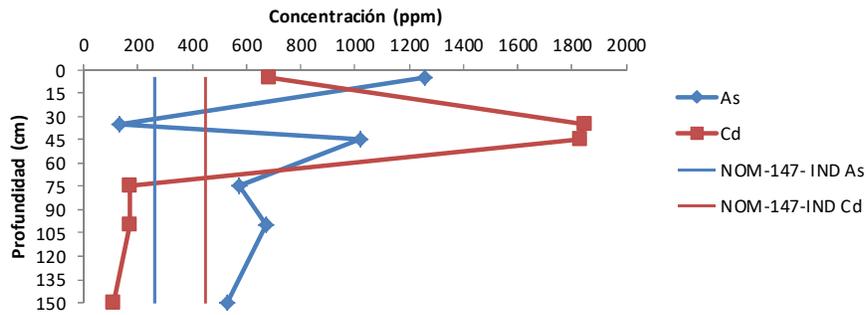
**Gráfico 10. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 7**

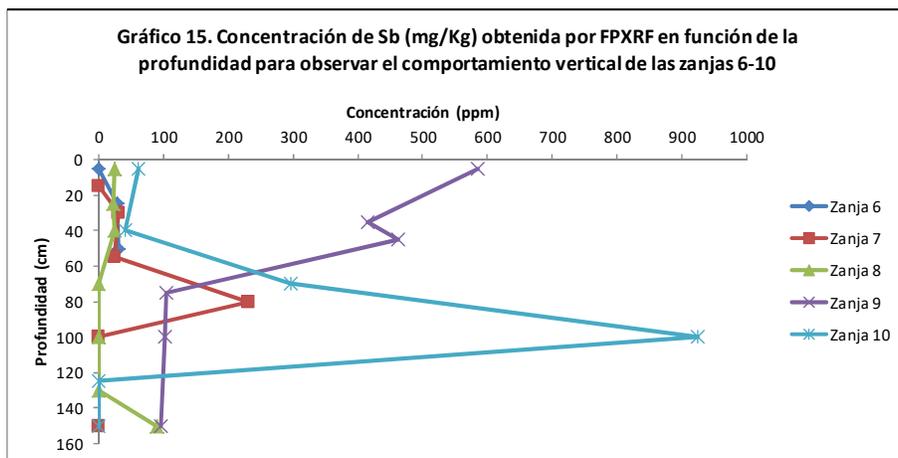
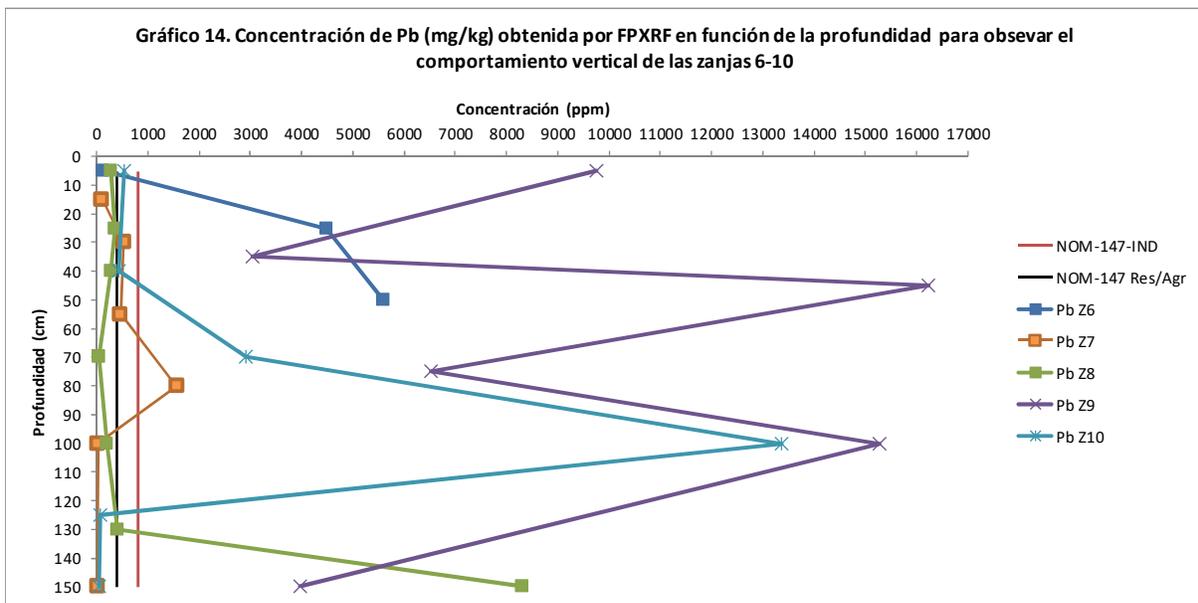
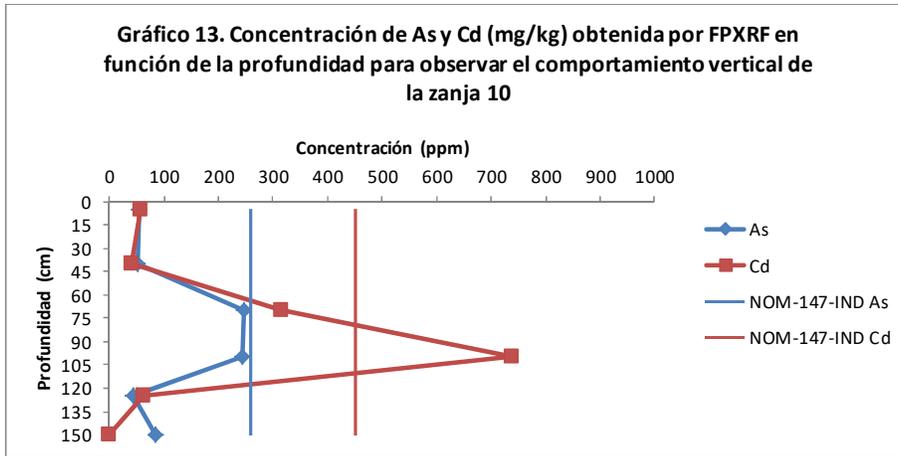


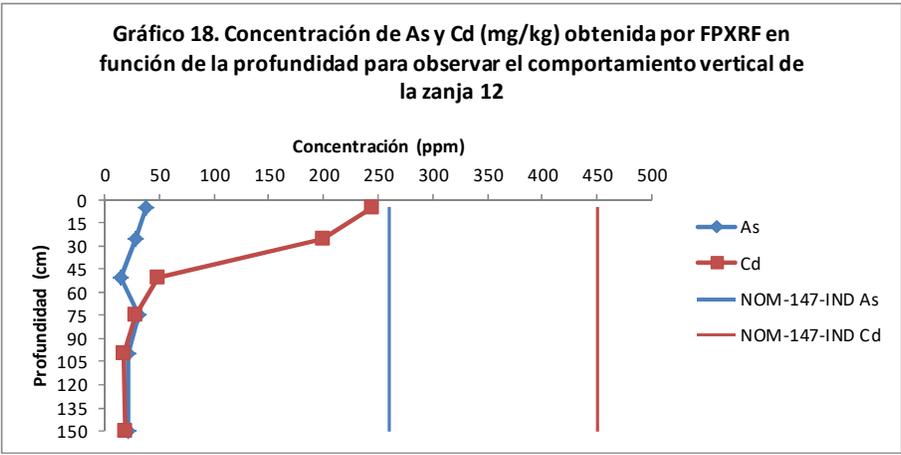
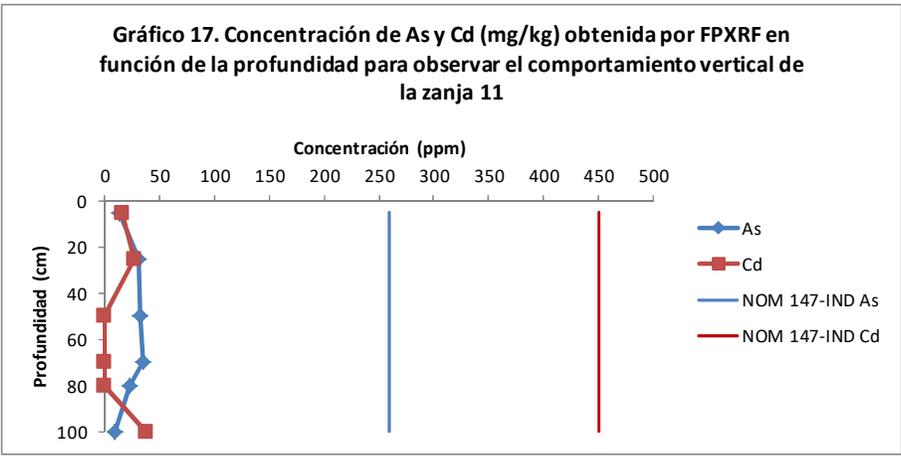
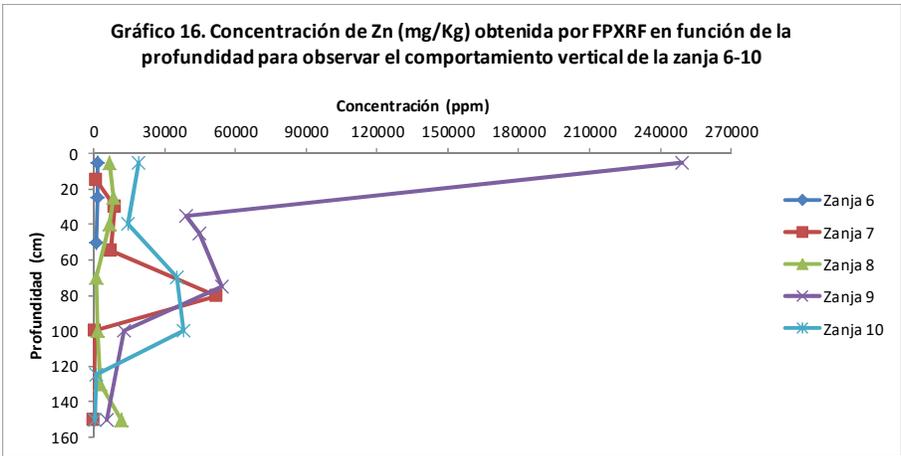
**Gráfico 11. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 8**



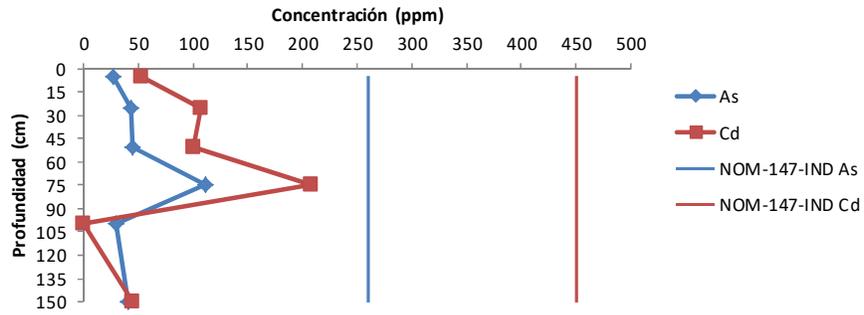
**Gráfico 12. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 9**



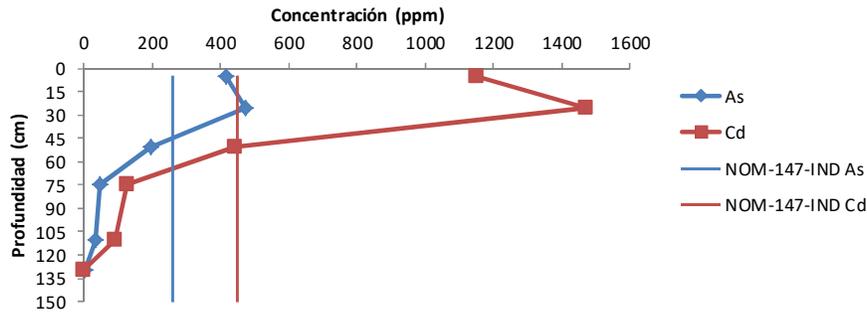




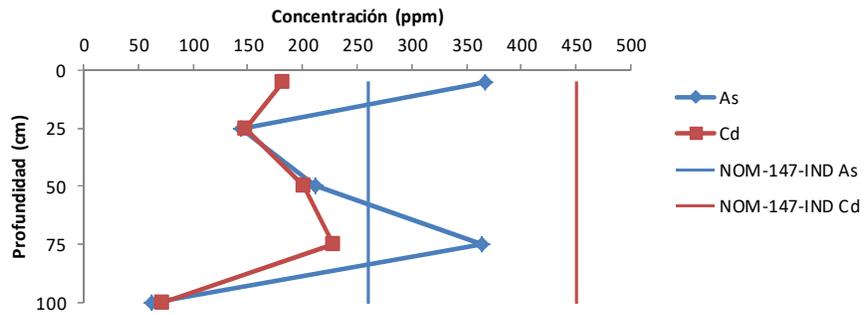
**Gráfico 19. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 13**

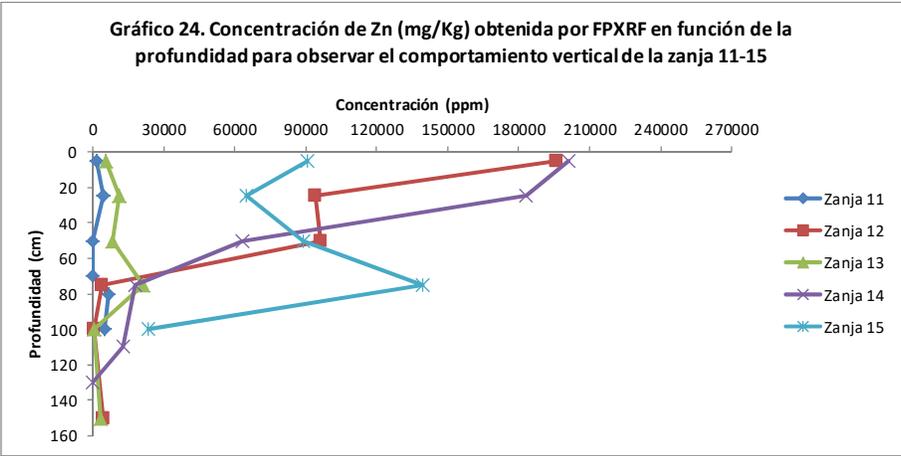
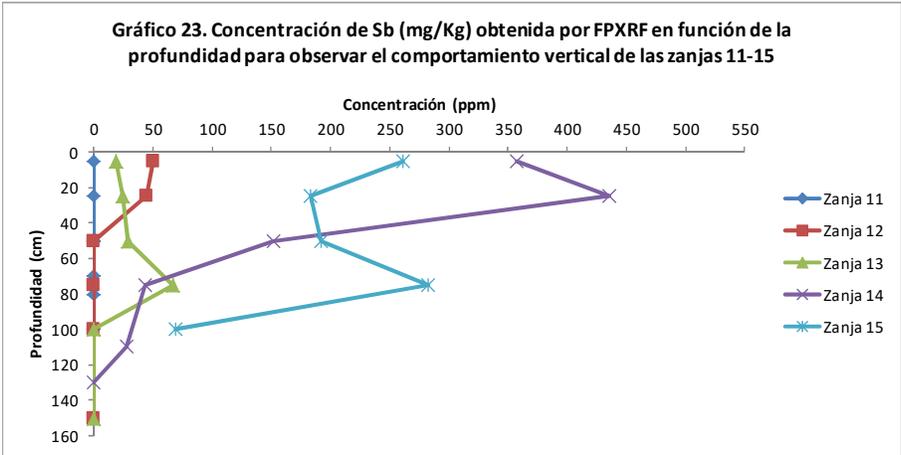
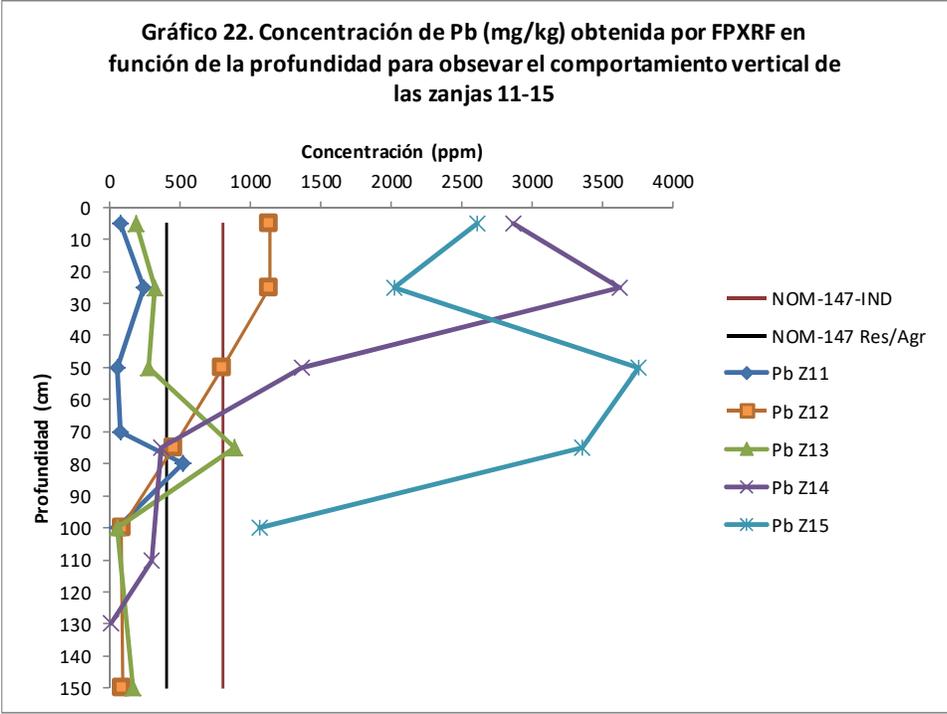


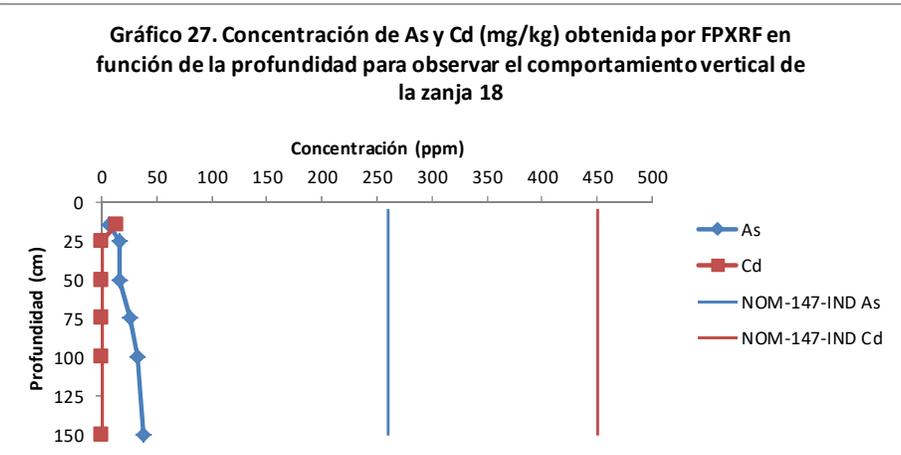
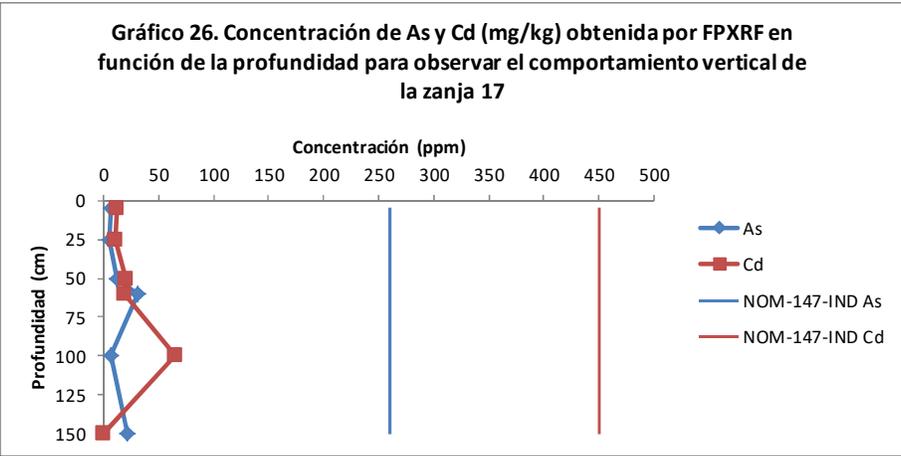
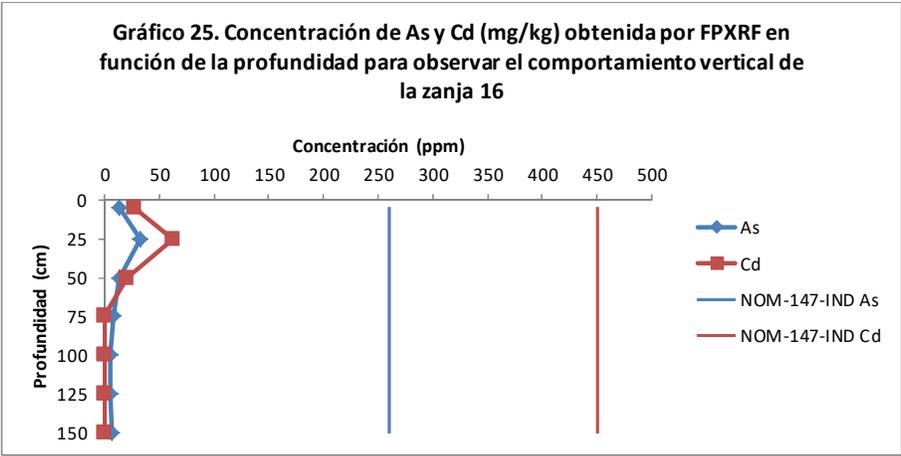
**Gráfico 20. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 14**

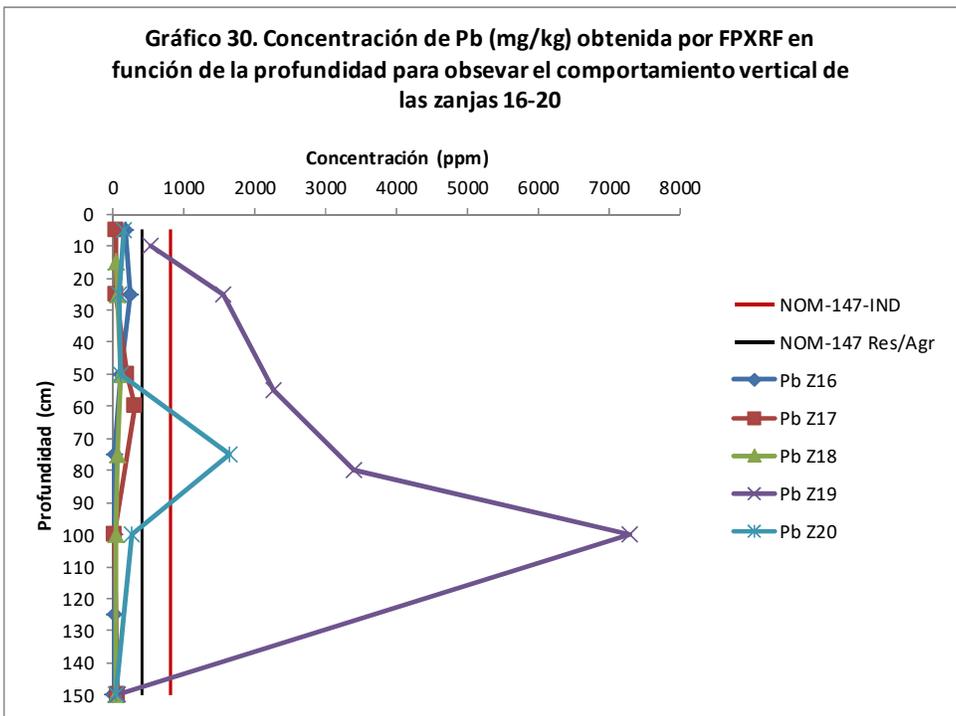
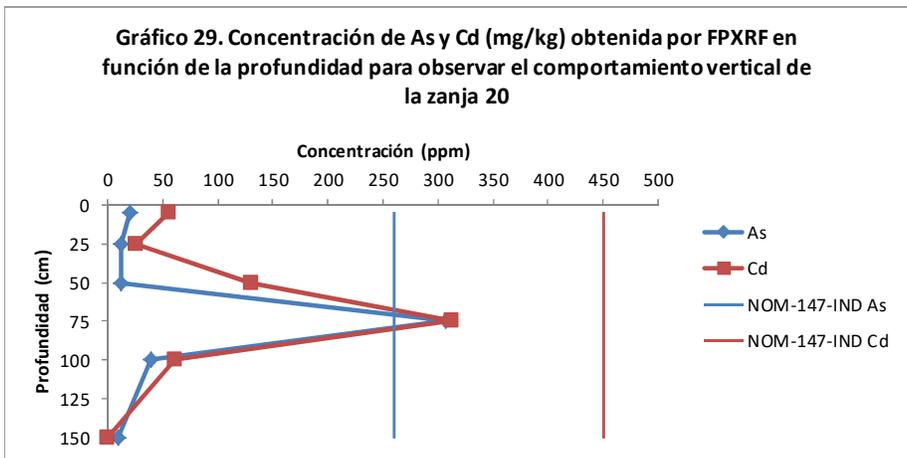
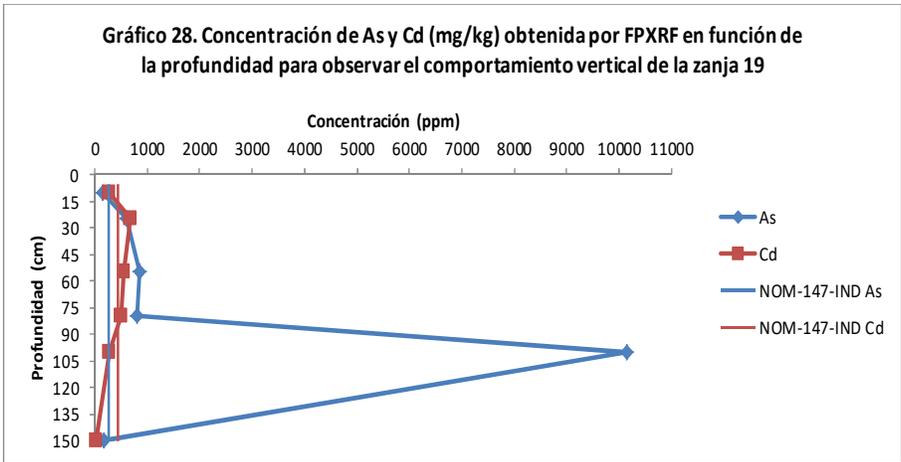


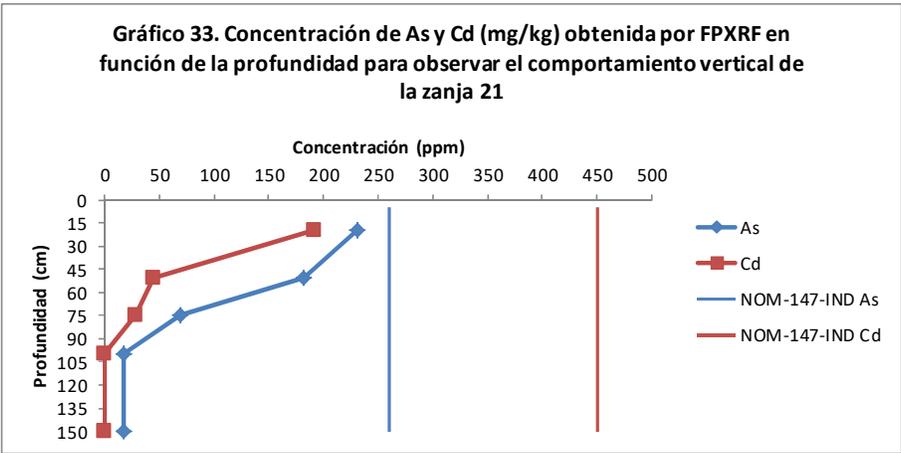
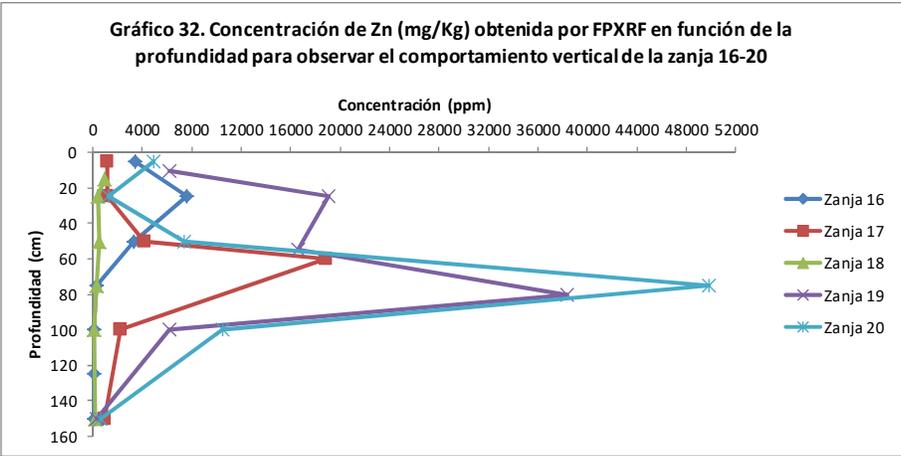
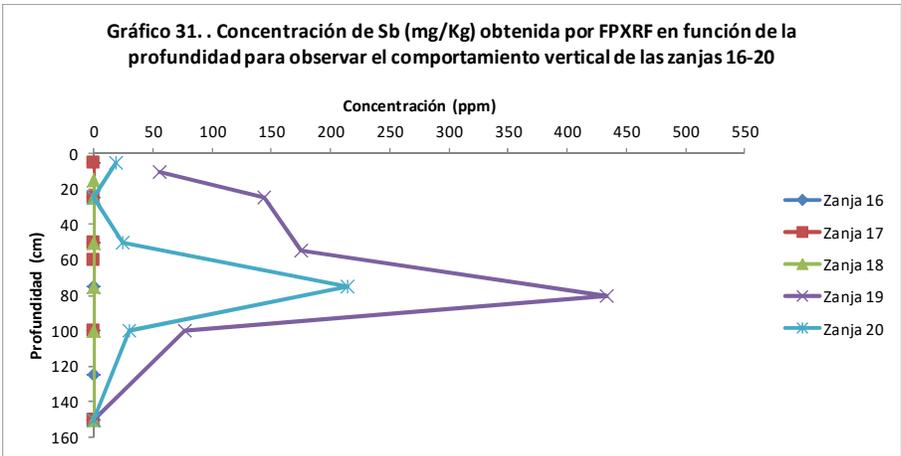
**Gráfico 21. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 15**

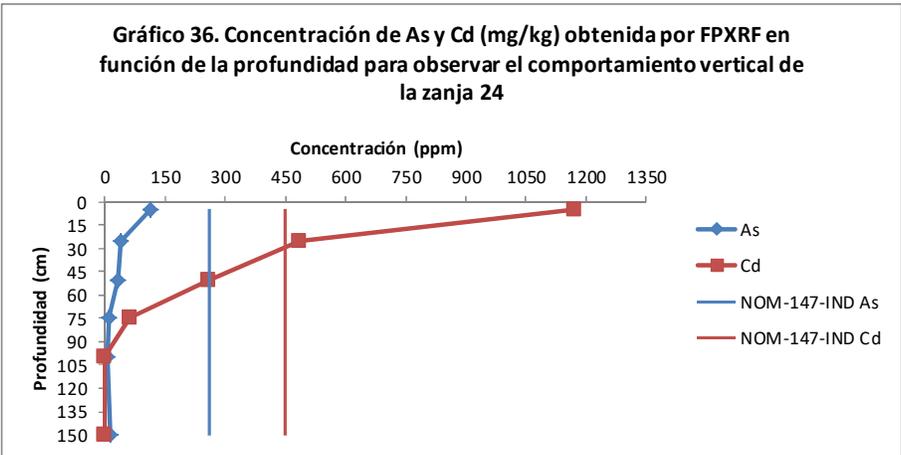
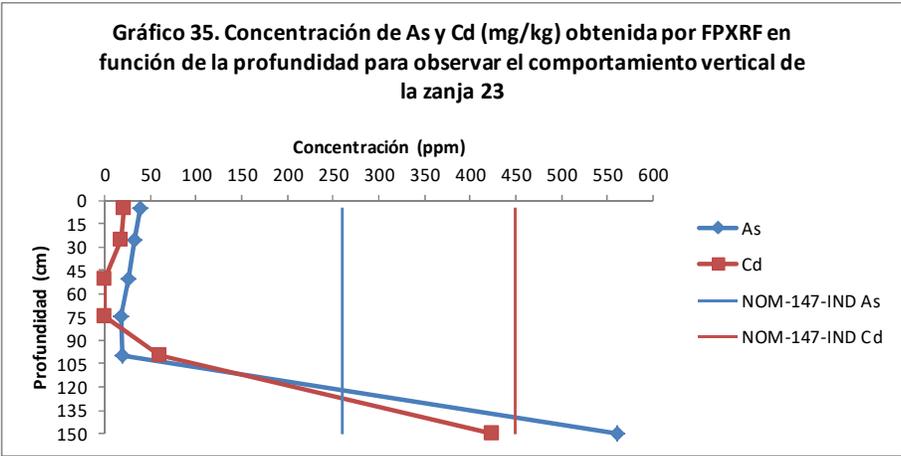
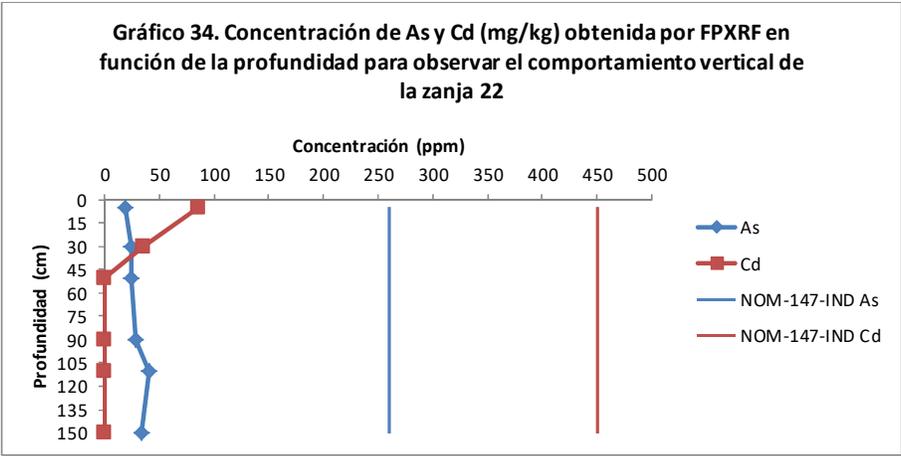




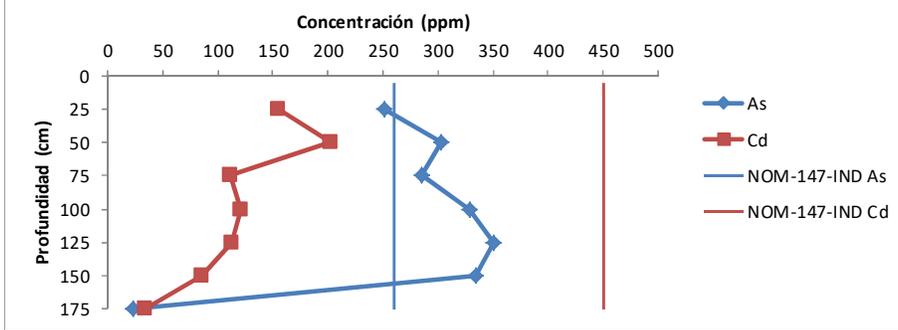




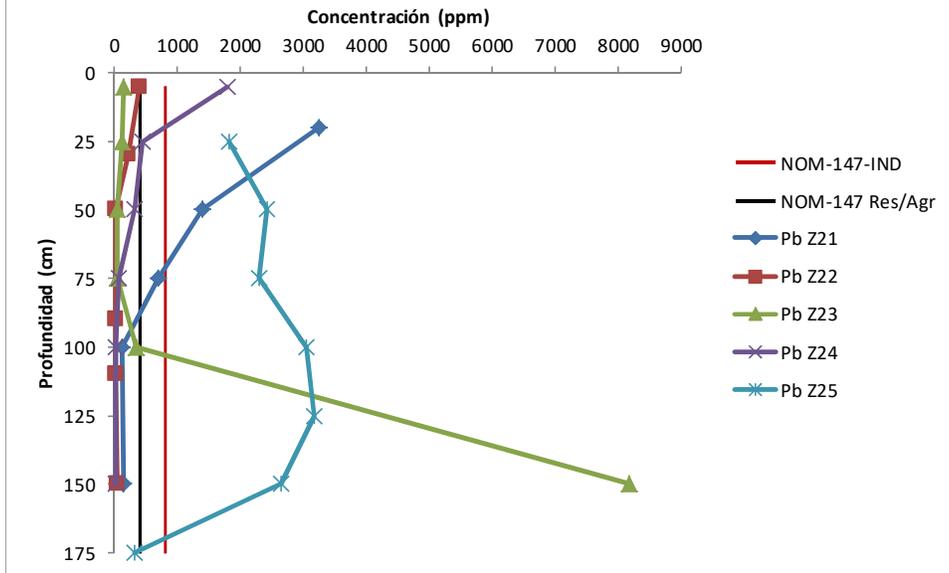




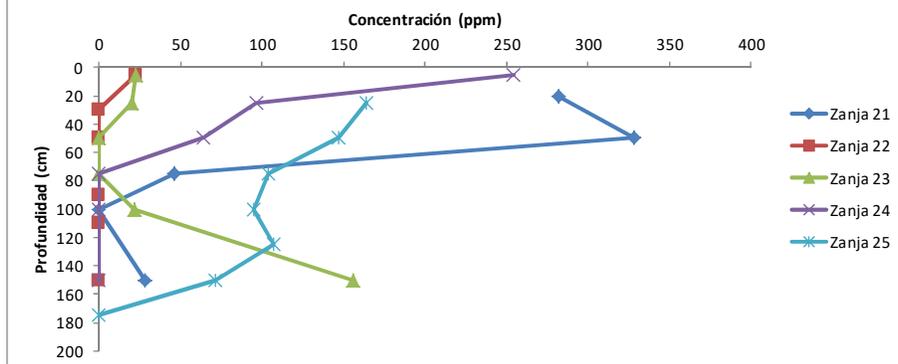
**Gráfico 37. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 25**



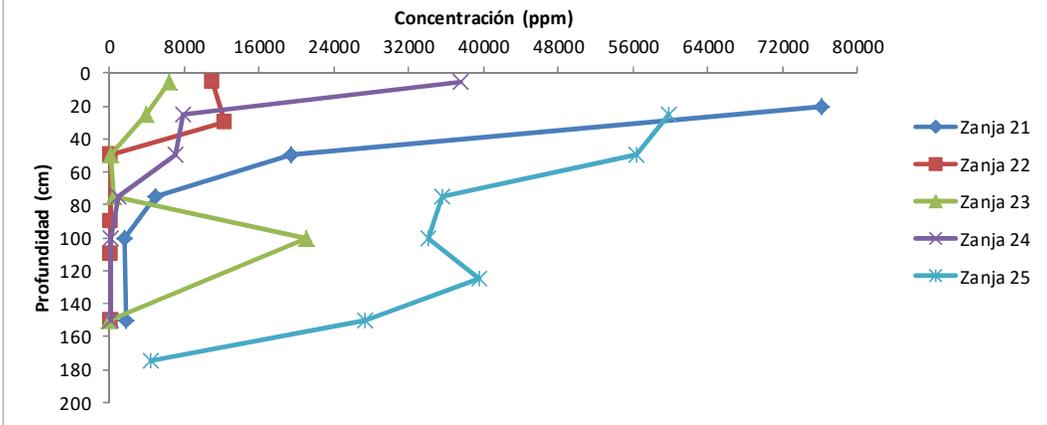
**Gráfico 38. Concentración de Pb (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 21-25**



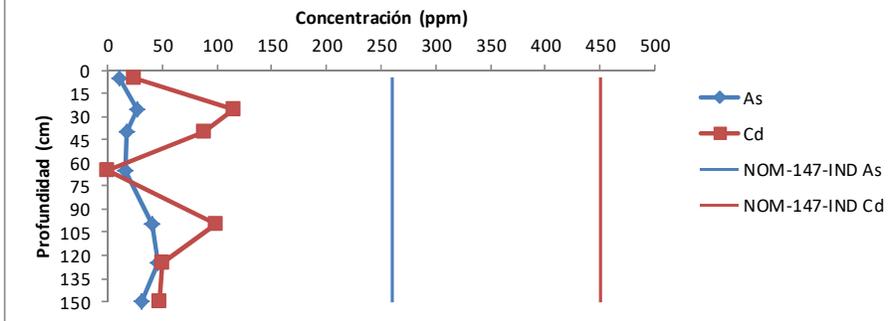
**Gráfico 39. . Concentración de Sb (mg/Kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 21-25**



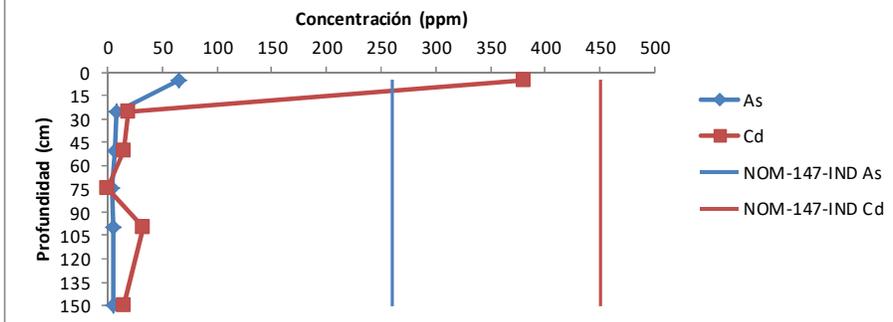
**Gráfico 40. Concentración de Zn (mg/Kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 21-25**



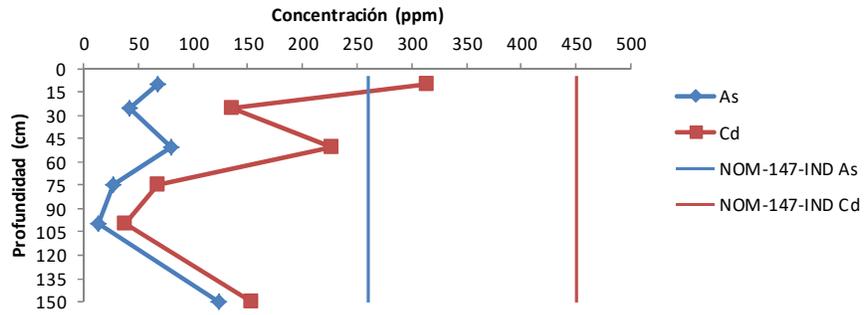
**Gráfico 41. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 26**



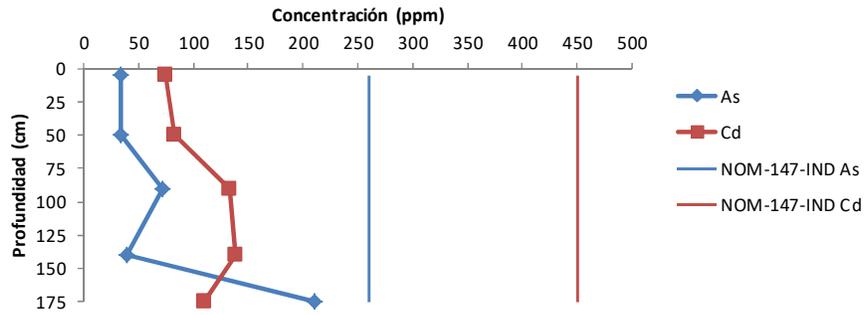
**Gráfico 42. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 27**



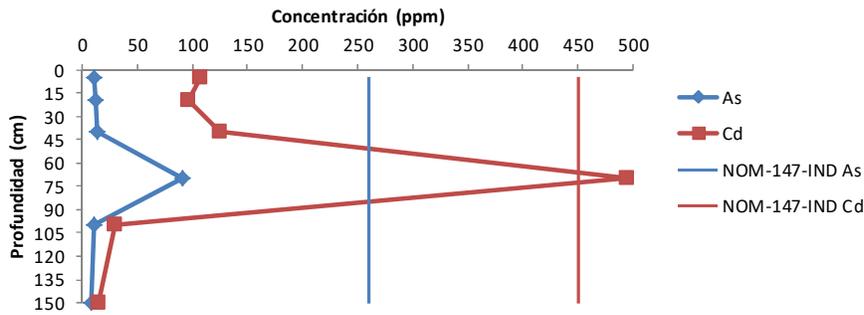
**Gráfico 43. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 28**



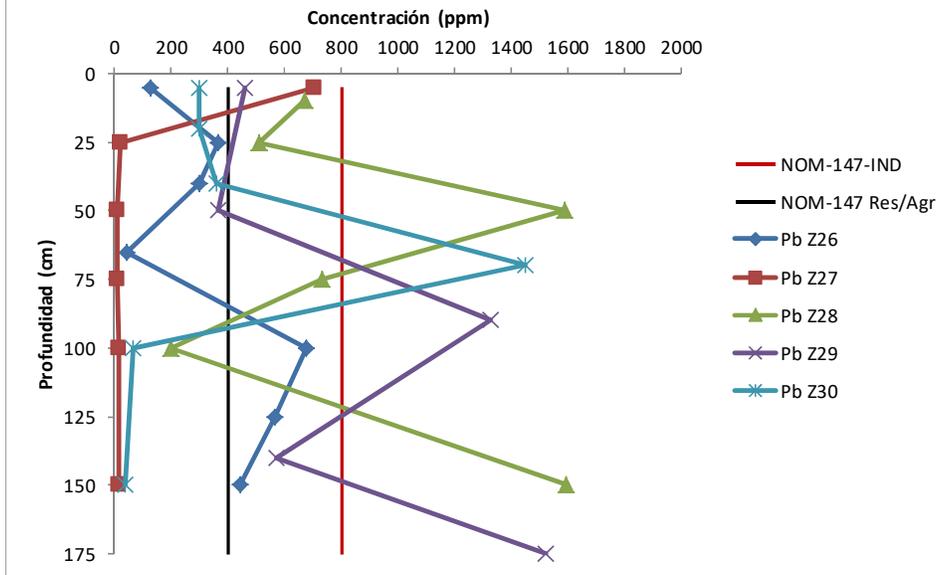
**Gráfico 44. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 29**



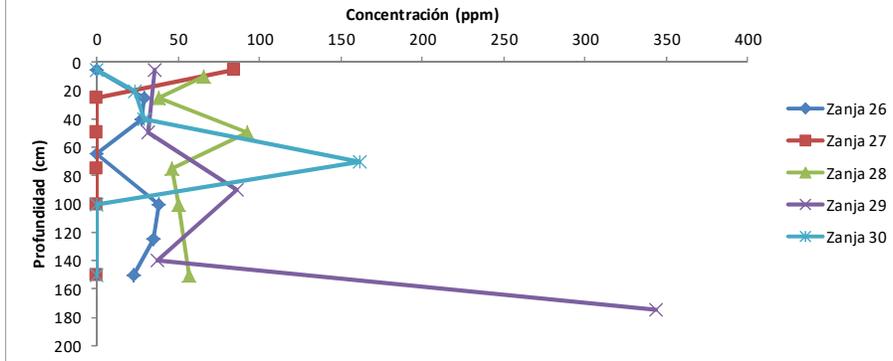
**Gráfico 45. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 30**



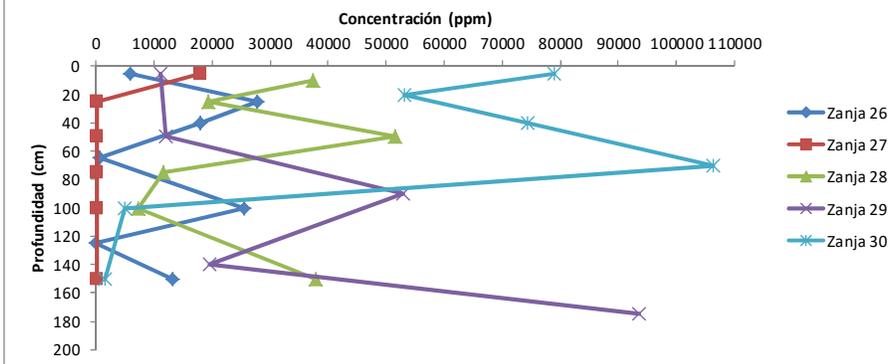
**Gráfico 46. Concentración de Pb (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 26-30**



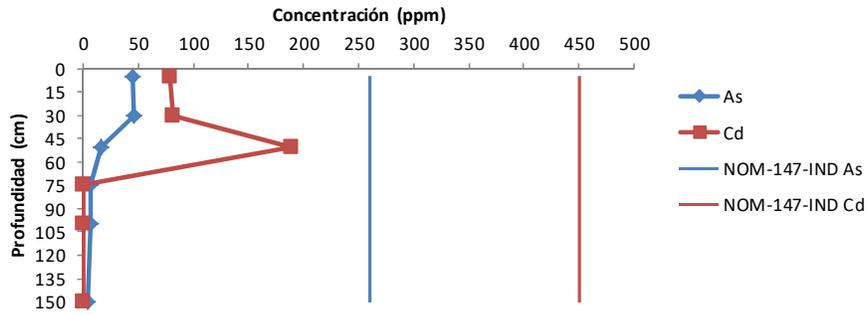
**Gráfico 47. . Concentración de Sb (mg/Kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 26-30**



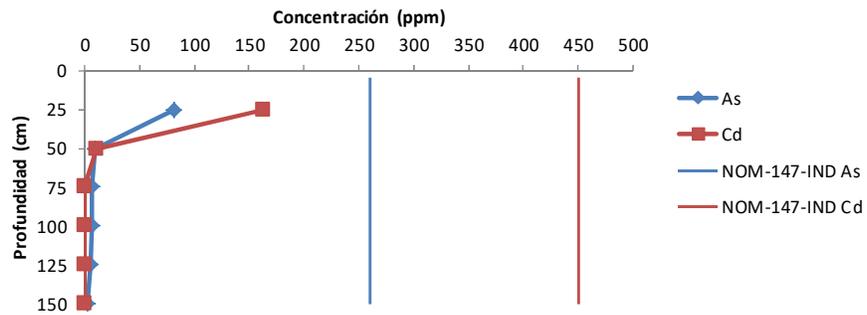
**Gráfico 48. Concentración de Zn (mg/Kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 26-30**



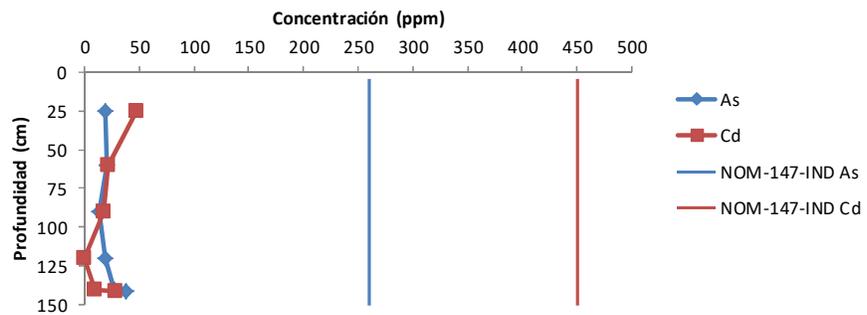
**Gráfico 49. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 31**

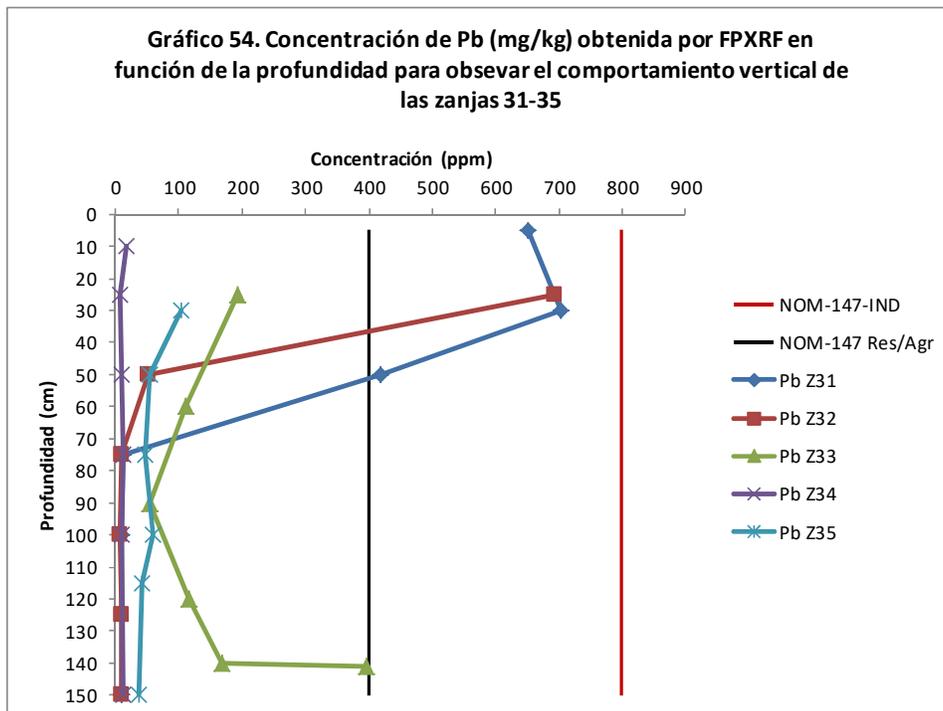
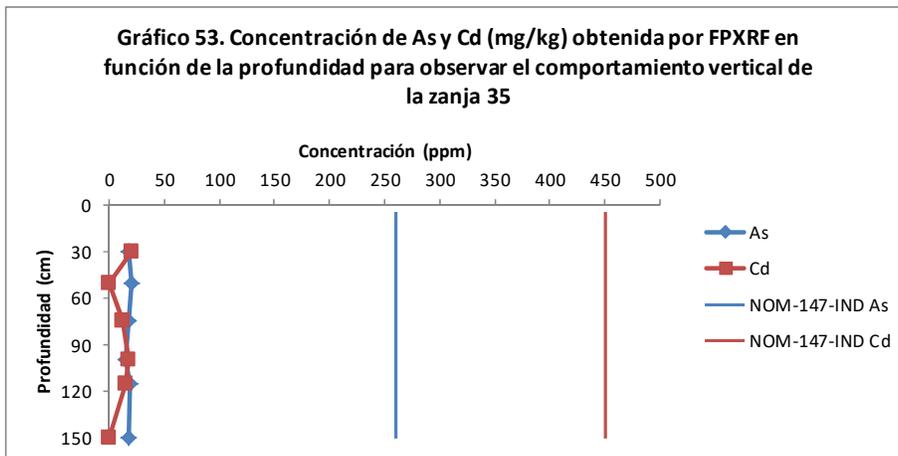
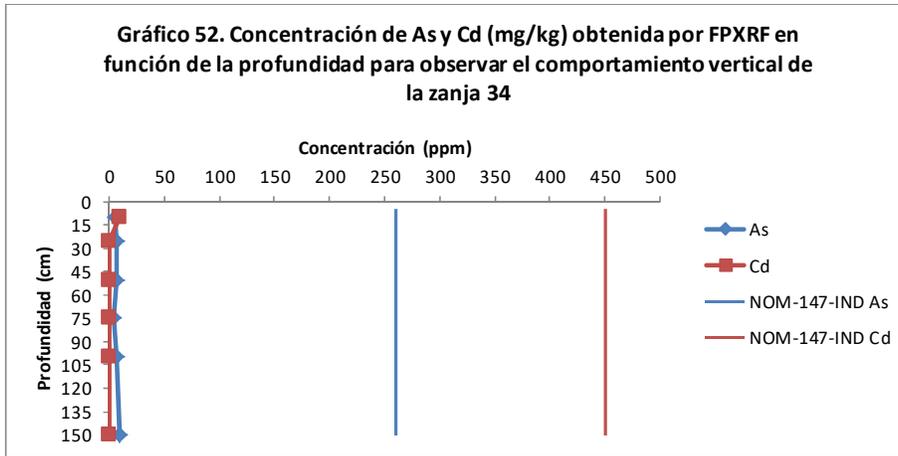


**Gráfico 50. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 32**

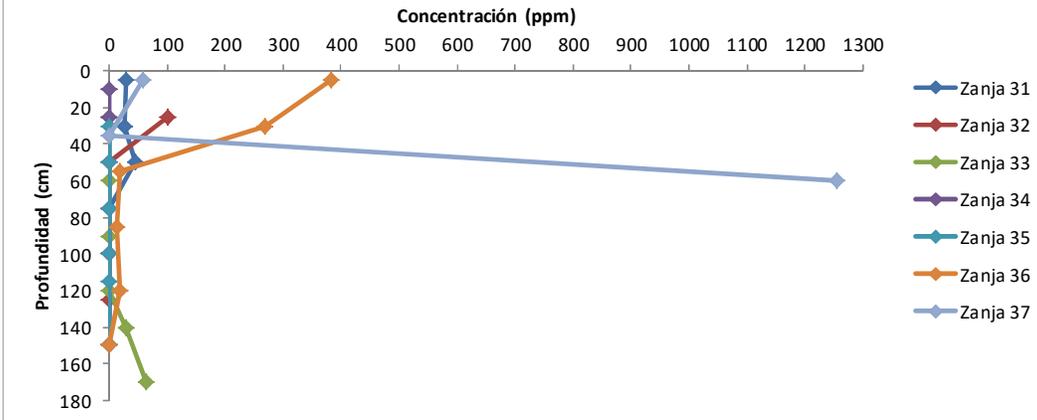


**Gráfico 51. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 33**

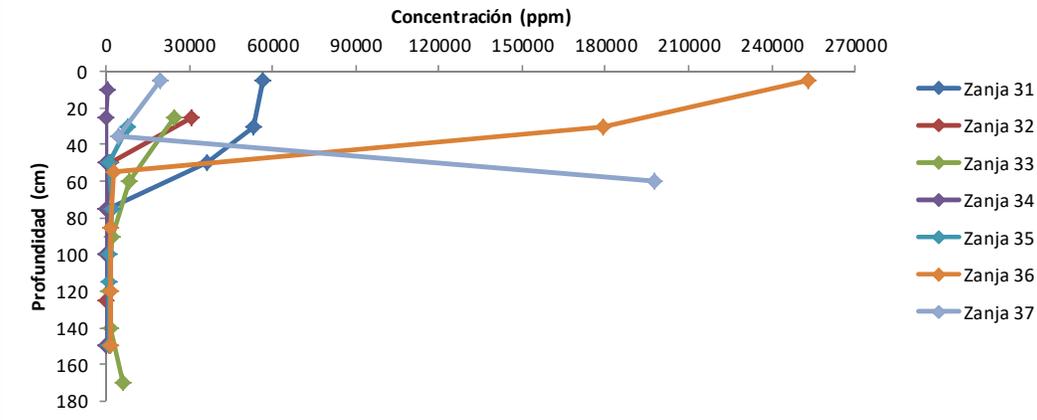




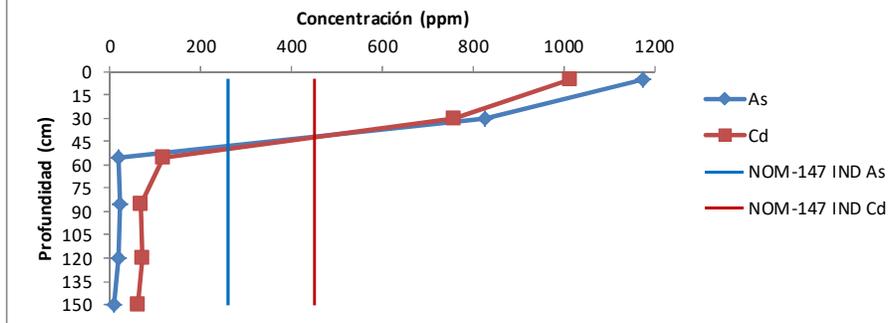
**Gráfico 55. . Concentración de Sb (mg/Kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 31-37**



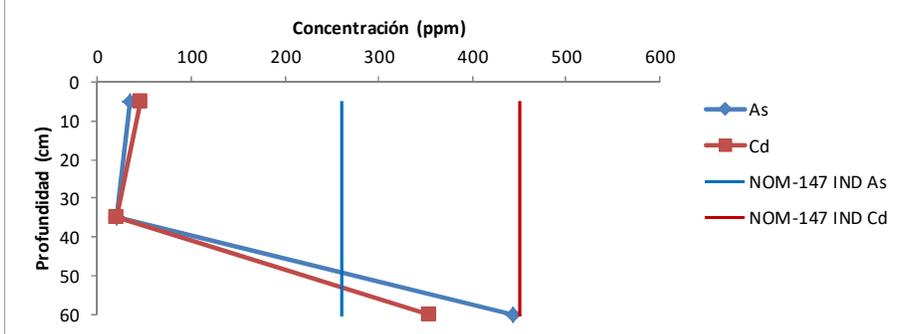
**Gráfico 56. Concentración de Zn (mg/Kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 31-37**



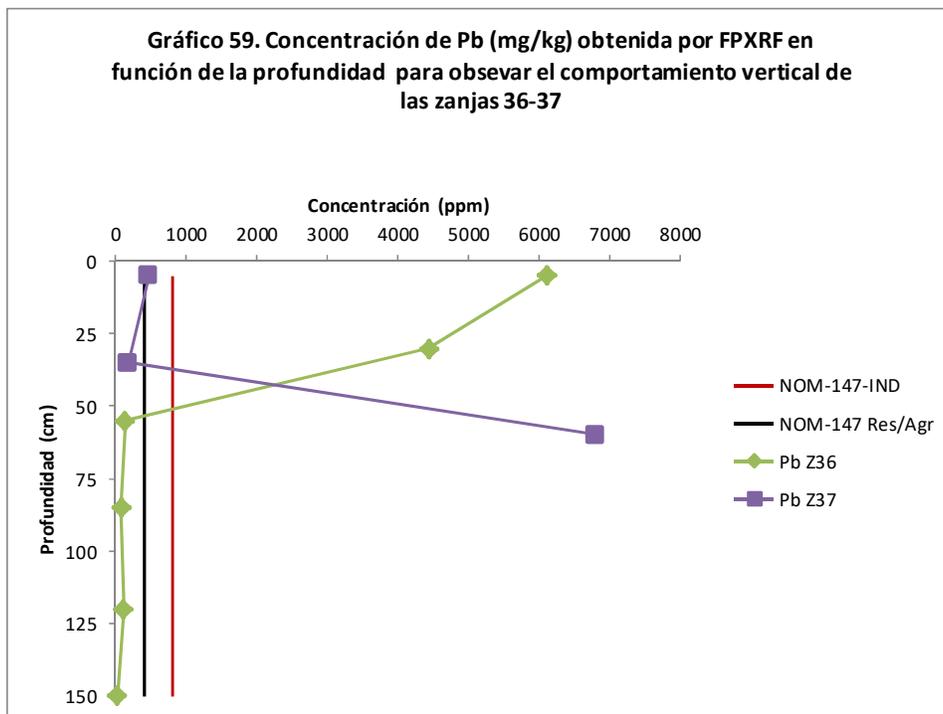
**Gráfico 57. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 36**



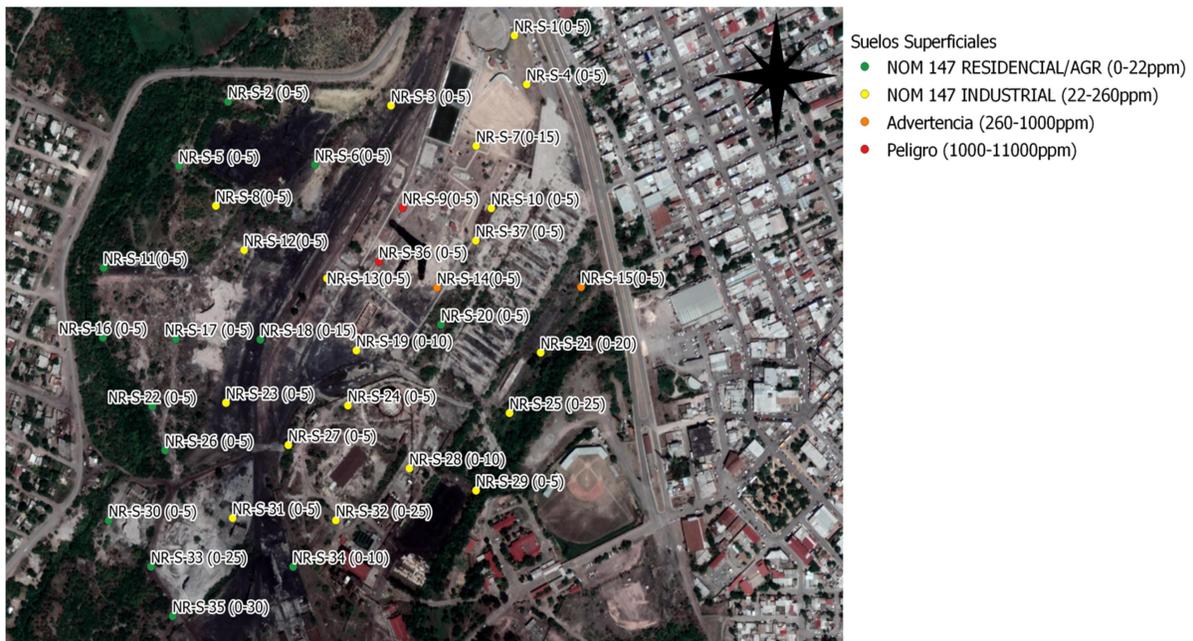
**Gráfico 58. Concentración de As y Cd (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de la zanja 37**



**Gráfico 59. Concentración de Pb (mg/kg) obtenida por FPXRF en función de la profundidad para observar el comportamiento vertical de las zanjas 36-37**



En el siguiente apartado se muestran la totalidad de mapas realizados con el software QGIS 3.2, en cada uno de ellos se encuentra una leyenda con un código de colores para las concentraciones obtenidas en suelos superficiales y subsuperficiales, el código de colores es: verde para concentraciones menores al valor límite para suelos de uso residencial/agrícola; amarillo para concentraciones menores al valor límite para suelos de uso industrial; anaranjado para concentraciones que sobrepasan el valor permisible para suelos de uso industrial y finalmente rojo que indica que la concentración es un orden de magnitud mayor que el límite permisible.



**Mapa 1. Concentraciones de As-Superficial obtenidas por FPXRF**



8

**Mapa 2. Concentraciones de Cd-Superficial obtenidas por FPXRF**



**Mapa 3. Concentraciones de Pb-Superficial obtenidas por FPXRF**



- Profundidad 5-25
- NOM 147 RESIDENCIAL/AGR (0-22 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (22-260 ppm)
  - Advertencia (260-1000 ppm)
  - Peligro (1000-11000 ppm)

**Mapa 4. Concentraciones de As subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 5-25 cm**



- Profundidad 25-50
- NOM 147 RESIDENCIAL/AGR (0-22 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (22-260 ppm)
  - Advertencia (260-1000 ppm)
  - Peligro (1000-11000 ppm)

**Mapa 5. Concentraciones de As subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 25-50 cm**



- Profundidad 50-75
- NOM 147 RESIDUAL/AGR (0-22 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (22-260 ppm)
  - Advertencia (260-1000 ppm)
  - Peligro (1000-11000 ppm)

**Mapa 6. Concentraciones de As subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 50-75 cm**



- Profundidad 75-100
- NOM 147 RESIDUAL/AGR (0-22 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (22-260 ppm)
  - Advertencia (260-1000 ppm)
  - Peligro (1000-11000 ppm)

**Mapa 7. Concentraciones de As subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 75-100 cm**



- Profundidad 100-125
- NOM 147 RESIDUAL/AGR (0-22 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (22-260 ppm)
  - Advertencia (260-1000 ppm)
  - Peligro (1000-11000 ppm)

**Mapa 8. Concentraciones de As subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 100-125 cm**



- Profundidad 125-150
- NOM 147 RESIDUAL/AGR (0-22 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (22-260 ppm)
  - Advertencia (260-1000 ppm)
  - Peligro (1000-11000 ppm)

**Mapa 9. Concentraciones de As subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 125-150 cm**



Mapa 10. Concentraciones de As subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 150-175 cm



- Profundidad 5-25
- NOM 147 RESIDENCIAL/AGR (0-37 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (37-450 ppm)
  - Advertencia (450-1000 ppm)
  - Peligro (1000-2000 ppm)

**Mapa 11. Concentraciones de Cd subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 5-25 cm**



- Profundidad 25-50
- NOM 147 RESIDENCIAL/AGR (0-37 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (37-450 ppm)
  - Advertencia (450-1000 ppm)
  - Peligro (1000-2000 ppm)

**Mapa 12. Concentraciones de Cd subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 25-50 cm**



Mapa 13. Concentraciones de Cd subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 50-75 cm



Mapa 14. Concentraciones de Cd subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 75-100 cm



Mapa 15. Concentraciones de Cd subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 100-125 cm



Mapa 16. Concentraciones de Cd subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 125-150 cm



- Profundidad 5-25
- NOM 147 RESIDENCIAL/AGR (0-400 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (400-800 ppm)
  - Advertencia (400-2000 ppm)
  - Peligro (2000-18000 ppm)

**Mapa 17. Concentraciones de Pb subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 5-25 cm**



- Profundidad 25-50
- NOM 147 RESIDENCIAL/AGR (0-400ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (400-800 ppm)
  - Advertencia (800-2000 ppm)
  - Peligro (2000-18000 ppm)

**Mapa 18. Concentraciones de Pb subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 25-50 cm**



- Profundidad 50-75
- NOM 147 RESIDUAL/AGR (0-400 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (400-800 ppm)
  - Advertencia (800-2000 ppm)
  - Peligro (2000-18000 ppm)

**Mapa 19. Concentraciones de Pb subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 50-75 cm**



- Profundidad 75-100
- NOM 147 RESIDUAL/AGR (0-400 ppm)
  - NOM 147 INDUSTRIAL (400-800 ppm)
  - Advertencia (800-2000 ppm)
  - Peligro (2000-18000 ppm)

**Mapa 20. Concentraciones de Pb subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 75-100 cm**



Mapa 21. Concentraciones de Pb subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 100-125 cm



Mapa 22. Concentraciones de Pb subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 125-150 cm



Profundidad 150-175

- NOM 147 RESIDUAL/AGR (0-400 ppm)
- NOM 147 INDUSTRIAL (400-800 ppm)
- Advertencia (800-2000 ppm)
- Peligro (2000-18000 ppm)

Mapa 23. Concentraciones de Pb subsuperficial obtenidas por FPXRF a una profundidad de 150-175 cm