



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

Determinación de los valores de fondo y línea base de metales pesados que permitan valorar la contaminación antropogénica de suelos en la zona minera de Matehuala, San Luis Potosí, México

TESIS

Que para optar por el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RIESGOS)

PRESENTA

OSCAR EDUARDO VALDEZ COMPARAN

TUTOR:

DR. FRANCISCO MARTÍN ROMERO
INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2021



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.



CÓDIGO DE ÉTICA

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Oscar Eduardo Valdez Comparan".

Oscar Eduardo Valdez Comparan

Agradecimientos

Al Dr. Francisco Martín Romero, por darme su voto de confianza al empezar este proceso, por su gran apoyo técnico y conocimiento que me permitieron realizar este trabajo.

Al Dr. Luis Gerardo Martínez Jardines, por todo el apoyo, tiempo, conocimiento y amistad que me brindó durante el proceso, además de hacerme un lugar en el laboratorio donde me sentí muy cómodo e integrado en todo momento.

Al Dr. Rafael del Rio Salas, por todos sus comentarios técnicos y apoyo en el proceso que me ayudo en muchas a ocasiones a orientar el rumbo de este trabajo.

A Ines Ramos, un amigo y compañero en el laboratorio, de quien aprendí mucho e hizo mi estancia en el laboratorio muy amena.

A Anaid, Alicia, Daniel, Laura, Astrid y todo el personal del Laboratorio de Geoquímica Ambiental por su amistad que hizo de mi estancia en el laboratorio muy satisfactoria, además de todo el tiempo y apoyo técnico que me brindaron, sin el cual el trabajo no hubiera sido posible.

A Julieth, Juanita, Stefania y Jack mis compañeros de maestría, que me apoyaron con sus trabajos, ideas, herramientas y conocimientos durante la realización de mi tesis.

A mis compañeros y profesores en las clases del posgrado de los cuales aprendí mucho.

Al CONACYT por la beca otorgada para cursar la maestría.

Al Instituto de Geología que me permitió formar parte de esta institución y utilizar sus instalaciones para llevar a cabo todos los experimentos requeridos en mi tesis.

A la Dra. Nadia Valentina Martínez Villegas y el IPICYT por el apoyo en el trabajo conjunto para el estudio de esta área.

Dedicatoria

A mis padres María y Juan, muchas gracias por su apoyo incondicional que me permitió estar llegar hasta aquí, por la confianza y el empeño que dedicaron a mi educación, por enseñarme a creer en mí mismo y dejarme emprender mi propio vuelo.

*A mi hermano Julio, muchas gracias por toda la paciencia que me has brindado y estar siempre ahí para apoyarme, eres mi modelo a seguir, espero seguir creciendo como persona con todo lo que me has enseñado.
A Kero, el más reciente integrante de la familia y mi fiel compañero durante esta etapa de mi vida.*

Finalmente, a todas las personas que forman o formaron parte de mi vida y me ayudaron a ser quien soy.

We're so full of Sugar, Honey, Ice, and Tea

Sugar, Honey, Ice, and Tea - Bring Me The Horizon

*Y, cuando escuchas la ciudad, te vuelves loco
mientras decides esperar qué va a pasar
cuando te absorbe la ciudad te vuelve polvo
y si decides regresar ¿qué va a pasar?
¿qué va a pasar?*

La Ciudad - Siddhartha ft. Zoé

Índice general

Índice de tablas.....	I
Índice de figuras.....	III
Resumen.....	1
Capítulo 1 - Introducción.....	5
Capítulo 2 - Marco teórico.....	7
2.1 - Elementos potencialmente tóxicos y metales pesados.....	7
2.2 - Información general de EPT de importancia medioambiental en el área de estudio: As, Cu, Pb y Zn.....	8
2.2.1 - Arsénico	8
2.2.2 - Cobre	9
2.2.3 - Plomo	11
2.2.4 - Zinc	12
2.3 - Valor de fondo y línea base.....	14
2.4 - Clasificación de los métodos para calcular los valores de fondo.....	15
2.4.1 - Métodos directos.....	15
2.4.2 - Métodos indirectos.....	15
2.4.3 - Métodos integrados.....	16
2.5 - Métodos de evaluación de contaminación antropogénica.....	17
2.5.1 - Índice de geoacumulación.....	18
2.5.2 - Factor de enriquecimiento.....	19
2.5.3 - Índice de carga de contaminación.....	19
2.6 - Hipótesis.....	19
2.7 - Objetivos.....	20
Capítulo 3 - Área de estudio.....	22
3.1 - Clima.....	25
3.2 - Marco geológico.....	26
3.3 - Tipo y uso de suelo.....	27
3.4 - Hidrografía.....	28
3.5 - Hidrogeología.....	29

3.6 - Flora y fauna.....	30
3.7 - Estudios medioambientales.....	30
3.7.1 - Suelos.....	30
3.7.2 - Sedimentos.....	33
3.7.3 - Agua.....	34
3.8 - Modelos de dispersión eólico e hidrográfico.....	36
Capítulo 4 - Caracterización de las fuentes de contaminación.....	38
4.1 - Metodología.....	38
4.1.1 - Muestreo.....	38
4.1.2 - Preparación de muestras.....	39
4.1.3 - Análisis de laboratorio.....	39
4.1.3.1 - Parámetros fisicoquímicos (Determinación de pH y CE).....	39
4.1.3.2 - Concentraciones totales por FRX.....	39
4.1.4 - Análisis estadístico.....	41
4.1.4.1 - Métodos univariados.....	41
4.1.4.2 - Métodos multivariados.....	41
4.2 - Resultados.....	44
4.2.1 - Jales superficiales.....	44
4.2.2 - Residuos de tostación.....	48
4.2.3 - Jales (Zanjas).....	50
4.2.4 - Escorias.....	55
4.2.5 - Polvos residuales de metalurgia.....	58
Capítulo 5 - Valores de fondo.....	61
5.1 - Metodología.....	61
5.1.1 - Muestreo.....	61
5.1.1.1 - Suelo.....	62
5.1.1.2 - Sedimentos.....	62
5.1.1.3 - Rocas.....	63
5.1.2 - Preparación de muestras.....	64
5.1.3 - Análisis estadístico.....	64

5.1.3.1 - Media + 2 desviaciones estándar ($A + 2\sigma$).....	64
5.1.3.2 - Mediana + 2 desviaciones absolutas con respecto a la mediana ($M + 2 MAD$).....	64
5.1.3.3 - Diagramas de cajas y bigotes con cercas interiores de Tukey (TIF).....	65
5.1.3.4 - Percentiles.....	66
5.2 - Resultados.....	66
5.2.1 - Suelos.....	66
5.2.1.1 - Suelos - Datos en bruto.....	66
5.2.1.2 - Suelos - Datos seleccionados.....	73
5.2.1.3 - Suelos - Análisis por tipo de litología.....	81
5.2.2 - Sedimentos.....	84
5.2.2.1 - Selección de datos.....	84
5.2.3 - Rocas.....	89
5.2.3.1 - Litologías.....	90
5.2.3.2 - Mineralización.....	91
Capítulo 6 - Área de influencia.....	93
6.1 - Metodología.....	93
6.1.1 - Muestreo.....	93
6.1.2 - Preparación de muestras.....	94
6.2 - Resultados.....	94
6.3 - Evaluación de la contaminación antropogénica.....	104
6.3.1 - Índice de geoacumulación.....	104
6.3.2 - Factor de enriquecimiento.....	113
Capítulo 7 - Conclusiones.....	122
Bibliografía.....	124
Anexos.....	131
Anexo 1 - Coordenadas del muestreo de jales superficiales y zanjas.....	131
Anexo 2 - Tabla de datos de análisis de FRX y parámetros fisicoquímicos de muestras de jales, residuos de tostación y zanjas.....	132
Anexo 3 - Detalles del muestreo de suelos y memoria fotográfica.....	137
Anexo 4 - Detalles del muestreo de sedimentos y memoria fotográfica.....	144

Anexo 5 - Detalles del muestreo de rocas y memoria fotográfica.....	149
Anexo 6 - Tabla de datos de análisis de FRX y parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo....	153
Anexo 7 - Grafico de cajas y bigotes de concentraciones de elementos por tipo de litología.....	156
Anexo 8 - Tabla de datos de análisis de FRX de muestras de sedimentos, parámetros fisicoquímicos y valores del SGM.....	162
Anexo 9 - Tabla de datos de análisis de FRX y parámetros fisicoquímicos de muestras de roca...	167
Anexo 10 - Diagramas de cajas y bigotes (sin cercas interiores) de litologías y mineralización....	169
Anexo 11 - Detalles del muestreo del área de influencia y memoria fotográfica.....	174
Anexo 12 - Tabla de datos de análisis de FRX y parámetros fisicoquímicos de muestras de la zona de influencia.....	178
Anexo 13 - Tablas de criterios para evaluar la contaminación.....	180

Índice de tablas

Tabla 1. EPT con los que están impactados distintas comunidades en México.....	6
Tabla 2. Tabla de desventajas y ventajas de los métodos de determinación de valores de fondo.....	17
Tabla 3. Clases que comprenden el índice de geoacumulación.....	18
Tabla 4. Clases que comprenden el factor de enriquecimiento.....	19
Tabla 5. Clases que comprenden el índice de carga de contaminación.....	20
Tabla 6. Clasificación de valores de NDVI.....	30
Tabla 7. Tabla de concentraciones de metales pesados en suelos de la zona de Villa de la Paz – Matehuala.....	31
Tabla 8. Tabla de concentraciones de promedio de metales pesados en sedimentos de la zona de Villa de la Paz – Matehuala.....	34
Tabla 9. Tabla de concentraciones de promedio de As del sistema Cerrito Blanco.....	35
Tabla 10. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de jales superficiales.....	45
Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos en jales superficiales.....	46
Tabla 12. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de residuos de tostación.....	48
Tabla 13. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos en residuos de tostación.....	49
Tabla 14. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de escorias.....	55
Tabla 15. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos en escorias.....	56
Tabla 16. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de polvos residuales de metalurgia.....	58
Tabla 17. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos en polvos residuales de metalurgia.....	59
Tabla 18. Tabla de principales parámetros estadísticos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de suelo en bruto.....	67
Tabla 19. Comparativa de valores de fondo entre $A + 2\sigma$ y $M + 2 MAD$ en muestras de suelo en bruto...	68
Tabla 20. Comparativa de valores de fondo obtenidos con TIF de datos en bruto y normalizados con logaritmos.....	70
Tabla 21. Comparativa de valores de fondo obtenidos por P_{95} y P_{98} de datos en bruto y normalizados con logaritmos.....	72
Tabla 22. Comparativa de valores de fondo de suelos obtenidos de todos los métodos en datos en bruto..	73
Tabla 23. Tabla de principales parámetros estadísticos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de suelo seleccionadas.....	76

Tabla 24. Comparativa de valores de fondo entre $A + 2\sigma$ y M y 2 MAD en muestras de suelo seleccionadas.....	76
Tabla 25. Comparativa de valores de fondo obtenidos con TIF de datos seleccionados y normalizados con logaritmos.....	79
Tabla 26. Comparativa de valores de fondo obtenidos por P_{95} y P_{98} de datos seleccionados y normalizados con logaritmos.....	80
Tabla 27. Comparativa de valores de fondo de suelos obtenidos de todos los métodos en datos seleccionados.....	81
Tabla 28. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de depósitos aluviales.....	82
Tabla 29. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de calizas grises.....	82
Tabla 30. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de caliza-lutitas.....	82
Tabla 31. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de conglomerado polimíctico.....	82
Tabla 32. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de rocas lacustres (Yeso).....	83
Tabla 33. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de lutita-arenisca.....	83
Tabla 34. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de sedimentos seleccionadas.....	85
Tabla 35. Comparativa de valores de fondo entre $A + 2\sigma$ y M y 2 MAD en muestras de sedimentos seleccionadas.....	85
Tabla 36. Comparativa de valores de fondo entre TIF y P_{95} y P_{98} en muestras de sedimentos seleccionadas.....	88
Tabla 37. Comparativa de valores de fondo de sedimentos obtenidos de todos los métodos en datos seleccionados.....	89
Tabla 38. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de calizas grises.....	90
Tabla 39. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de caliza-lutita.....	91
Tabla 40. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de conglomerados polimícticos.....	92
Tabla 41. Tabla de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de la muestra de Lutita-Arenisca.....	92
Tabla 42. Tabla de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de la zona mineralizada.....	92
Tabla 43. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de la zona de influencia.....	95

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de Pourbaix, para compuestos de As.....	9
Figura 2. Diagrama de Pourbaix, para el sistema $\text{Cu} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + \text{S} + \text{CO}_2$	10
Figura 3. Diagrama de Pourbaix, para compuestos de Pb.....	12
Figura 4. Diagrama de Pourbaix, para compuestos de Zn.....	13
Figura 5. Métodos para evaluación de los valores de fondo.....	15
Figura 6. Ubicación geográfica del área de estudio.....	22
Figura 7. Modelo 3D del Valle de Matehuala.....	23
Figura 8. Mapa de elementos de impacto antropogénico.....	24
Figura 9. Modelo conceptual de riesgo ambiental.....	25
Figura 10. Gráfica de precipitación [mm] de la zona Matehuala - Villa de la Paz.....	25
Figura 11. Rosa de los vientos de la región de Matehuala - Villa de la Paz.....	25
Figura 12. Mapa geológico del Valle de Matehuala.....	26
Figura 13. Mapa edafológico del Valle de Matehuala.....	27
Figura 14. Mapa Hidrográfico del Valle de Matehuala.....	28
Figura 15. Mapa de sistema de canales de Matehuala.....	29
Figura 16. Mapa de NDVI del Valle de Matehuala.....	31
Figura 17. Mapa de distribución de concentraciones de As generado con el método Kriging.....	32
Figura 18. Mapa de distribución de concentraciones de Pb generado con el método Kriging.....	32
Figura 19. Mapa de distribución de concentraciones de Cu generado con el método Kriging.....	33
Figura 20. Mapa de distribución de concentraciones de Zn generado con el método Kriging.....	33
Figura 21. Mapa de distribución de concentraciones de As del sistema Cerrito Blanco generado con el método Kriging.....	35
Figura 22. Modelo lógico-conceptual de la generación de los modelos de dispersión eólica e hidrográfica.....	36
Figura 23. Modelo de dispersión eólica del Valle de Matehuala.....	37
Figura 24. Modelo de dispersión hidrográfico del Valle de Matehuala.....	37
Figura 25. Mapa de distribución de puntos del muestreo de jales superficiales.....	38
Figura 26. Mapa de distribución de puntos del muestreo de zanjas en jales.....	39
Figura 27. Equipo instrumental utilizado para el análisis de las muestras.....	40

Figura 28. Diagramas de correlación con diferentes valores de coeficiente de correlación de Pearson (r).....	42
Figura 29. Ejemplo de dendrograma que se genera a mediante un análisis de Hierarchical clustering.....	42
Figura 30. Diagrama esquemático del funcionamiento de agrupación por medio de UPGM.....	43
Figura 31. Estructura característica de un diagrama ternario.....	44
Figura 32. Secuencia esquemática de figuras que muestra el proceso de generación de las elipses para el análisis de correlación.....	45
Figura 33. Coeficientes de correlación de Pearson de los elementos en jales superficiales representados mediante elipses.....	46
Figura 34. Hierarchical clustering de las muestras de jales superficiales.....	47
Figura 35. Diagrama ternario de jales superficiales generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn.....	47
Figura 36. Coeficientes de correlación de Pearson de los elementos en residuos de tostación representados mediante elipses.....	49
Figura 37. Hierarchical clustering de las muestras de residuos de tostación.....	50
Figura 38. Diagrama ternario de residuos de tostación generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn.....	50
Figura 39. Gráfico de barras de las concentraciones de As en zanjas.....	51
Figura 40. Gráfico de barras de las concentraciones de Cu en zanjas.....	52
Figura 41. Gráfico de barras de las concentraciones de Pb en zanjas.....	53
Figura 42. Gráfico de barras de las concentraciones de Zn en zanjas.....	54
Figura 43. Coeficientes de correlación de Pearson de los elementos en escorias representados mediante elipses.....	56
Figura 44. Hierarchical clustering de las muestras de escorias.....	57
Figura 45. Diagrama ternario de escorias generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn.....	57
Figura 46. Coeficientes de correlación de Pearson de los elementos en polvos residuales de metalurgia, representados mediante elipses.....	59
Figura 47. Hierarchical clustering de las muestras de polvos residuales de metalurgia.....	60
Figura 48. Diagrama ternario de polvos residuales de metalurgia generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn.....	60
Figura 49. Cuadrícula del área de estudio dividida en secciones de 3 x 3 [km].....	61
Figura 50. Mapa de distribución de puntos del muestreo de suelos.....	62
Figura 51. Mapa de distribución de puntos del muestreo de sedimentos.....	63

Figura 52. Mapa de distribución de puntos del muestreo de rocas.....	63
Figura 53. Diagrama esquemático de elementos del diagrama de cajas y bigotes con uso de cercas interiores.....	65
Figura 54. Comparativa de valores de fondo de suelos en bruto mediante gráficas de barras y bigotes....	68
Figura 55. Diagrama de cajas y bigotes con cercas interiores de valores de fondo en suelo de muestras en bruto (PT1).....	69
Figura 56. Diagrama de cajas y bigotes con cercas interiores de valores de fondo en suelo de muestras en bruto (PT2).....	70
Figura 57. Gráfico de los percentiles de los datos en bruto y normalizados con logaritmos de As, Cu, Mn y Pb.....	71
Figura 58. Gráfico de los percentiles de los datos en bruto y normalizados con logaritmos de Zn.....	72
Figura 59. Zona de influencia de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	74
Figura 60. Muestras de suelo con influencia antropogénica y anomalías geoquímicas.....	74
Figura 61. Comparativa de concentraciones de metales en suelos generados a partir de skarn (Cu-Au) y veta (Pb-Zn-Ag).....	75
Figura 62. Diagrama de cajas y bigotes con cercas interiores de valores de fondo en suelo con muestras seleccionadas (PT1).....	77
Figura 63. Diagrama de cajas y bigotes con cercas interiores de valores de fondo en suelo con muestras seleccionadas (PT2).....	78
Figura 64. Gráfico de los percentiles de los datos seleccionados y normalizados con logaritmos de As y Cu.....	79
Figura 65. Gráfico de los percentiles de los datos seleccionados y normalizados con logaritmos de Mn, Pb y Zn.....	80
Figura 66. Mapa de muestras excluidas de sedimentos del análisis de valores de fondo.....	84
Figura 67. Comparativa de valores de fondo de sedimentos seleccionados mediante gráficas de barras y bigotes.....	86
Figura 68. Diagrama de cajas y bigotes con cercas interiores de valores de fondo en sedimentos seleccionados.....	87
Figura 69. Gráfico de los percentiles de los datos de sedimentos seleccionados de As, Cu, Mn, Pb y Zn.....	88
Figura 70. Mapa de ubicación geográfica de las muestras de suelo para la caracterización la zona de influencia.....	93
Figura 71. Diagrama ternario de muestras de suelo de la zona de influencia generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn.....	94

Figura 72. Diagrama ternario de muestras de suelo de la zona de influencia y fuentes de contaminación generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn.....	95
Figura 73. Mapa de concentración de As en suelos de la zona de influencia con respecto al promedio....	96
Figura 74. Mapa de concentración de As en suelos de la zona de influencia con respecto a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.....	97
Figura 75. Mapa de concentración de As en suelos de la zona de influencia con respecto al valor de fondo (TIF).....	98
Figura 76. Mapa de concentración de Pb en suelos de la zona de influencia con respecto al promedio.....	99
Figura 77. Mapa de concentración de Pb en suelos de la zona de influencia con respecto a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.....	100
Figura 78. Mapa de concentración de Pb en suelos de la zona de influencia con respecto al valor de fondo (TIF).....	101
Figura 79. Mapa de concentración de Zn en suelos de la zona de influencia con respecto al promedio..	102
Figura 80. Mapa de concentración de Zn en suelos de la zona de influencia con respecto al valor de fondo (TIF).....	103
Figura 81. Mapa de índice de geoacumulación de As en suelos a partir de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	105
Figura 82. Mapa de índice de geoacumulación de As en suelos a partir del valor de fondo de TIF de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	106
Figura 83. Mapa de índice de geoacumulación de As en suelos a partir del valor de fondo de M + 2 MAD de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	107
Figura 84. Mapa de índice de geoacumulación de As en suelos a partir del valor promedio de elementos en suelos de Alekseenko & Alekseenko (2014) de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	108
Figura 85. Mapa de índice de geoacumulación de Pb en suelos a partir de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	109
Figura 86. Mapa de índice de geoacumulación de Pb en suelos a partir del valor de fondo de TIF de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	110
Figura 87. Mapa de índice de geoacumulación de Pb en suelos a partir del valor de fondo de M + 2 MAD de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	111
Figura 88. Mapa de índice de geoacumulación de Pb en suelos a partir del valor promedio de elementos en suelos de Alekseenko & Alekseenko (2014) de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	112
Figura 89. Mapa de factor de enriquecimiento de As en suelos a partir de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	114
Figura 90. Mapa de factor de enriquecimiento de As en suelos a partir del valor de fondo de TIF de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	115

Figura 91. Mapa de factor de enriquecimiento de As en suelos a partir del valor de fondo de M + 2 MAD de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	116
Figura 92. Mapa de factor de enriquecimiento de As en suelos a partir del valor promedio de elementos en suelos de Alekseenko & Alekseenko (2014) de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	117
Figura 93. Mapa de factor de enriquecimiento de Pb en suelos a partir de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	118
Figura 94. Mapa de factor de enriquecimiento de Pb en suelos a partir del valor de fondo de TIF de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	119
Figura 95. Mapa de factor de enriquecimiento de Pb en suelos a partir del valor de fondo de M + 2 MAD de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	120
Figura 96. Mapa de factor de enriquecimiento de Pb en suelos a partir del valor promedio de elementos en suelos de Alekseenko & Alekseenko (2014) de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.....	121

Resumen

En la actualidad los estudios de contaminación de metales pesados son una prioridad ambiental a nivel internacional debido a que algunos de estos están considerados como elementos potencialmente tóxicos (EPT) y pueden generar impactos negativos a la salud humana y el medio ambiente. En las zonas minero-metalúrgicas se han reportado numerosos casos de contaminación de esta índole, por lo que para evaluar el impacto antropogénico se requiere del uso de los valores de fondo. La determinación de estos valores es un proceso complejo debido a la naturaleza geológica de estos sitios, ya que se caracterizan por valores elevados de estos metales, dificultando establecer la línea de lo natural y lo antropogénico. La legislación ambiental mexicana, así como otros organismos internacionales proponen el uso del promedio de muestras no impactadas como valores de fondo, sin embargo, dada la importancia de estos es un método muy simplista que puede llevarnos a subestimar o sobrestimar la contaminación antropogénica.

En este trabajo se propone una metodología para el cálculo de valores de fondo de los elementos potencialmente tóxico de interés ambiental (As, Cu, Pb y Zn) y otros elementos (Ba, Ca, Cr, Fe, Mn, Ti, V) en una zona minera, localizada en Matehuala, San Luis Potosí, México, donde históricamente y en la actualidad, se han desarrollado actividades minero-metalúrgicas, y se ha reportado la dispersión de residuos, generados por estas industrias, con la subsecuente contaminación del medio abiótico.

Para cumplir con este propósito se identificaron y caracterizaron los residuos minero-metalúrgicos que constituyen la fuente de contaminación de EPT, y cuya dispersión ha contaminado el medio abiótico de la zona.

Además, se muestrearon y caracterizaron suelos, sedimentos y rocas fuera de la zona de influencia, de la posible dispersión de los residuos minero-metalúrgicos, con el fin de determinar los valores de fondo, y/o línea base, de los EPT. Adicionalmente, se muestrearon y caracterizaron suelos y sedimentos dentro de la zona de influencia delimitada, con el fin de valorar el impacto ambiental de los residuos, utilizando como valores de referencia los valores de fondo y/o línea base, determinados en este estudio. Es importante señalar que la delimitación de estas zonas dentro y fuera de la influencia se realizó a través de la aplicación de modelos de dispersión hídrica, eólica y utilizando información publicada como datos geoquímicos, características geológicas, hidrológicas y climáticas de la zona de estudio.

Las muestras obtenidas fueron analizadas con el analizador portátil de fluorescencia de rayos X (FRX) "Niton XL3t Ultra", también se determinaron los valores de pH y conductividad eléctrica (CE). Se realizó el tratamiento estadístico de datos para determinar los valores de fondo: promedio + dos desviaciones estándar ($A+2\sigma$), mediana + desviación absoluta con respecto a la mediana ($M + 2 MAD$), Tuckey inner fences (TIF), percentil 95 (P95) y percentil 98 (P98).

Los resultados obtenidos mostraron que los métodos $M + 2 MAD$ y TIF son los más adecuados para la determinación de fondos, el primero debido a su carácter conservador y el segundo porque nos permite identificar posibles datos anómalos. Los diagramas ternarios mostraron resultados favorables ya que no solo nos permite la caracterización de fuentes de contaminación, además las asocia con los posibles impactos antropogénicos que estas tienen en el

medio abiótico, ya que las muestras cuyo comportamiento geoquímico es similar al de las fuentes, también poseen una correlación espacial.

Finalmente se utilizaron los valores de fondo previamente obtenidos, las concentraciones máximas permisibles establecidas por la NOM-147SEMARNAT/SSA1-2004 y un valor promedio de suelo de la corteza terrestre de la literatura, como valores de fondo para calcular el índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento de las muestras obtenidas en la zona, de este análisis se pudo concluir que la concentración de metales pesados de la zona minera de Matehuala, San Luis Potosí, México es mucho más elevada que la de un suelo promedio de la corteza terrestre, en lo referente a la NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004 si las concentraciones máximas permisibles se utilizan como valores de fondo, en el caso del As se sobrestima el impacto antropogénico en el sitio, por el contrario en el caso del Pb este es subestimado.

Abstract

Currently, heavy metal contamination studies are an international environmental priority because some of these are considered potentially toxic elements (PTE) and can cause negative impacts on human health and the environment. Numerous cases of such contamination have been reported in mining-metallurgical areas, thus the use of background values is required to evaluate the anthropogenic impact. The determination of these values is a complex process due to the geological nature of these sites, since they are characterized by high values of these metals, making it difficult to establish the base line between natural and anthropogenic. Mexican environmental legislation, as well as other international organizations, proposes the use of the average of non-impacted samples as background values. However, given the importance of these values, this method is very simplistic and can lead us to underestimate or overestimate the anthropogenic contamination.

This work proposes a methodology for the calculation of background values of potentially toxic elements of environmental interest (As, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Pb, Ti, V and Zn) in a mining zone, located in Matehuala, San Luis Potosi, Mexico; where, historically, and nowadays, mining-metallurgical activities have been developed; and where it has been reported the dispersion of waste, generated by these industries; with the subsequent contamination of the abiotic environment.

In order to fulfill this purpose, the mineral-metallurgical wastes that constitute the source of PTE contamination, and whose dispersion has contaminated the abiotic environment of the area, were identified and characterized.

In addition, soils, sediments and rocks outside the area of influence of the possible dispersion of the mining-metallurgical residues were sampled and characterized in order to determine the background values, and/or baseline, of the PTE. Additionally, soils and sediments were sampled and characterized within the delimited influence zone, in order to evaluate the environmental impact of the wastes, using as reference values the background and/or baseline values determined in this study. It is important to point out that the delimitation of these areas inside and outside the influence was carried out through the application of hydric and aeolian dispersion models and using published information such as geochemical data, geological, hydrological and climatic characteristics of the study area.

The collected samples were analyzed with the portable X-ray fluorescence analyzer (XRF) "Niton XL3t Ultra", also the pH and electrical conductivity (EC) values were determined. The statistical treatment of data was carried out to determine the background values: mean + two standard deviations ($A+2\sigma$), median + absolute deviation from the median ($M + 2 \text{ MAD}$), Tuckey inner fences (TIF), 95th percentile (P95) and 98th percentile (P98).

The results obtained showed that the $M + 2 \text{ MAD}$ and TIF methods are the most suitable for the determination of background values; the first one due to its preservative nature and the second one because it allows us to identify possible anomalous data. The ternary diagrams showed favorable results since it not only allows us to characterize the sources of pollution, but also associates them with the possible anthropogenic impacts that they have in the abiotic environment,

because the samples whose geochemical behavior is similar to that of the sources, also have a spatial correlation.

Finally, the previously obtained background values, the maximum permissible concentrations established by NOM-147SEMARNAT/SSA1-2004 and an average crustal soil value from the literature were used as background values to calculate the geoaccumulation index and the enrichment factor of the samples obtained in the area, from this analysis it was possible to conclude that the concentration of heavy metals in the mining area of Matehuala, San Luis Potosi, Mexico is much higher than that of an average soil of the earth's crust, in relation to NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004 if the maximum permissible concentrations are used as background values, in the case of As the anthropogenic impact on the site is overestimated, on the contrary in the case of Pb this is underestimated.

1. - Introducción

A lo largo de su historia, México ha sido reconocido como un país con una gran riqueza en recursos naturales. La minería y metalurgia desde la época colonial son industrias de gran tradición que ayudaron al desarrollo económico de muchas regiones del país. A través de ellas podemos obtener minerales metálicos, no metálicos, combustibles, piedras preciosas y materiales para la construcción, que son necesarios para el aumento creciente de la población del país (CONAPO, 2018).

Sin embargo, hasta finales del siglo XX no existía una legislación ambiental que regulara los impactos de las actividades minero-metalúrgicas (Bárcenas & Galicia, 2011). Tampoco se tenía conciencia acerca de la degradación ambiental que la explotación, beneficio y refinación de estos recursos minerales había provocado, principalmente debido al manejo y disposición inadecuados de los residuos generados (Moreno et al., 2012); (Jiménez & Olvera-Balderas, 2019) que suelen ser depositados a cielo abierto y sufren los procesos del intemperismo (Hernández-Acosta et al., 2009) lo que derivó en la contaminación de la atmósfera, suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas con elementos potencialmente tóxicos (EPT) entre los que destacan principalmente el As y los metales pesados (Razo et al., 2004); (Martínez-Villegas et al., 2013); (Jiménez & Olvera-Balderas, 2019).

Los EPT son un conjunto de elementos de naturaleza tóxica cuya peligrosidad varía en función de su concentración, límite de exposición y especiación (Bhat & Khan, 2011); (López-Sánchez, 2013). Los EPT de mayor importancia ambiental y comúnmente presentes en sitios contaminados son el arsénico (As), berilio (Be), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), plomo (Pb), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (V) y zinc (Zn) (López-Sánchez, 2013).

Así mismo, los metales pesados son elementos naturales caracterizados por su alta masa atómica y densidad, aunque típicamente ocurren en concentraciones bastante bajas, se distribuyen en toda la corteza de nuestro planeta (Koller & Saleh, 2018). Actualmente existe discusión acerca de la definición del término “metal pesado” dado que existen variaciones dependiendo del campo de estudio en el cual se emplee, comúnmente se utiliza una densidad de al menos 5 [g/cm³] para diferenciar un metal “pesado” de otros metales “ligeros” (Koller & Saleh, 2018). Otras definiciones plantean que son aquellos con peso atómico mayor que el del hierro (Fe) 55.85 [g/mol] (Galán & Romero, 2008). Los más habituales en la literatura son plomo (Pb), níquel (Ni), cromo (Cr), cadmio (Cd), mercurio (Hg), zinc (Zn), cobre (Cu), y en algunas ocasiones hierro (Fe) (Masindi & Muedi, 2018).

La contaminación por EPT es un problema global, dado que los iones metálicos no pueden degradarse biológicamente y persisten en el medio ambiente. Estos iones, son tóxicos y peligrosos para la salud humana, por los procesos de bioconcentración, bioacumulación y biomagnificación en la cadena alimentaria (Özsin et al., 2019), o los impactos de la bioaccesibilidad de estos en vías respiratorias o de manera tóxica. Además, las propiedades fisicoquímicas de los suelos contaminados con metales pesados tienden a inhibir los procesos de formación del suelo y el crecimiento de plantas, lo cual a largo plazo deriva en la degradación del suelo (Wong, 2003).

En México, durante las últimas décadas, se han reportado problemas serios debido a altas concentraciones de metales en zonas urbanas, aguas superficiales, subterráneas y la atmósfera alrededor de zonas minero-metalúrgicas. En su mayoría se encuentran localizados cerca de los principales terreros, plantas de beneficio, presas de jales, complejos metalúrgicos de fundición y refinación, y plantas de fundición secundarias dedicadas al reciclamiento de los metales. Los estados donde se ha informado de estos impactos ambientales o daños a la salud pública incluyen distintas poblaciones de Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Nuevo León, San Luis Potosí, Sonora, Sinaloa y Zacatecas (Jiménez & Olvera-Balderas, 2019).

La comunidad científica ha reportado que los EPT con los que están impactados cada una de estas localidades son muy variados (tabla 1); (Jiménez & Olvera-Balderas, 2019), esto se debe a que su presencia recae en la naturaleza geológica de cada sitio en particular (Calmus et al., 2018). Ante este panorama es necesario determinar el fondo geoquímico en las regiones minero-metalúrgicas para lograr evaluaciones ambientales más realistas (Calmus et al., 2018).

Localidad (Estado)	EPT
Aguascalientes (Aguascalientes)	Cd, Cu, Pb, Zn.
Chihuahua, Parral, Naica, Sta. Barbara (Chihuahua).	Ag, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn.
Torreón (Coahuila).	As, Cd, Pb, Zn.
Bermejillo, Cerro de Mercado (Durango)	As, Cd, Pb, Zn.
Zacazonapan (Estado De México).	Ag, As, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Si, Sr, Ti, V, Zn.
Guanajuato (Guanajuato).	As, Cd, Co, Cu, Pb, Hg, Se, Zn
Taxco (Guerrero).	Ag, As, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Tl, V.
Zimapán (Hidalgo).	As.
Monterrey (Nuevo León).	As, Cd, Pb.
San Luis Potosí, Villa de La Paz y Matehuala (San Luis Potosí).	Ag, As, Au, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Tl, V, Zn.
Nacozari (Sonora)	Mn, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Zr, Ba, Hg, Pb.
Río Baluarte, Río San Lorenzo (Sinaloa).	Ag, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb y Zn.
Zacatecas, Sombrerete, Fresnillo, Noria de Ángeles, Guadalupe (Zacatecas).	As, Cd, Cr, Hg, Pb, Zn.

Tabla 1. EPT con los que están impactados distintas comunidades en México (Modificado de Jiménez & Olvera-Balderas, 2019).

Actualmente distintas agencias u organismos gubernamentales como la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) cuentan con valores de referencia para estimar los impactos al ambiente, sin embargo, al no considerarse la naturaleza geológica, la utilización de estos valores puede sobrestimar o subestimar el impacto antropogénico real que ha experimentado un determinado sitio (SEMARNAT, 2007).

Esto ha generado que el término “valor de fondo” este comenzando a tener un auge en los últimos años (Gałuszka & Migaszewski, 2011). Se encuentra citado en innumerables estudios, sin embargo, parece no existir un consenso acerca de una metodología que nos permita calcularlos apropiadamente, lo que ha dificultado su implementación (Matschullat et al., 2000). La SEMARNAT utiliza el promedio de muestras de sitios no impactados como valor de fondo, si bien esto puede darnos una idea acerca de la naturaleza geoquímica del sitio, su eficacia puede mejorarse enormemente aplicando herramientas estadísticas más robustas en conjunto al análisis espacial. (SEMARNAT, 2007)

Por lo que el presente trabajo de tesis hace uso de herramientas de análisis espacial en conjunto con distintos instrumentos estadísticos, con la finalidad de obtener una metodología adecuada para el cálculo de valores de fondo en zonas minero-metalúrgicas.

2. - Marco teórico

2.1 - Elementos potencialmente tóxicos y metales pesados

El termino EPT surge como una alternativa al concepto de “metal pesado” para describir un conjunto de contaminantes inorgánicos compuestos por metales, metaloides, lantánidos y actínidos, que exhiben propiedades metálicas, cuyo potencial tóxico depende de su especiación y concentración (adquieren toxicidad si se supera un valor umbral) (Bhat & Khan, 2011). Algunos carecen de funciones vitales conocidas (como el As, Cd, Hg, Pb, Tl), por el contrario, otros en concentraciones bajas son esenciales o beneficiosos para los seres vivos (como el Cu, Fe, Se, S) (Martínez-Jardines, 2018).

Los EPT en suelos se pueden encontrar en fase acuosa (solución de poro) o fase sólida. En fase acuosa estos pueden existir como complejos asociados a ligandos orgánicos e inorgánicos o como iones libres. Mientras que, en fase sólida, estos pueden ser retenidos por los componentes orgánicos e inorgánicos del suelo mediante distintos mecanismos de sorción (absorción, adsorción, coprecipitación e intercambio catiónico) o presentarse como minerales o solidos cristalinos y/o amorfos (Martínez-Jardines, 2018).

La mayoría de los estudios de evaluación de riesgo de EPT han tomado como base la concentración total de estos en las muestras de suelos como parámetros medio ambientales, sin embargo, en un escenario real, son sus fracciones móviles y biodisponibles los factores a considerar para evaluar el riesgo real a la salud humana, estos últimos están asociados a las condiciones de pH (acidez) y Eh (potencial óxido-reducción) del sitio (Gope et al., 2017); (Martínez-Jardines, 2018).

Los EPT pueden producir afectaciones graves a la salud humana, ya que no son biodegradables y se biomagnifican en los tejidos del cuerpo, produciendo daños que incluyen deterioro en el sistema nervioso, intoxicación, efectos renales, fracturas de huesos, problemas en el sistemas inmunológico, disminución del cociente intelectual (IQ) en infantes, entre otros. Las potenciales vías de exposición para la entrada de los EPT a los seres humanos son la inhalación, la ingestión y la absorción dérmica (Gope et al., 2017). Al ingresar al cuerpo humano participan en procesos metabólicos que terminan por liberarlos en forma de cationes, estos son estructuralmente

muy similares entre sí, tanto en sus diámetros iónicos, como en sus cargas. Esta semejanza estructural hace que ciertos cationes metálicos puedan desplazar a otros con funciones fisiológicas importantes en la células. Algunos ejemplos son el reemplazo de Zn^{2+} por Ni^{2+} , o bien el Be^{2+} por Mg^{2+} en algunas enzimas, éstas se desactivan y pierden su funcionalidad, o la sustitución de Ca^{2+} por otros metales en proteínas de la membrana celular provocando desórdenes funcionales (López-Sánchez, 2013).

2.2 - Información general de EPT de importancia medioambiental en el área de estudio: As, Cu, Pb y Zn

2.2.1 - Arsénico

Es un elemento que ha sido clasificado como metaloide, está ubicado en el grupo 15 (VA) de la tabla periódica y se encuentra presente en la corteza terrestre con una abundancia de 1.7 [mg/kg], su masa atómica es de 74.92 [g/mol], su número atómico es el 33 y sus estados de oxidación más comunes son -3, +3 y +5 (Evanko & Dzombak, 1997); (Yaroshevsky, 2006); (López-Sánchez, 2013).

Ha sido empleado en la industria electrónica para la fabricación de semiconductores, en la industria química, para la creación de preservantes de madera, pesticidas, herbicidas, fungicidas, y como catalizador, también es utilizado como medicamento para el tratamiento de la sífilis, soriasis o empleado como antiparasitario (López-Sánchez, 2013); (Martínez-Jardines, 2018).

En lo concerniente a sus efectos en la salud humana, posee efectos cancerígenos y no cancerígenos. Entre los efectos carcinógenos se ha reportado cáncer de pulmón por inhalación y cáncer de hígado o piel por su ingesta. Por otro lado, entre sus efectos no cancerígenos asociados a su inhalación están la irritación de la piel y membranas mucosas que ocasiona dermatitis, conjuntivitis, faringitis y rinitis. De su ingesta se puede desarrollar intoxicación crónica (arsenicosis), efectos gastrointestinales, anemia, neuropatía periférica, lesiones en piel, hiperpigmentación, gangrena de las extremidades, lesiones vasculares y daño hepático o renal (Martínez-Jardines, 2018); (Sierra-Salamanca, 2020).

En la naturaleza se presenta principalmente en sulfuros como la arsenopirita ($FeAsS$), el oropimento (As_2S_3) o el realgar ($\alpha-As_4S_4$), y su sulfosales como la enargita (Cu_3AsS_4) y la tenantita ($Cu_{12}As_4S_{13}$). Estos minerales están presentes en los depósitos minerales de manera natural y abundante, por lo que su explotación puede derivar en la liberación de este metaloide y consecuentemente provocar la contaminación del ecosistema. Por otro lado, el As puede ser liberado de manera natural al ambiente mediante erupciones volcánicas o su lixiviación a partir de rocas que afloran en la corteza terrestre (Martínez-Jardines, 2018).

En el ambiente el As se presenta en especies termodinámicamente estables, en suelos y cuerpos de agua puede ser encontrados como arseniatos (AsO_4^{3-}) o arsenitos (AsO_3^{3-}), esto dependerá de las condiciones de pH y Eh del medio abiótico (figura 1). En condiciones oxidantes, la especie predominante es el As(V), estos arseniatos pueden ser: $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ y AsO_4^{3-} . En condiciones reductoras, el As(III) es la forma dominante, en especies de arsenito pueden ser: $H_3AsO_3^0$, $H_2AsO_3^-$ y $HAsO_3^{2-}$ (López-Sánchez, 2013); (Martínez-Jardines, 2018).

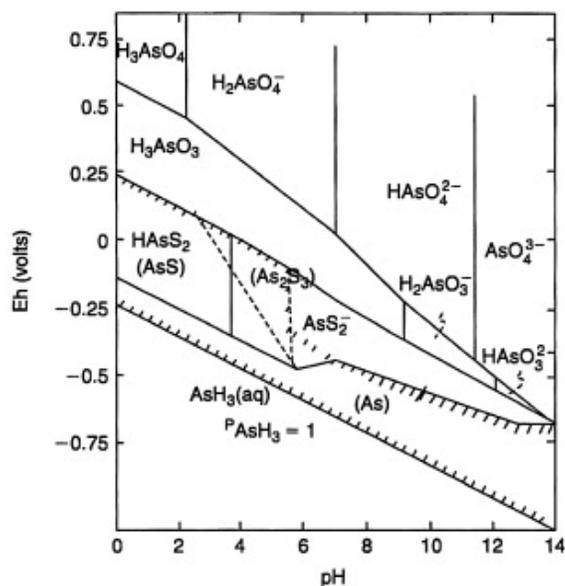


Figura 1. Diagrama de Pourbaix, para compuestos de As a 25[°C] y 1 [atm], a una concentración de As 10^{-5} [M] y $S^{2-} 10^{-3}$ [M] (Martínez-Jardines, 2018).

Las especies de As (III) son más tóxicas y móviles que las de As (V). Esto se debe principalmente a que, en el intervalo de valores comunes de pH en agua y suelos, las especies de As (V) están cargadas negativamente por lo que son atraídas electrostáticamente hacia las superficies de sólidos, por el contrario, las especies de As (III) son eléctricamente neutras y a consecuencia de esto, no pueden ser atraídas electrostáticamente (Martínez-Jardines, 2018).

2.2.2 - Cobre

Es un elemento que ha sido clasificado como metal de transición, pertenece al grupo 11 (IB) de la tabla periódica y se encuentra presente en la corteza terrestre con una abundancia de 47 [mg/kg], su masa atómica es de 63.54 [g/mol], su número atómico es el 29, sus estados de oxidación más comunes son +1 y +2, aunque también puede presentarse con +3 y +4 (Evanko & Dzombak, 1997); (Yaroshevsky, 2006); (López-Sánchez, 2013).

Históricamente fue uno de los primeros metales en ser trabajados por el hombre, en aleación con el estaño formó el bronce, el cual fue empleado en la fabricación de utensilios y monedas. En la actualidad se utiliza principalmente en la industria eléctrica-electrónica por su capacidad de conducir el calor y la electricidad, en la industria de la construcción para tejados y plomería, además algunos compuestos del Cu son componentes esenciales en la fabricación de fungicidas, insecticidas y pigmentos, también se emplea como catalizador en diversas industrias (López-Sánchez, 2013).

En lo concerniente a sus efectos en la salud humana, el Cu es uno de los micronutrientes esenciales, los estudios y datos en la literatura indican que existen mayores riesgos por la deficiencia en su ingesta que por su exceso, sin embargo, si se encuentra en exceso, se pueden presentar problemas asociados a su toxicidad, algunos efectos gastrointestinales como dolor abdominal, hematemesis, melena, ictericia, anorexia, sed severa, diarrea y vómitos asociados a una gastropatía erosiva, síntomas neurológicos como depresión, fatiga, irritabilidad y dificultad para

concentrarse. En las formas más graves, la toxicidad del Cu provoca rabdomiolisis, insuficiencia cardíaca y renal, metahemoglobinemia, hemólisis intravascular, necrosis hepática, encefalopatía y, en última instancia, la muerte. Existen algunos desordenes genéticos como la enfermedad de Wilson o algunos tipos de cirrosis que interfieren con la capacidad de metabolizarlo en el cuerpo humano, lo que aumenta los riesgos de intoxicación. Algunas formulaciones que contienen compuestos de Cu pueden causar irritación dérmica y ocular en los individuos expuestos (US EPA, 2008); (NCBI, 2020).

Su importancia medioambiental radica en que es altamente tóxico para la mayoría de las especies acuáticas (peces e invertebrados), debido a la rápida unión del Cu con las membranas branquiales, lo que provoca daños e interferencias con los procesos de osmorregulación. El grado de toxicidad dependerá de los parámetros de calidad del agua, incluyendo el pH, la alcalinidad y el carbono orgánico disuelto. Así mismo, existe cierta incertidumbre sobre el riesgo para los animales terrestres (mamíferos y aves) porque, aunque el Cu es tóxico en altas concentraciones, también es un oligoelemento esencial para estos, muchos de estos animales tienen la capacidad de hacer frente a cierto grado de exceso de Cu almacenándolo en el hígado y la médula ósea (US EPA, 2008).

En la naturaleza el Cu se encuentra principalmente en sulfuros como la calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4), enargita (Cu_3AsS_4), calcosina (Cu_2S) y covelita (CuS), óxidos como la cuprita (Cu_2O) y tenorita (CuO), carbonatos como la azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) y malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})$) y algunos sulfatos como la calcantita ($\text{Cu}(\text{SO}_4) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), siendo los sulfuros y los óxidos los más abundantes en depósitos minerales y los más atractivos para su explotación (Watling, 2006). La actividad minera es la principal fuente de contaminación de este metal, debido al drenaje ácido generado a partir de los residuos mineros que contienen sulfuros, este drenaje provoca la lixiviación de contaminantes y la acidificación del suelo (Kumpiene et al., 2007).

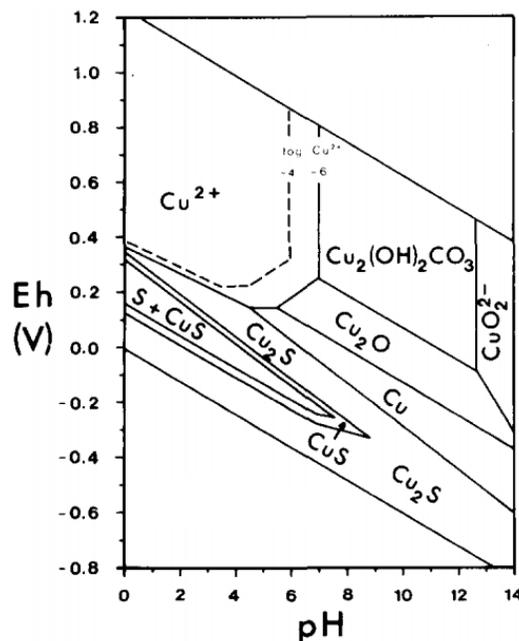


Figura 2. Diagrama de Pourbaix, para el sistema $\text{Cu} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + \text{S} + \text{CO}_2$ a $25[^\circ\text{C}]$ y 1 [atm] . $P_{\text{CO}_2} = 10^{-1}$ (Modificado de Hermann & Neumann-Mahlkau, 1985).

En el ambiente el Cu se presenta en especies termodinámicamente estables, como carbonatos, sulfuros y óxidos, y como iones libres Cu^+ y Cu^{2+} , lo cual depende de las condiciones de pH y Eh del medio (figura 2). En condiciones oxidantes, la especie predominante es el Cu (II), mientras que, en condiciones reductoras, el Cu (I) es la forma dominante (Hermann & Neumann-Mahlkau, 1985); (López-Sánchez, 2013).

2.2.3 - Plomo

Es un elemento que ha sido clasificado como metal, está ubicado en el grupo 14 (IVA) de la tabla periódica y se encuentra presente en la corteza terrestre con una abundancia de 16 [mg/kg], su masa atómica es de 207.19 [g/mol], su número atómico es el 82 y puede presentarse en los estados de oxidación +2 y +4 (Evanko & Dzombak, 1997); (Yaroshevsky, 2006); (López-Sánchez, 2013).

Históricamente su uso se remonta a más de 5000 años de antigüedad, debido su resistencia a la corrosión, su gran maleabilidad y facilidad para trabajarlo. Las tuberías del Imperio Romano, esmaltes, cerámicas y cosméticos del Antiguo Egipto son algunos ejemplos de su aplicación en el mundo antiguo. En la actualidad es utilizado para la fabricación de acumuladores (baterías) para automóviles, pinturas, cerámicas, revestimiento para cables, elementos de construcción, vidrios especiales, pigmentos, soldadura suave, municiones y como aditivo para gasolinas en forma de tetraetilo de plomo (USGS, 2011); (López-Sánchez, 2013); (Martínez-Jardines, 2018).

Los efectos del Pb en la salud humana han sido ampliamente estudiados, el principal problema radica en que es biológicamente absorbido del mismo modo que otros nutrientes metálicos, sin embargo, este no puede sustituir sus funciones orgánicas y no es biodegradable lo que consecuentemente provoca su bioacumulación y efectos asociados a su toxicidad. Las vías de ingreso del Pb al cuerpo humano suelen ser digestivas, pulmonares o cutáneas. Una vez que este es absorbido, pasa a la sangre provocando retrasos en el desarrollo infantil, hipertensión, reducción de la capacidad auditiva, disminución de la síntesis de la hemoglobina, cambios en los niveles de enzimas sanguíneas, trastornos de déficit de atención, irritabilidad, depresión, debilidad muscular, problemas gastrointestinales y renales. Además, el Pb interactúa con proteínas implicadas en la reparación del ADN, lo que puede aumentar la genotoxicidad y dar lugar a mutaciones por lo que se le atribuyen propiedades cancerígenas. Los niños son mucho más vulnerables que los adultos debido que absorben de cuatro a cinco veces más Pb en la ingesta, ya que su barrera hematoencefálica y sistema nervioso no se encuentran completamente desarrollados (Martínez-Jardines, 2018); (Sierra-Salamanca, 2020).

En la naturaleza el Pb generalmente se encuentra en forma de sulfuro como galena (PbS), sulfato como anglesita (PbSO_4) y carbonato como cerusita (PbCO_3). Las principales fuentes de contaminación por Pb incluyen las actividades minero-metalúrgicas, la manufactura acumuladores, fabricación de pinturas y productos químicos, y las emisiones de automóviles que utilizan gasolinas con tetraetilo de plomo como aditivo (López-Sánchez, 2013); (Martínez-Jardines, 2018).

En el ambiente se presenta en forma iónica como Pb(II) y Pb(IV) de las cuales el Pb(II) es la forma más común y reactiva, como óxidos e hidróxidos y como complejos organometálicos (figura 3). Cuando forma complejos con ligandos orgánicos (ácidos húmicos y fúlvicos) o

inorgánicos (Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}), se forman compuestos poco solubles, por lo que es considerado como el menos móvil de los metales pesados (Hermann & Neumann-Mahlkau, 1985); (López-Sánchez, 2013); (Martínez-Jardines, 2018).

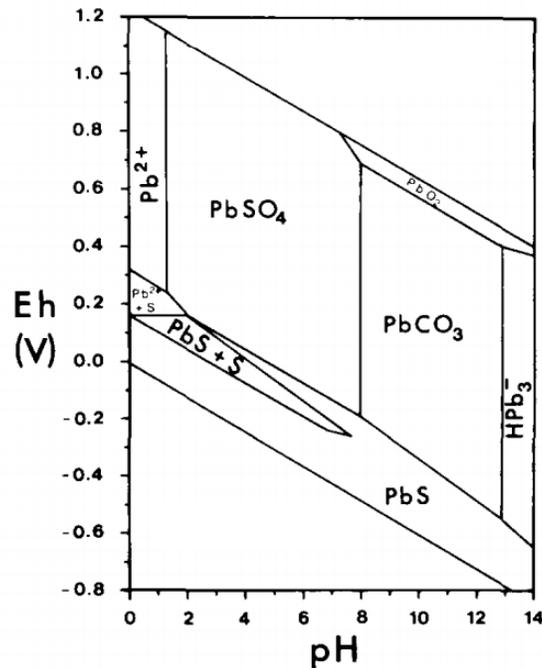


Figura 3. Diagrama de Pourbaix, para compuestos de Pb 10^{-6} [M] en agua a 25[°C] y 1 [atm]. (Modificado de Hermann & Neumann-Mahlkau, 1985).

2.2.4 - Zinc

Es un elemento que ha sido clasificado como metal de transición, está ubicado en el grupo 12 (IIB) de la tabla periódica y se encuentra presente en la corteza terrestre con una abundancia de 83 [mg/kg], su masa atómica es de 65.38 [g/mol], su número atómico es el 30 y su estado de oxidación más común es +2 (Evanko & Dzombak, 1997); (Yaroshevsky, 2006); (López-Sánchez, 2013).

Es utilizado en diversas industrias, principalmente sirve para la galvanización de distintos metales donde funciona como una cobertura anticorrosiva, también se utiliza para la fundición a altas presiones y forma parte de distintas aleaciones como el latón, la plata de níquel y la soldadura de aluminio. Como óxido de zinc se utiliza en la fabricación de distintos productos como pinturas, caucho, cosméticos, plásticos, tintas, jabones, baterías, textiles, equipo eléctrico y productos farmacéuticos. Como sulfuro de zinc se utiliza en la fabricación de pinturas luminosas, luces fluorescentes y pantallas de rayos X (Emsley, 2011); (López-Sánchez, 2013).

El Zn es un nutriente esencial con distintas funciones en el cuerpo humano, juega un rol específico en más de 300 enzimas, que participan en reacciones bioquímicas importantes, por lo que tiene un efecto directo en el crecimiento, el desarrollo neurológico, de comportamiento y en el sistema inmune (López de Romaña et al., 2010). Las vías de ingreso del Zn al cuerpo humano suelen ser digestivas, pulmonares y pequeñas cantidades de manera cutánea. La inhalación continua

de vapores de Zn puede provocar una patología benigna conocida como fiebre del metal, su ingesta recurrente en dosis elevadas puede provocar náuseas, vómitos, dolor de estómago, diarrea y dolores de cabeza. En casos más graves puede disminuir los niveles de lipoproteína de alta densidad (HDL), reducir la respuesta inmunológica y provocar deficiencias de Cu y Fe (ATSDR, 2005).

El impacto medio ambiental de altas concentraciones de Zn en suelos provoca retrasos en el crecimiento y rendimiento de las plantas, reducción en la síntesis de clorofila y degradación de los cloroplastos por deficiencia de Fe que consecuentemente induce a clorosis, e interferencia con la captación de P, Mg y Mn (Broadley et al., 2007). En el agua, concentraciones tan pequeñas como 2 [mg/L] puede impactar negativamente en la cantidad de oxígeno que los peces pueden acumular en su sangre (Heath, 1995).

En la naturaleza el Zn se presenta en forma de sulfuro como esfalerita (ZnS), carbonatos como la smithsonita ($ZnCO_3$) y la hidrocincita ($Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$), silicato como hemimorfita ($Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$), y óxido como franklinita ($(Zn, Mn^{2+}, Fe^{2+})(Fe^{3+}, Mn^{3+})_2O_4$). Las principales fuentes de contaminación de Zn incluyen las actividades minero-metalúrgicas, la combustión de carbón, tratamiento de suelos agrícolas con lodos de depuración y el procesado de distintos tipos de aceros (Hitzman et al., 2003); (Broadley et al., 2007); (López-Sánchez, 2013).

En el ambiente el Zn se presenta principalmente en tres fracciones: i) Zn soluble en agua (incluyendo el Zn^{2+} y las fracciones orgánicas solubles); ii) Zn adsorbido e intercambiable en forma coloidal (asociado con partículas de arcilla, compuestos húmicos e hidróxidos de Al y Fe); y iii) complejos y minerales de Zn insolubles. La abundancia de cada una de estas fracciones estará regida por las de las condiciones de pH y Eh del medio (figura 4); (Hermann & Neumann-Mahlkau, 1985); (Broadley et al., 2007).

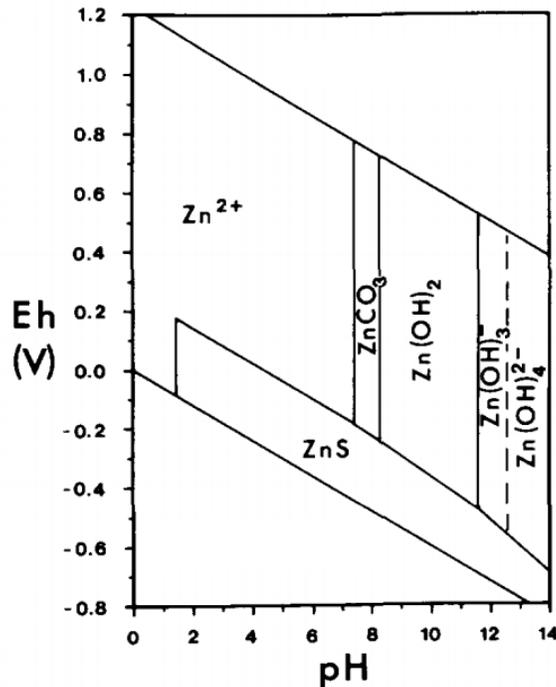


Figura 4. Diagrama de Pourbaix, para compuestos de Zn, en un sistema $Zn 10^{-5} [M] + CO_2 10^{-3} [M] + S 10^{-3} [M] + H_2O$ a $25[^\circ C]$ y $1 [atm]$ (Modificado de Hermann & Neumann-Mahlkau, 1985).

2.3 - Valor de fondo y línea base

El término “valor de fondo” ha sufrido discrepancias a lo largo del tiempo debido principalmente a que ha sido empleado en distintas ramas de la geoquímica, la geoquímica exploratoria y la geoquímica ambiental. La primera se enfoca en diferenciar las concentraciones normales de las anómalas en el ambiente y la segunda las concentraciones naturales de aquellas con influencia antropogénica (Gałuszka & Migaszewski, 2011).

Otras definiciones que también siguen esta concepción son:

- “La concentración normal de un elemento en un material bajo investigación tal como rocas, suelo, plantas y agua” de Bates & Jackson (Citado por Gałuszka & Migaszewski, 2011).
- Un rango de valores de la abundancia normal de un elemento en un material terrestre (Reimann & Garrett, 2005).

En la geoquímica ambiental podemos definir el término como:

- “Un rango teórico de la concentración natural de una sustancia en un ambiente específico, considerando su variabilidad espacial y temporal” de Gałuszka (Citado por Gałuszka & Migaszewski, 2011).
- La concentración de una sustancia en una muestra de material, a una distancia de una fuente, en la que ya no puede probarse que la concentración de la sustancia se origina en dicha fuente. (Reimann & Garrett, 2005).

Integrando las anteriores podemos definir “valor de fondo” como “un rango de valores que se utiliza para diferenciar la concentración natural de un elemento, de las concentraciones con influencia antropogénica en un ambiente determinado. Estos valores dependen del sustrato geológico y los procesos formadores del suelo” (Santos-Francés et al., 2017).

La “línea base geoquímica” se define como el contenido actual de un elemento en el ambiente superficial en un determinado lugar y tiempo (Albanese et al., 2007). Este concepto incluye las concentraciones de valores de fondo y una difusa contribución antropogénica. Es necesaria para evaluar el estado actual del medio ambiente, proporcionar pautas y estándares de calidad en la legislación de políticas medioambientales, especialmente en la evaluación de suelos contaminados o riesgos medioambientales (Santos-Francés et al., 2017).

Es casi imposible establecer valores de fondo, debido a que la dispersión hídrica y eólica puede contaminar suelos a distancias considerables a menos que existan barreras físicas que lo imposibiliten (Otero et al., 2009), en este tipo de escenarios el cálculo de la línea base geoquímica es de mayor utilidad, ya que considera el impacto antropogénico existente en el ambiente (Santos-Francés et al., 2017).

2.4 - Clasificación de los métodos para calcular los valores de fondo

En 2011 Gałuszka & Migaszewski, estudiaron distintas metodologías sobre como calcular los valores de fondo, y las agruparon en tres tipos de métodos (figura 5), los directos (geoquímicos), indirectos (estadísticos) y los integrados (Gałuszka & Migaszewski, 2011).

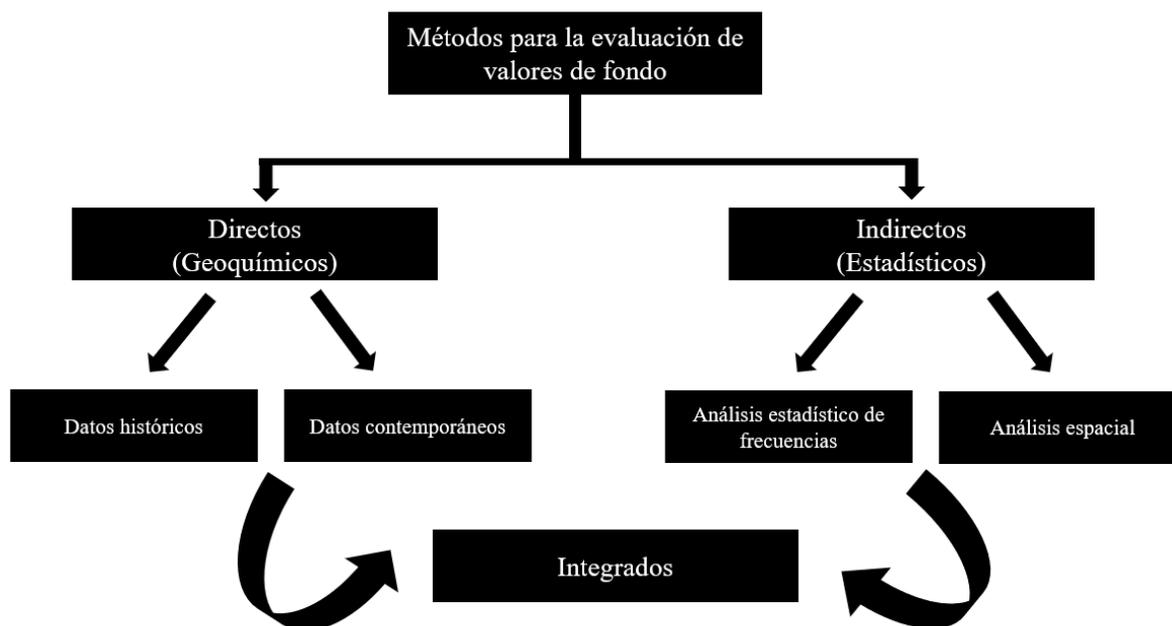


Figura 5. Métodos para evaluación de los valores de fondo (Modificado de Gałuszka & Migaszewski, 2011).

2.4.1 - Métodos directos

Los métodos directos, también conocidos como geoquímicos o empíricos, consideran el promedio o la mediana como valor de fondo, siendo así el resultado un valor único, se basan en la investigación de muestras de áreas sin influencia de actividades industriales (datos contemporáneos) o registros históricos de la zona (datos históricos), esto implica el empleo de trabajo de campo y análisis de laboratorio para la obtención de los datos (Dung et al., 2013).

Estos métodos tienen la ventaja de que la información es real y no obtenida mediante procesamiento de datos, por otro lado, lo arbitrario de los criterios del diseño de muestreo, la carga de trabajo que requiere y elevados costos de su análisis, sumado a la necesidad de conocimientos especializados para su interpretación, los hacen poco atractivos para algunos geoquímicos (Gałuszka & Migaszewski, 2011). Además, para realizar una correcta interpretación de los resultados obtenidos es necesario contar con parámetros adicionales como pH, contenido de C y S y los datos de isotópicos (Matschullat et al., 2000).

2.4.2 - Métodos indirectos

Los métodos indirectos se encargan de eliminar los valores atípicos relacionadas a fuentes de contaminación antropogénica, dentro del conjunto de datos de concentraciones de elementos en

suelo y sedimentos. Los valores atípicos se identifican mediante el cálculo de la desviación estándar y técnicas de análisis de regresión de datos (Dung et al., 2013).

Para definir el límite de los valores de fondo utiliza el concepto de “nivel umbral”, el cual se refiere al límite superior o valor máximo del rango valores que pueden considerarse como un valor de fondo (Matschullat et al., 2000). El primer método para su determinación se desarrolló en geoquímica de exploración con la finalidad de identificar valores atípicos y consiste en el uso del promedio + 2 desviaciones estándar (SDEV) (Dung et al., 2013).

Hoy en día ese método es anticuado y se planteó que podría ser útil sustituir el promedio + 2 desviaciones estándar (SDEV) por la mediana + 2 desviaciones absolutas con respecto a la mediana (MAD), ya que es mucho más robusto contra el efecto de los valores atípicos de los datos que son comunes en los conjuntos de datos geoquímicos. La desventaja de este método es que proporciona niveles umbral bajos, es decir, produce muchos sitios que necesitan ser investigados más a fondo (Reimann & de Caritat, 2017).

Algunos de los métodos estadísticos convencionales en el cálculo de los valores de fondo son: técnica de regresión, prueba 4σ para valores atípicos, técnica iterativa de 2σ y cálculo de la función de distribución (Matschullat et al., 2000). Recientemente otros métodos geoestadísticos novedosos como el análisis de componentes principales (PCA) y análisis multivariado han sido ampliamente utilizados (Dung et al., 2013).

Los métodos de análisis espacial son aquellos en los cuales la visualización de los datos geoquímicos juega el papel más importante, ya que los mapas geoquímicos nos permiten delinear las anomalías con respecto a los valores de fondo (Gałuszka & Migaszewski, 2011).

Las ventajas de los métodos indirectos es que son robustos, claros y precisos. Los detractores de este tipo de métodos argumentan que no se analiza en su totalidad los procesos naturales (Gałuszka & Migaszewski, 2011) y existe la incertidumbre sobre el muestreo, la preparación de la muestra y su análisis (Dung et al., 2013).

2.4.3 - Métodos integrados

Son métodos en los cuales se combinan elementos de los directos e indirectos, es decir, que se realiza un muestreo en zonas con la menor influencia antropogénica posible y los datos obtenidos son sometidos a un tratamiento estadístico. La principal ventaja de los métodos integrados es que no se requiere un robusto tratamiento estadístico, al tratarse de muestras obtenidas en zonas con poca influencia antropogénica, la mayor parte de los valores atípicos serán ocasionados debido a la variabilidad geoquímica natural de la zona (Gałuszka & Migaszewski, 2011).

El uso de estos métodos ha sido ampliamente apoyado, ya que mejoran la diferenciación entre grupos de suelos con distintas etapas de meteorización y procesos pedogenéticos. Se consideran una herramienta efectiva para describir las tendencias pedogénicas y su relación con los valores de fondo. Sin embargo, poseen el mismo problema que los métodos directos, ya que el definir un área con nula influencia antropogénica es una tarea difícil (Dung et al., 2013).

El empleo de cada uno de estos métodos dependerá de las ventajas y desventajas que nos ofrecen (tabla 2); (Dung et al., 2013), dado que obtener valores de fondo fiables nos permite lograr mejores evaluaciones de la calidad ambiental (Gałuszka & Migaszewski, 2011).

Método	Ventajas	Desventajas
Directo (Geoquímico)	<ul style="list-style-type: none"> • El valor de fondo obtenido es único • No requiere un procesamiento de datos complicado • Área de estudio específica 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados costos • Gran carga de trabajo de campo y laboratorio • Requiere conocimiento del área
Indirecto (Estadístico)	<ul style="list-style-type: none"> • Los valores de fondo se presentan en un rango de valores • Una amplia selección de pruebas estadísticas y programas para su procesamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren una amplia distribución de datos • No considera el contexto geoquímico y existe incertidumbre en el muestreo y análisis de los datos
Integrados	<ul style="list-style-type: none"> • Los valores de fondo se presentan en un rango de valores • Área de estudio específica 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados costos • Gran carga de trabajo de campo y laboratorio • Requiere conocimiento del área

Tabla 2. Tabla de desventajas y ventajas de los métodos de determinación de valores de fondo (Modificado de Dung et al., 2013).

2.5 - Métodos de evaluación de contaminación antropogénica

Existen diversos métodos para evaluar la contaminación antropogénica, unos se basan en el tipo de actividad que se realiza en la zona (minería, metalurgia, agricultura, transporte, entre otras), algunos en las concentraciones totales de los elementos a estudiar y otros en la disponibilidad o reactividad de los elementos, un punto común en la mayoría de ellos es la necesidad de establecer valores de fondo o referencia de la zona para su correcta aplicación (Dung et al., 2013).

2.5.1 - Índice de geoacumulación

Uno de los métodos más utilizados es el índice de geoacumulación (I_{geo}) fue introducido por Müller (Müller, 1969). Permite evaluar la contaminación ambiental comparando las diferencias entre las concentraciones actuales y los datos históricos. Originalmente utilizado con sedimentos del fondo del río, también puede ser aplicado a la evaluación de la contaminación del suelo (Li et al., 2014).

Para estudios de suelos con influencia de actividad minera se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5 B_n)$$

Donde I_{geo} es el índice de geoacumulación, C_n es la concentración medida de cada metal pesado encontrado en el suelo influenciado por la mina [mg/kg], B_n es el valor de fondo geoquímico o de referencia de los metales pesados presentes en el suelo [mg/kg], se utiliza la constante 1.5 debido a las variaciones potenciales en la línea de base (Li et al., 2014).

El índice de geoacumulación consta de 7 clases o grados (tabla 3), donde la clase más alta 6 refleja un enriquecimiento 100 veces superior a los valores de fondo (Li et al., 2014).

Clase	Valor	Calidad del suelo
0	$I_{geo} \leq 0$	Prácticamente no contaminado
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderadamente a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} \leq 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	Fuertemente a extremadamente contaminado
6	$I_{geo} > 5$	Extremadamente contaminado

Tabla 3. Clases que comprenden el índice de geoacumulación (Modificado de Li et al., 2014).

2.5.2 - Factor de enriquecimiento

El factor de enriquecimiento (FE) es un indicador que se utiliza para evaluar la presencia e intensidad de la deposición de contaminantes antropogénicos en el suelo superficial (Barbieri, 2016). Se basa en normalizar el peso medido de un metal, con respecto a un metal de referencia como Fe o Al que juega el lugar de un "proxy" simulando el contenido de ese metal en un tipo de suelo o roca (Abraham & Parker, 2008).

$$FE = (\text{Metal/RE})_{\text{Suelo}} / (\text{Metal/RE})_{\text{Fondo}}$$

Donde FE es el factor de enriquecimiento, RE es el metal de referencia, $(\text{Metal/RE})_{\text{Suelo}}$ es el valor normalizado en el suelo y $(\text{Metal/RE})_{\text{Fondo}}$ es el valor de fondo normalizado. La clasificación de FE cuenta con cinco clases (tabla 4), representa el enriquecimiento con respecto al valor de fondo o referencia (Barbieri, 2016).

Valor	Enriquecimiento
$FE \leq 2$	Enriquecimiento mínimo
$2 < FE \leq 5$	Enriquecimiento moderado
$5 < FE \leq 20$	Enriquecimiento significativo
$20 < FE < 40$	Enriquecimiento muy alto
$FE \geq 40$	Enriquecimiento extremadamente alto

Tabla 4. Clases que comprenden el factor de enriquecimiento (Modificado de Barbieri, 2016).

2.5.3 - Índice de carga de contaminación

El índice de carga de contaminación (ICC) fue sugerido por Tomlinson (Tomlinson et al., 1980) para determinar el estado de contaminación de los metales pesados en suelo o sedimentos de un área específica. Este cubre todos los metales pesados estudiados en un solo índice. La ventaja de este es que es fácil de entender por no científicos y permite comparar el grado de contaminación de distintos lugares (Dung et al., 2013).

Es calculado a través del factor de contaminación (FC). El FC es el cociente de concentración de un metal pesado en el suelo o sedimentos y la concentración del mismo metal en un material de referencia (Dung et al., 2013). Se obtiene mediante las siguientes formulas:

$$FC = C_{\text{Metal}}/C_0$$

$$ICC = (FC_1 * FC_2 * FC_3 * \dots * FC_n)^{1/n}$$

Donde ICC es el índice de carga de contaminación, FC es el factor de contaminación de un metal específico, C_{Metal} es la concentración de un metal en suelo o sedimentos y C_0 es la concentración de un metal en el material de referencia. El índice de carga de contaminación se divide en cinco clases (tabla 5) y nos indica el grado de contaminación (Dung et al., 2013).

Valor	Grado de contaminación
$ICC \leq 0$	No contaminado
$0 < ICC \leq 1$	Nivel de línea base
$1 < ICC \leq 10$	Contaminado
$10 < ICC < 100$	Altamente contaminado
$ICC \geq 100$	Degradación progresiva de ambiente

Tabla 5. Clases que comprenden el índice de carga de contaminación (Modificado de Dung et al., 2013).

2.6 - Hipótesis

La búsqueda de un valor de fondo o de referencia de EPT para los suelos o sedimentos de una región minera como el Valle de Matehuala es de vital importancia, ya que nos permitirá valorar el impacto antropogénico que los distintos tipos de actividades minero-metalúrgicas producen sobre el medio ambiente y su incidencia en la salud humana.

Si bien, actualmente existen concentraciones máximas permisibles de EPT que funcionan a razón de valores de referencia “estándar”, estos son inadecuados para valorar territorios tan extenso como lo son países o estados, ya que en estos existen zonas mineralizadas o con presencia de anomalías geoquímicas, en las cuales existe un enriquecimiento natural de estos elementos. Por lo cual se formularon las siguientes hipótesis:

1. La determinación de los valores de fondo de metales pesados en zonas minero-metalúrgicas tiene que ser llevada a cabo considerando las naturaleza geológica particular de cada una de estas zonas, debido a que, si se evalúan sin tener en cuenta estas consideraciones, los resultados obtenidos subestimarán o sobreestimarán la contaminación antropogénica, lo cual no permitirá realizar una valoración ambiental adecuada.
2. Si se realiza un análisis previo de sus características geológicas, morfológicas e información histórica de la zona y se emplean estos criterios para para realizar un análisis de datos, los resultados obtenidos permitirán realizar una mejor valoración de la contaminación antropogénica.

-
3. Para valorar correctamente la contaminación antropogénica de una zona minera es necesario caracterizar la totalidad o la mayor parte de las fuentes de contaminación ya que nos permitirá conocer firmas geoquímicas particulares que pueden llevarnos a determinar la influencia que cada una de estas fuentes tiene en la zona.
 4. El uso de diagramas ternarios como herramienta de análisis multivariado puede ser de gran ayuda para caracterizar las fuentes de contaminación y establecer cuál es su posible influencia en suelos o sedimentos.

2.7 - Objetivos

General

Obtener valores de fondo y línea base de suelos, sedimentos y rocas, de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México, a partir del desarrollo de una metodología que, considerando las fuentes de contaminación y su dispersión, permita que estos funcionen como un “estándar” medioambiental adecuado para la evaluación de la contaminación antropogénica de la zona.

Particulares

- Desarrollar una metodología adecuada para el cálculo de valores de fondo en suelos, sedimentos y rocas de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.
- Obtener una línea base de suelos de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.
- Caracterizar las fuentes de contaminación para evaluar su posible impacto en el medio ambiente.
- Utilizar distintos métodos de evaluación de la contaminación antropogénica, para realizar un diagnóstico ambiental del estado actual de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

3. - Área de estudio

La zona de estudio (figura 6) corresponde al Distrito minero de Santa María de la Paz con una extensión rectangular de aproximadamente 18 x 30 [km] con un área de 540 [km²] ubicada en el estado de San Luis Potosí, cuyo centro se encuentra en la ciudad de Matehuala y sus coordenadas geográficas son 23°39'51" latitud norte y 100°38'26" longitud oeste, a una elevación de 1,580 metros sobre el nivel del mar, comprende parte de los municipios de Matehuala y Villa de la Paz. Asimismo, el poblado de Villa de la Paz se encuentra ubicado en la ladera E de una sierra denominada "El Fraile" a una altura de 1,858 metros sobre el nivel del mar (Razo, 2006), los poblados de Carbonera y Cerrito Blanco se encuentran al O de una sierra de menor elevación llamada Sierra Azul, que, en conjunto con El Fraile, delimitan el Valle de Matehuala (figura 7).

Históricamente estos municipios sostuvieron un importante desarrollo minero-metalúrgico, sin embargo, al caer la rentabilidad, algunas zonas donde se concentraban estas actividades fueron abandonadas sin realizar ningún tipo de plan de manejo de residuos, lo que consecuentemente generó pasivos ambientales (Razo, 2006); (Chávez et al., 2011).

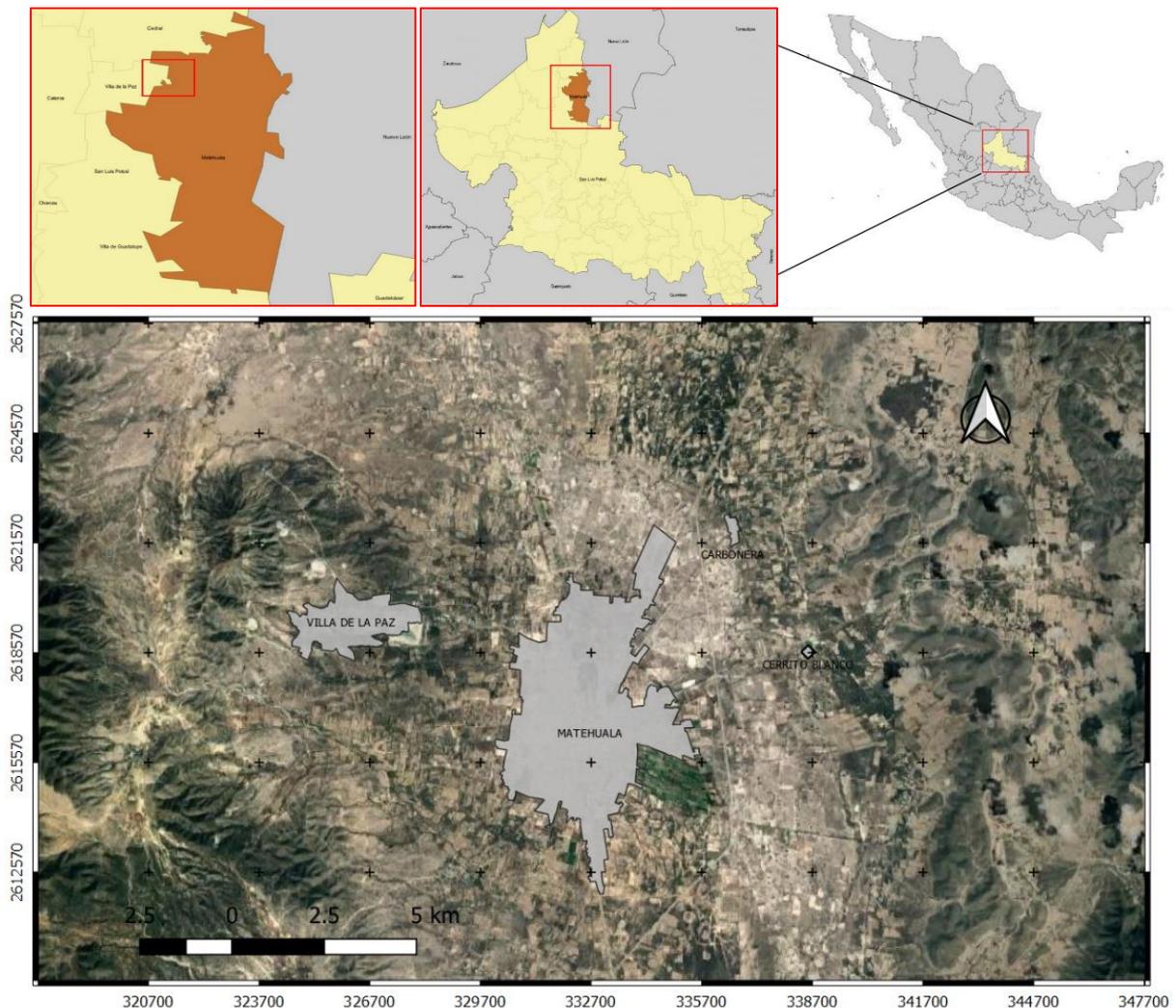


Figura 6. Ubicación geográfica del área de estudio.

Actualmente existen tres minas activas en el Distrito minero de Santa María de la Paz, La Cobriza, El Carmen y San Agustín, en las dos primeras se explota Cu, Au y Ag, se localizan en la zona N de la sierra El Fraile, mientras que de la última se extrae Ag, Pb, Zn y está ubicada al S en un cerro conocido como Cerro Dolores. Una mina inactiva nombrada San José, de la cual se extrajo Cu, Au y Ag y está situada al NE de la mina El Carmen (figura 8); (SGM, 1999).

Como residuos de estas actividades mineras, se generaron algunos terreros que se localizan en el flanco E de sierra El Fraile, al igual que presas de jales, de ellas, una permanece activa, y dos se encuentran inactivas, ubicadas dentro del poblado de Villa de la Paz (figura 8) cuyo volumen no ha sido aún calculado, tienen una concentración promedio de 4,000 [mg/kg] de As. (Razo, 2006). Existen dos depósitos de residuos históricos de origen desconocido, sin embargo, se piensa que son materiales generados durante las primeras actividades mineras que se desarrollaron en el sitio y han sido acondicionadas para realizar actividades recreativas (Razo, 2006).

Además, existe un depósito de escorias y polvos generado por los procesos metalúrgicos de una exfundición donde, durante 60 años (1905-1965), se procesaron minerales de minas antiguas para la obtención de Ag, Au y Pb (Razo, 2006); (Chávez et al., 2011), dicho depósito de escorias se encuentra en la zona N de la ciudad de Matehuala (figura 8), tiene una superficie aproximada de 15 hectáreas y una altura que varía entre 15 y 20 metros, aproximadamente (Melo, 2012). La concentración promedio de metales de estas escorias es: As 1,474 [mg/kg], Pb 3,709 [mg/kg], Cu 2,558 [mg/kg], Mn 6,082 [mg/kg], Zn 2.1 [%] y Fe 19.1 [%] (Caicedo, 2020).

Se ha observado que el agua de mina generada forma pequeños arroyos o es utilizada para la irrigación de suelos de áreas de cultivo y repercute en la biota silvestre (Chávez et al., 2011).

Las anteriores se presume son las principales fuentes de contaminación antropogénica, han sido agrupadas mediante un modelo conceptual de riesgo ambiental, siguiendo las fuentes primarias y secundarias, así como sus mecanismos de transporte, liberación y rutas por las que interaccionan con la biota y seres humanos (figura 9); (Chávez et al., 2011).

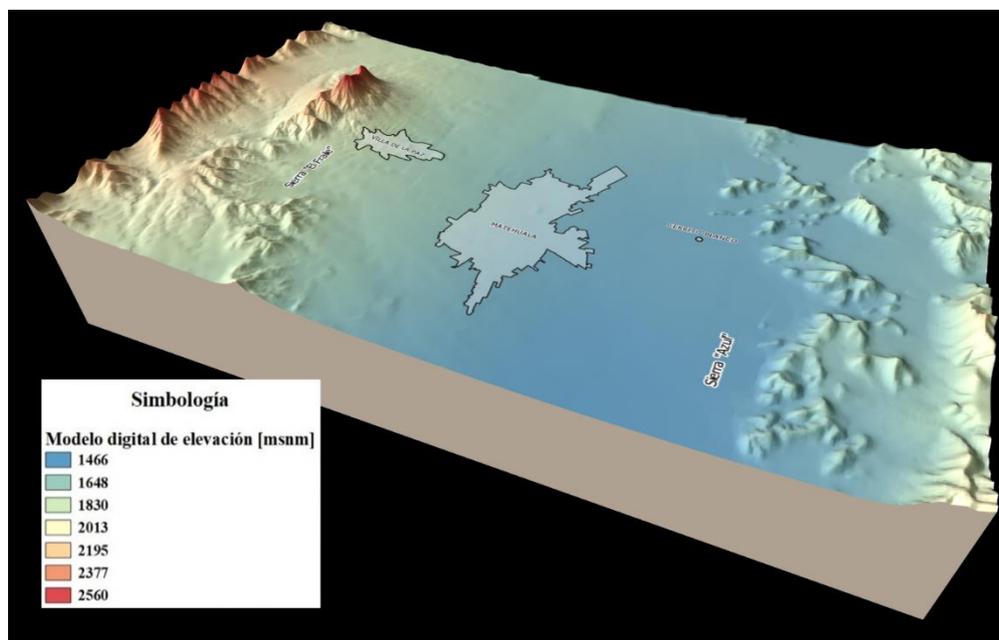


Figura 7. Modelo 3D del Valle de Matehuala.

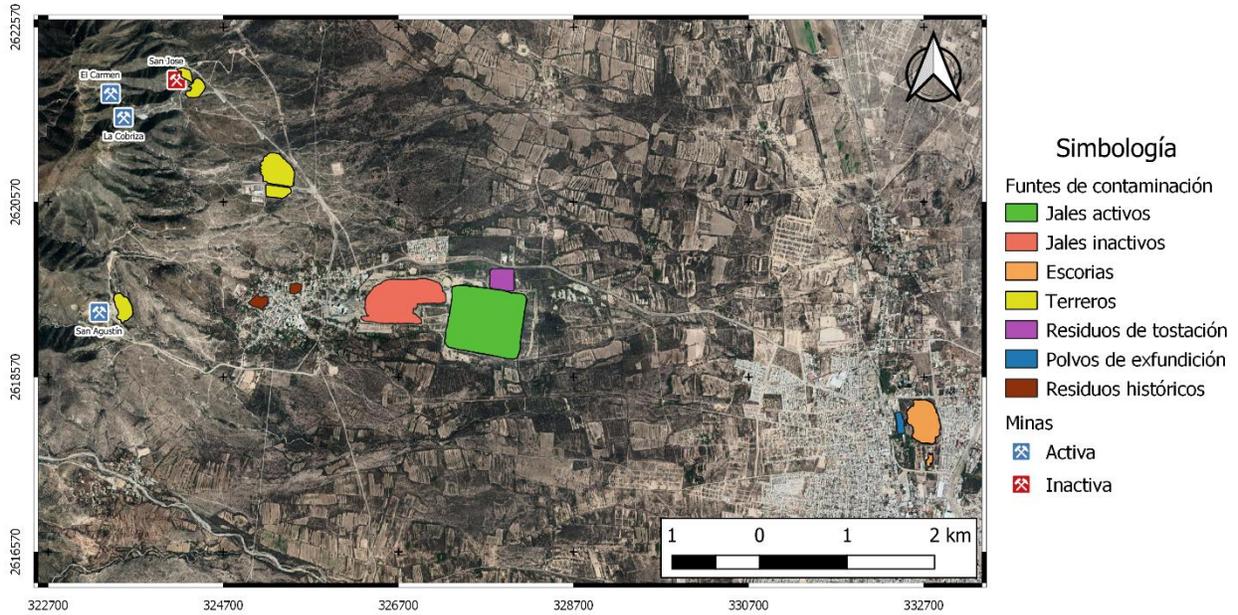


Figura 8. Mapa de elementos de impacto antropogénico.

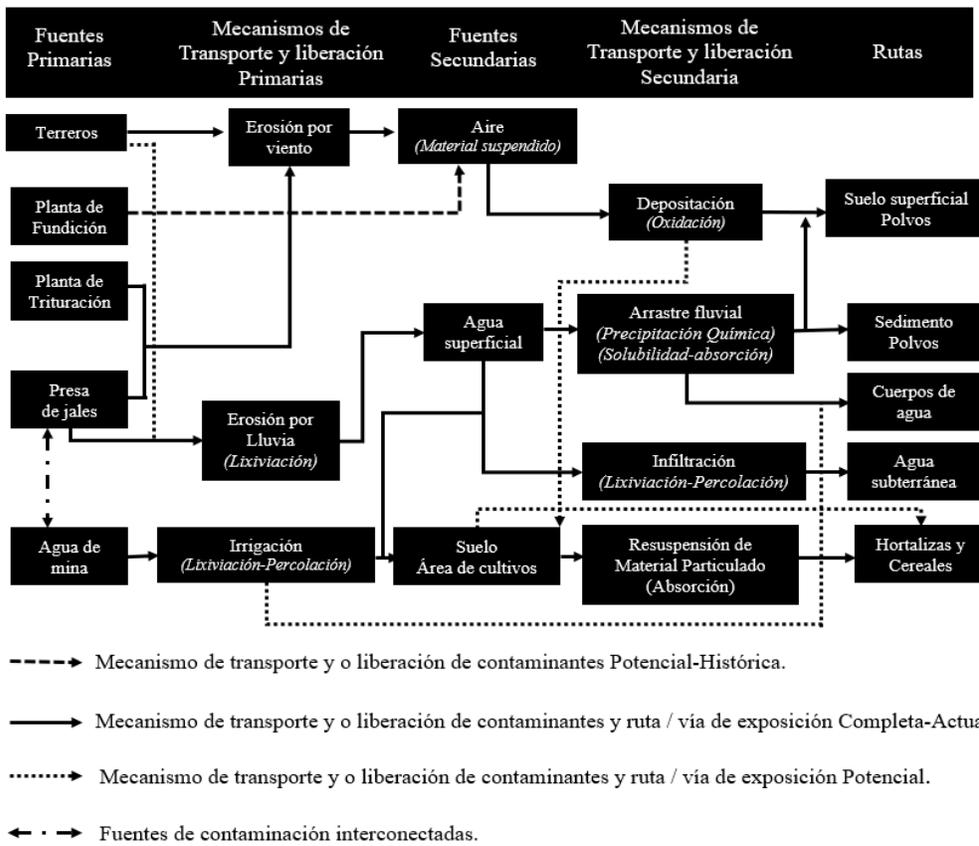


Figura 9. Modelo conceptual de riesgo ambiental (Modificado de Chávez et al., 2011).

3.1 - Clima

El clima de la región de Matehuala - Villa de la Paz es de tipo semiárido templado. La temporada de lluvias abarca de junio a septiembre, aunque ocasionalmente se extiende hasta diciembre, con la presencia eventual de lluvias torrenciales, la precipitación promedio en este período de 300 [mm] a 470 [mm] anuales (figura 10). En la región, los vientos soplan predominantemente en dirección N y SE de mayo a agosto, y de noviembre a febrero soplan vientos en dirección NE, E y S, lo cual puede apreciarse en la rosa de los vientos (figura 11); (Razo, 2006) (Chávez et al., 2011); (Meteoblue, 2019); (Meteoblue, 2020).

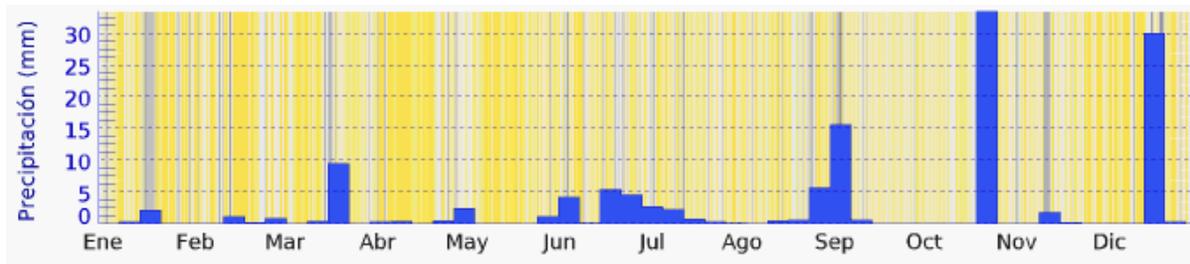


Figura 10. Gráfica de precipitación [mm] de la zona Matehuala - Villa de la Paz (Tomada de meteoblue) (Datos acumulados del 2019 – Consultado 05/09/20).

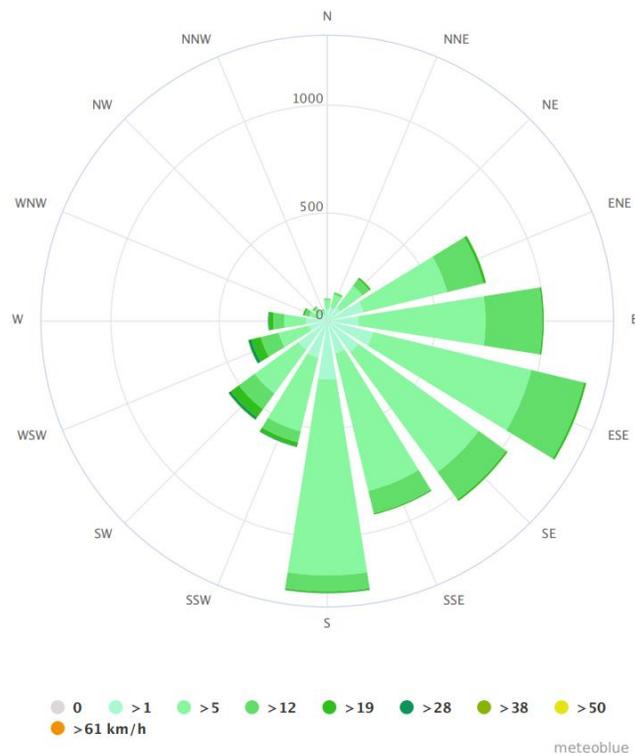


Figura 11. Rosa de los vientos de la región de Matehuala - Villa de la Paz (Tomada de meteoblue) (Datos acumulados de un año – Consultado 02/06/2019).

3.2 - Marco geológico

El Valle de Matehuala se conformó a finales del periodo Cretácico y principios de la era Cenozoica; durante el Terciario ocurrieron intrusiones ígneas que causaron el metamorfismo y mineralización en la zona (Chávez et al., 2011). Se encuentra dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, compuesta principalmente de rocas sedimentarias marinas. La columna estratigráfica está formada por secuencias de carbonatos del jurásico superior y cretácicos, rocas volcánicas terciarias que cubren una pequeña parte de la región y depósitos aluviales cuaternarios en el fondo del valle de Matehuala (Chiprés, 2009).

Los carbonatos ubicados al E se componen de calizas grises fosilíferas, mientras que, al O se trata de una intercalación de calizas negras con lutitas. Al flanco O de El Fraile se encuentra una intercalación de lutita-arenisca, y en la zona más elevada, afloran emplazamientos de diorita. Al pie de las sierras que delimitan el valle existen conglomerados polimícticos, dentro del valle, un depósito lacustre compuesto por yeso se ubica al N-SE de la ciudad de Matehuala y el resto de este está cubierto por material aluvial (figura 12); (SGM, 1999); (INEGI, 2015).

Los yacimientos minerales están encajonados en carbonatos del Jurasico-Cretácico, son de tipo skarn y polimetálicos de remplazamiento; los depósitos de skarn Cu-Au están asociados con vetas Pb-Zn-Ag, los minerales de la ganga comprenden calcita (CaCO_3) y cuarzo (SiO_2) y los sulfuros polimetálicos están constituidos por calcopirita (FeCuS_2), galena (PbS), esfalerita (ZnS), bornita (Cu_5FeS_4), pirita (FeS_2) y arsenopirita (FeAsS); la mineralización de Cu-Au contiene promedios en la mena de 0.5 [mg/kg] Au y 0.2-1.4 [%] de Cu, mientras que la mineralización de Pb-Zn-Ag presenta grados promedios de 7 [%] Pb, 5 [%] Zn y 0.05 [%] Ag (Chiprés, 2009); (Chávez et al., 2011).

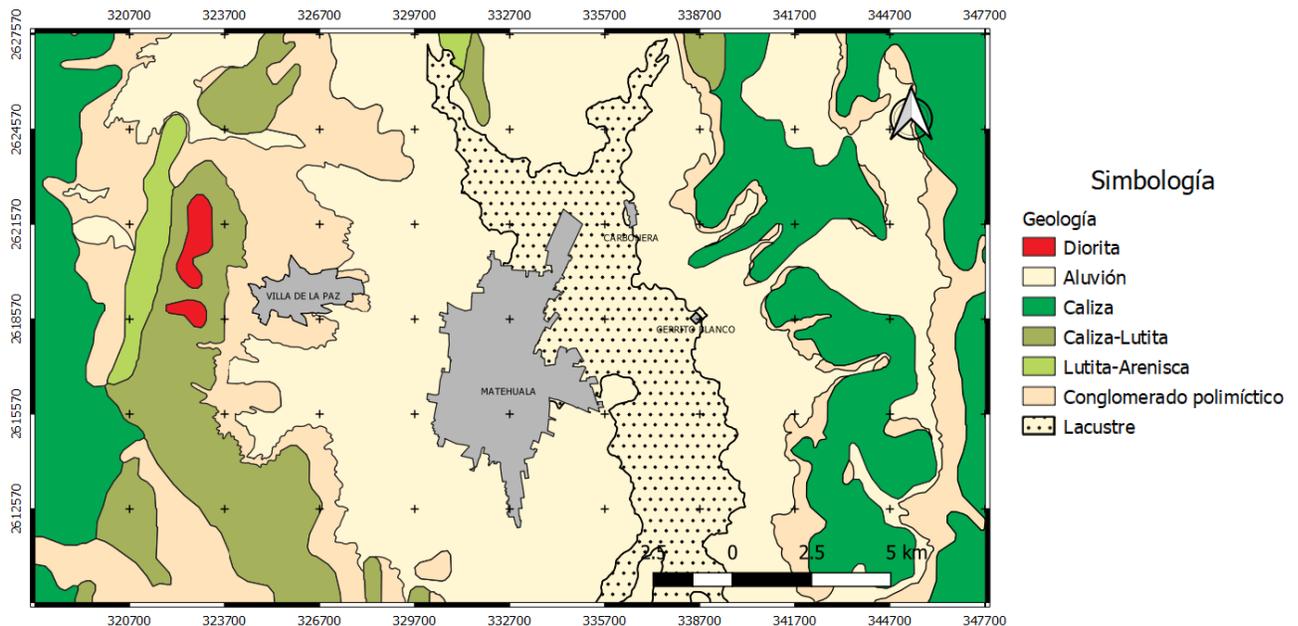


Figura 12. Mapa geológico del Valle de Matehuala.

3.3 - Tipo y uso de suelo

En la zona del Valle de Matehuala existen siete distintos tipos de suelo: gypsisoles (suelos con acumulación secundaria de yeso) y calcisoles (suelos con acumulación secundaria de calcita) encontrados principalmente en la parte central del valle, leptosoles (suelos jóvenes y delgados muy pedregosos) asociados principalmente a las rocas sedimentarias de ambas sierras, regosoles (suelos poco desarrollados sobre materiales no consolidados) en la parte norte de la sierra El Fraile, Chernozem (suelos negros con alto contenido de materia orgánica) asociados con las rocas ígneas, Kastañozem (suelos pardos con alto contenido de materia orgánica) en la ladera norte del Fraile y Phaeozem (suelos rojizos ricos en nutrientes) en el SO (figura 13); (INEGI, 2007); (FAO, 2008).

La región de Matehuala-Villa de la Paz tiene una población de aproximadamente 108,000 habitantes de las cuales más de 102,000 viven en la zona de Matehuala y cerca de 5,300 en Villa de La Paz. Las principales actividades económicas de la región son minería, agricultura, ganadería, comercio y turismo. Las actividades industriales se concentran cerca de la ciudad de Matehuala y consisten principalmente en la fabricación de ropa, componentes automotrices, eléctricos y el procesamiento de alimentos (Chiprés, 2009); (INEGI, 2020).

En Villa de la Paz, la economía gira en torno a la empresa minera “Beneficiadora la Paz y Anexas S.A. de C.V.” que se localiza dentro del poblado, que ejecutan las etapas de fragmentación del mineral y la concentración por flotación selectiva de los minerales de valor económico y es la mayor productora de concentrados de Cu y Au del estado de San Luis Potosí (Chávez et al., 2011).

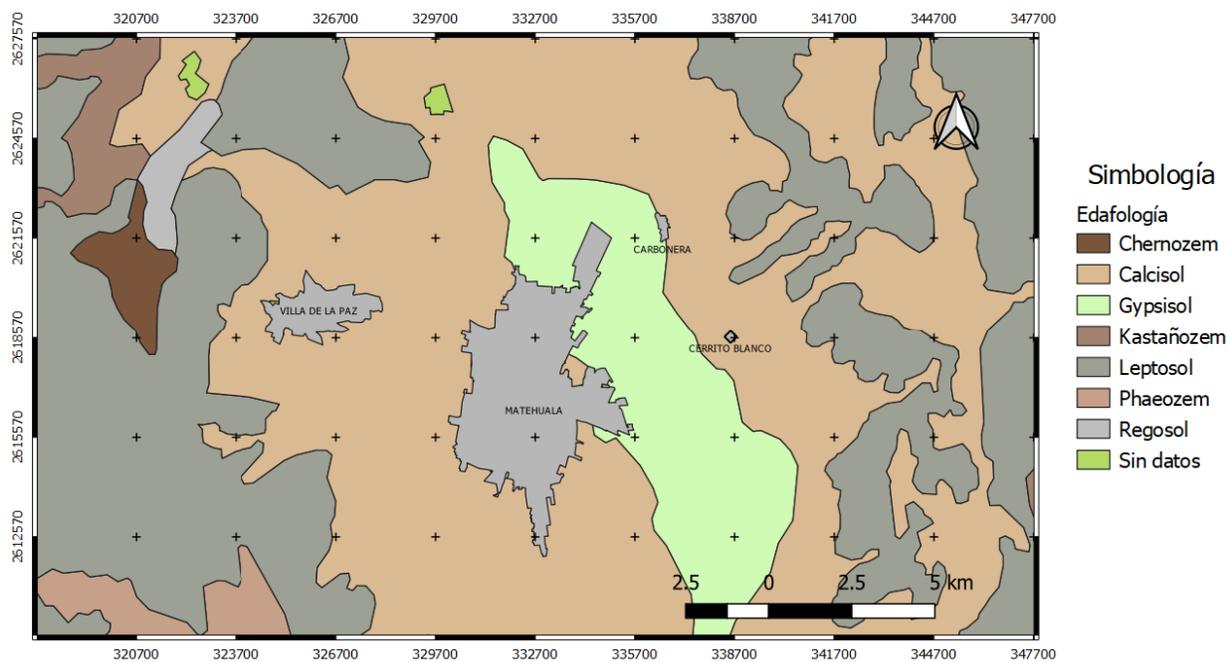


Figura 13. Mapa edafológico del Valle de Matehuala.

3.4 - Hidrografía

El Valle de Matehuala se encuentra ubicado dentro de la Región Hidrológica No. 37 “El Salado” (RH 37), que abarca la parte centro y norte del estado de San Luis Potosí, en la subcuenca Matehuala (37-BA) (CONAGUA, 2018). Las corrientes de agua presentan un patrón hidrográfico de tipo endorreico y dendrítico; conformada por arroyos intermitentes que se generan durante la época de lluvias de verano, tienen una dirección O-E hacia la zona del valle de Matehuala, el arroyo “La Paz” es el más importante (Chávez et al., 2011). Este se origina a partir de la unión de varios arroyos procedentes de la zona sur del flanco E del cerro “El Fraile” y en su cauce atraviesa el área de presas de jales de Villa de la Paz. El arroyo se dirige hacia el E por un costado de la carretera Villa de la Paz-Matehuala en donde se une con otro arroyo procedente de la zona norte del cerro, posteriormente, cerca de la U.H. INFONAVIT Fidel Velázquez de Matehuala ocurre la intersección de otros arroyos resultando en un solo arroyo que atraviesa la ciudad de Matehuala en su zona norte y finalmente se dirige hacia el E por un costado de la carretera a Dr. Arroyo, con rumbo a la comunidad de Cerrito Blanco. A tres kilómetros al E de Matehuala el cauce del arroyo ha sido desviado hacia un área de cultivo donde se pierde en una fractura en el suelo (figura 14). A este arroyo se le atribuye el transporte de materiales de las presas de jales de Villa de la Paz hasta Matehuala debido a su desbordamiento (Razo, 2002). Además, existe una corriente de agua que va desde el flanco O de “El Fraile” y atraviesa la mayor parte del Valle de Matehuala. Los arroyos tienen órdenes que van desde uno hasta siete. Además, existen pequeños cuerpos de aguas superficiales (estanques) que sirven como bebederos para el ganado o para riego de cultivos (figura 14); (Chávez et al., 2011); (INEGI, 2015).

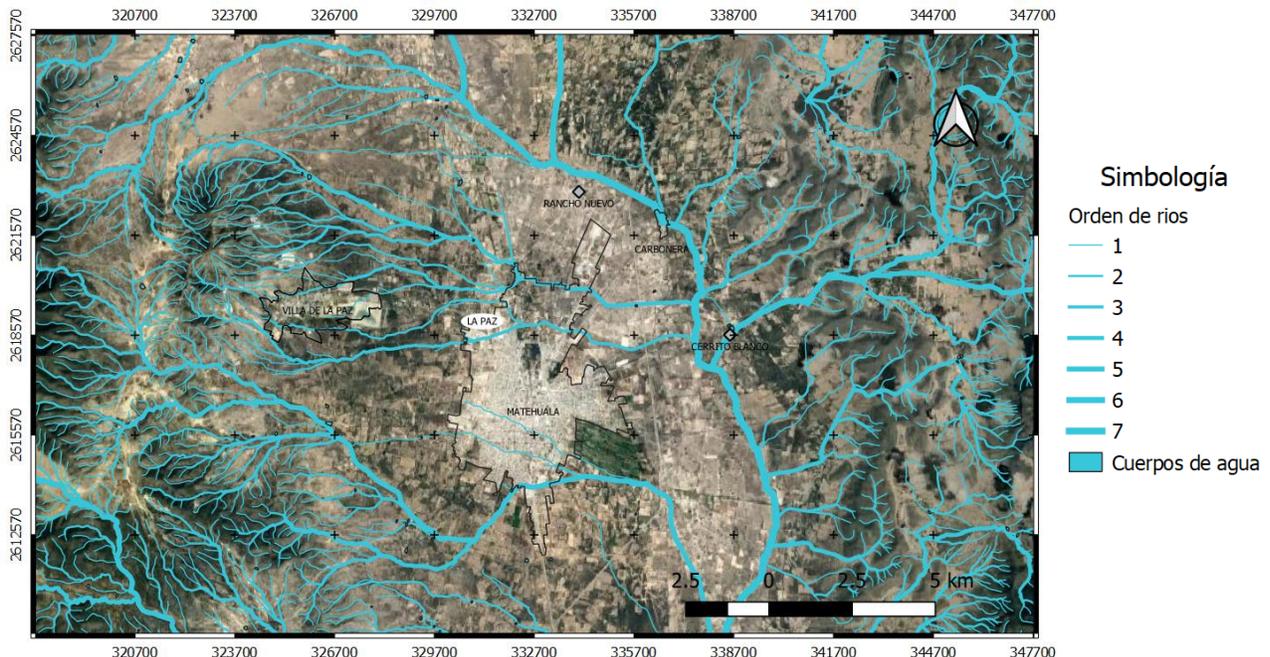


Figura 14. Mapa hidrográfico del Valle de Matehuala.

En el área de estudio existen dos sistemas constituidos por pozos y canales, de hasta 40 [m] de profundidad, construidos a intervalos de 20 [m] en dirección O-E, mientras más se acercan al centro del valle se hacen más superficiales hasta llegar a aflorar y convertirse en canales, contienen

agua durante todo el año, el primero, ubicado a unos 4 [km] al NE de la ciudad de Matehuala, tiene su origen en el poblado Rancho Nuevo, tiene como destino el poblado de Carbonera, se le conoce como Sistema Carbonera, su longitud es de aproximadamente 2.5 [km] y su agua es utilizada para el riego de sembradíos. El segundo sistema se ubica al E de la ciudad de Matehuala, parte del Instituto Tecnológico de Matehuala y termina en una zona recreativa en el poblado de Cerrito Blanco, tiene una longitud de aproximadamente 4 [km] (figura 15); (Razo, 2002).



Figura 15. Mapa de sistema de canales de Matehuala.

3.5 - Hidrogeología

El acuífero correspondiente al área de estudio es el Cedral-Matehuala, su ubicación geográfica está delimitada por los paralelos 23° 29' y 24° 14' latitud norte y los meridianos 100° 27' y 100° 51' longitud oeste aproximadamente. Se encuentra emplazado en una estructura sinclinal cuyo basamento son rocas arcillo-calcáreas y su almacén rocas calcáreas y depósitos aluviales, está clasificado como un acuífero de tipo libre, su dirección de flujo es de N a S siendo Matehuala su área de descarga y cuenta con un espesor aproximado de 300 a 350 [m] (CONAGUA, 2018); (Caicedo, 2020).

Comprende la totalidad del municipio Villa de la Paz, la mayor parte de los municipios de Cedral y Matehuala, y pequeñas porciones de Catorce, Villa de Guadalupe y Vanegas (CONAGUA, 2018); (Caicedo, 2020).

Estudios recientes indican que existe un acuífero somero de tipo colgado en la porción media del valle de Matehuala, cuyo dirección de flujo es de O a E. Se encuentra emplazado en el aluvión (en paleocanales de arena y grava) y hace una transición a las rocas lacustres (yeso), donde

este funciona como un acuitardo evita que este se conecte con el acuífero Cedral-Matehuala (Martínez-Villegas et al., 2013); (Rodríguez-Rodríguez, 2016); (Gómez-Hernández et al., 2020); (Caicedo, 2020).

3.6 - Flora y fauna

El tipo de vegetación está compuesta por matorral desértico micrófilo (MDM), matorral desértico rosetófilo (MDR), pastizal gypsófilo, y también existen áreas para la agricultura de riego y de temporal (Chávez et al., 2011). Las especies más características son: lechuguilla, guapilla, sotol, palma, ocotillo, mezquite y una amplia variedad de cactáceas (Razo, 2002).

La fauna que habita en la región que se puede encontrar en grandes poblaciones son: liebre, conejo, paloma alas blancas, pájaro azul, cuervo, huilota, tordo, águila, gavilán, coralillo y víbora de cascabel, mientras que, en pequeñas cantidades y de paso: coyote, zorrillo y codorniz común (Razo, 2002).

Mediante el empleo de herramientas de análisis espacial de imágenes satelitales, se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (figura 16), utilizando imágenes del satélite Sentinel-2, con un tamaño de píxel de 10 [m], subidas el día 20-05-2019. El NDVI se define como la reflectancia de la banda infrarroja simulada (NIR), menos la reflectancia de la banda roja simulada (VIS), dividida entre la suma de estas bandas (Zhang et al., 2018). Ha sido ampliamente utilizado para la clasificación de vegetación y derivación biofísica de parámetros radiométricos y estructurales de vegetación (Matsushita et al., 2007). Su ecuación es la siguiente:

$$NDVI = (NIR - VIS)/(NIR + VIS)$$

Los valores de NDVI se agruparon en una tabla (tabla 6) utilizando la clasificación propuesta por López-Pérez et al. (2015).

Clasificación	Valor
Nubes y agua (NA)	< 0.01
Suelo sin vegetación (SV)	0.01 – 0.1
Vegetación ligera (VL)	0.1 – 0.2
Vegetación mediana (VM)	0.2 – 0.4
Vegetación alta (VA)	> 0.4

Tabla 6. Clasificación de valores de NDVI (modificado de López-Pérez et al., 2015).

3.7 - Estudios medioambientales

3.7.1 - Suelos

La geoquímica de los suelos de la zona Villa de la Paz – Matehuala ha sido estudiada con anterioridad en numerosas ocasiones, el estudio más amplio fue realizado por Razo (2006), y su objetivo fue determinar cuáles eran las áreas que presentaban concentraciones elevadas de metales pesados (área de influencia). Los datos obtenidos de este estudio fueron los siguientes (tabla 7):

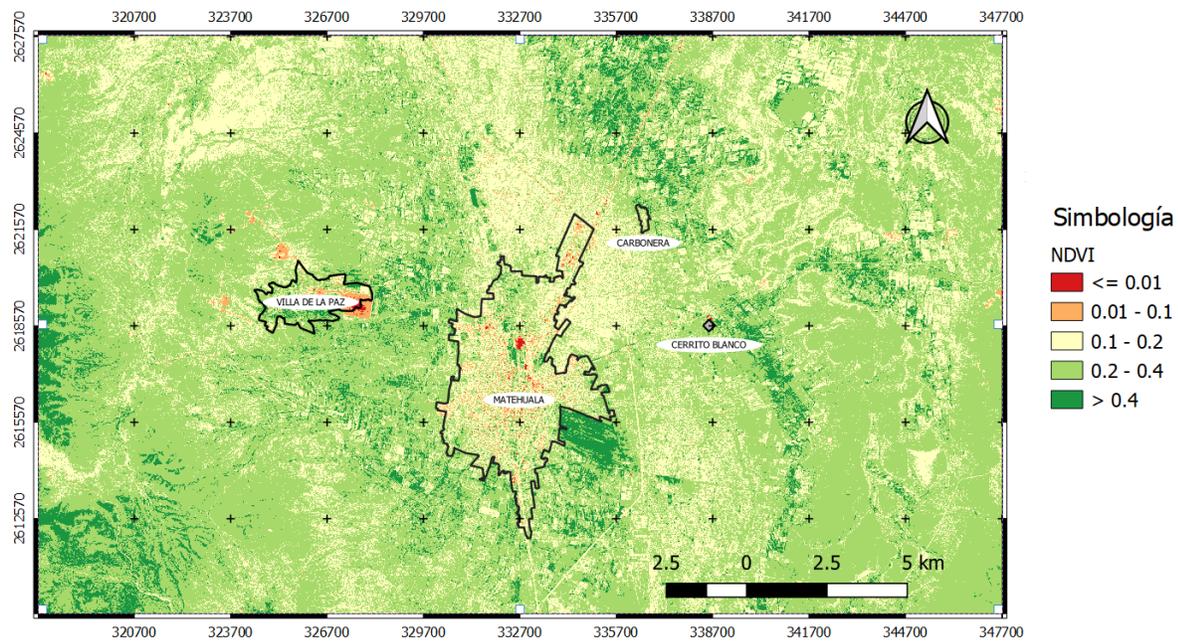


Figura 16. Mapa de NDVI del Valle de Matehuala.

Elemento	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	Rango [mg/kg]	SDEV [mg/kg]
As	939	256	7 - 14,923	1,838
Pb	518	231	27 - 6,429	761
Cd	16	8	0.2 - 274	24
Cu	440	276	15 - 7,200	636
Zn	763	393	26 - 12,971	1,161

Tabla 7. Tabla de concentraciones de metales pesados en suelos de la zona de Villa de la Paz – Matehuala (Modificado de Razo, 2006).

Utilizando los datos de este estudio, mediante el método de Kriging, se realizó una reinterpretación de estos, y se generaron mapas de concentraciones de distintos elementos (figura 17,18,19,20) empleando el programa “Qgis 3.10 - A Coruña”, con la finalidad de establecer áreas de influencia y así determinar posibles zonas con nulo o poco impacto antropogénico que sirvan de base para la búsqueda de valores de fondo.

El método Kriging se encarga de cuantificar la estructura espacial de los datos (mediante el uso de variogramas llamados algunas veces semivariogramas debido a su similitud en el cálculo) y los predice mediante el uso de interpolaciones, usando la estadística. En este método los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés (Villatoro et al., 2007).

El método ordinario de Kriging obtiene la influencia de los valores, resolviendo la ecuación Kriging, mostrada a continuación (Villatoro et al., 2007):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma[d(s_i, s_j)] + m = \gamma[d(s_o, s_i)], \quad i = 1, \dots, n; \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Donde n es el número de observaciones, m es el multiplicador Lagrange usado para la minimización de las restricciones, λ es el peso dado a cada una de las observaciones y la suma de todos los λ es igual a uno. Los subíndices i y j denotan los puntos muestreados, el subíndice o es el punto en estimación, s simboliza la medición efectuada (variable medida) y $d(s_i, s_o)$ es la distancia entre s_i y s_o a partir del semivariograma:

$$\gamma[d(s_o, s_i)] = \text{var} [z(s_i) - z(s_o)]$$

Esta semivarianza calculada es una medida que permite determinar la similitud entre observaciones, en donde a mayor similitud, menor semivarianza. La influencia (λ) de los valores, es calculada con el fin de asegurar que el error promedio para el modelo sea cero y además la varianza del error es minimizada, lo cual ofrece una predicción no sesgada (Villatoro et al., 2007).

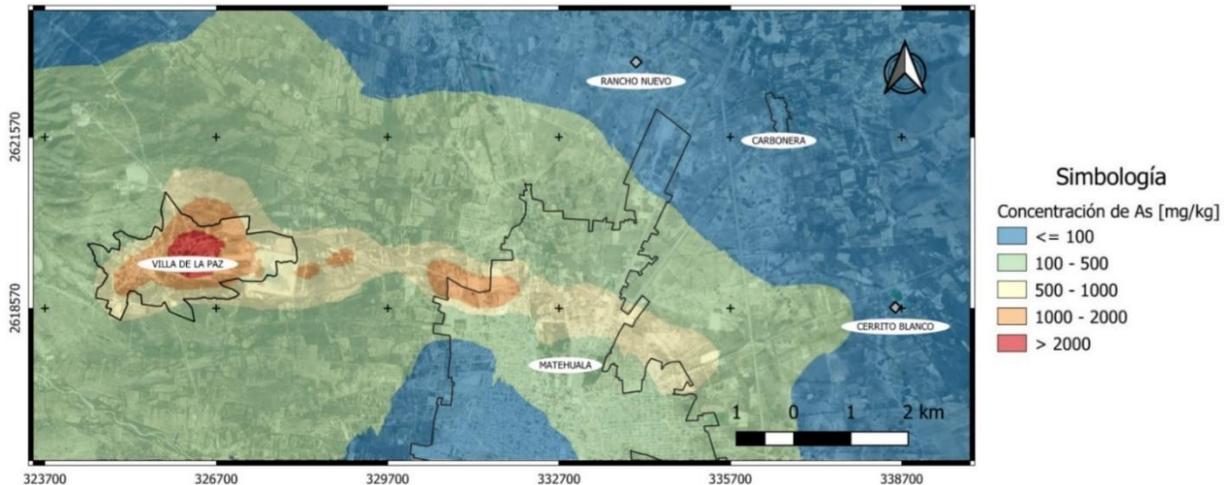


Figura 17. Mapa de distribución de concentraciones de As generado con el método Kriging (A partir de los datos de Razo (2006)).

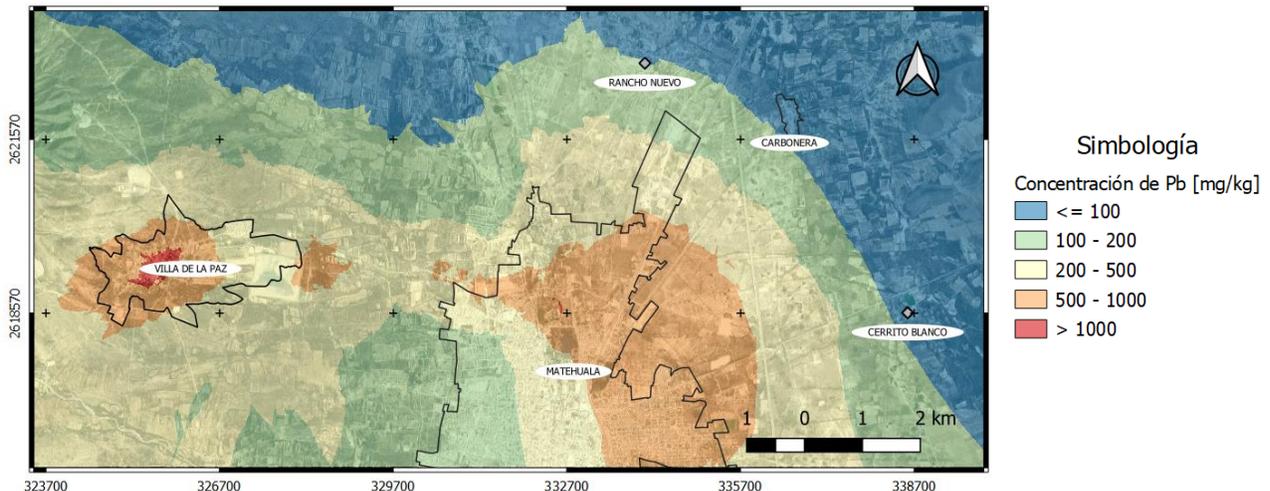


Figura 18. Mapa de distribución de concentraciones de Pb generado con el método Kriging (A partir de los datos de Razo (2006)).

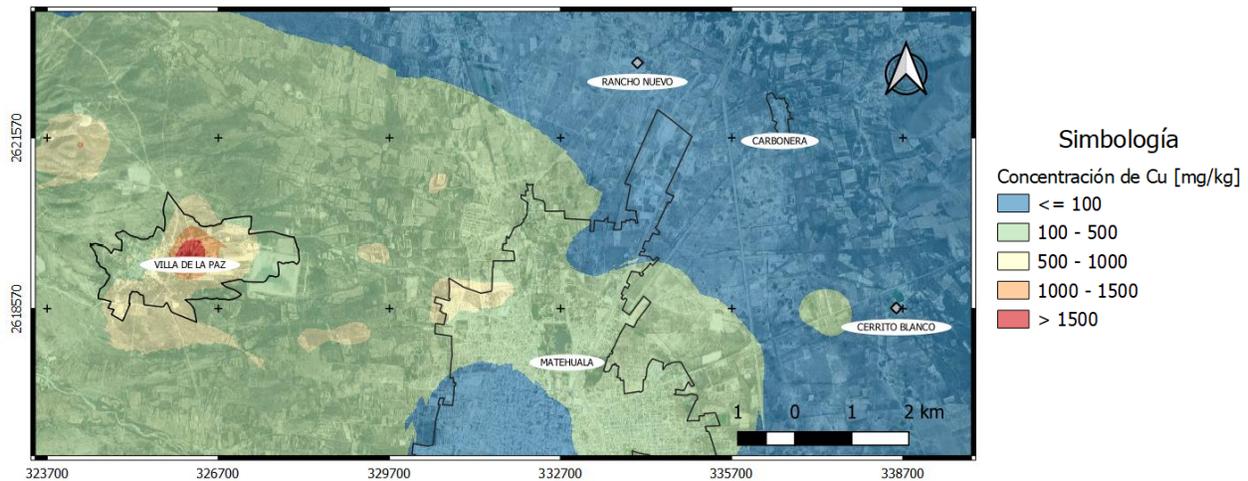


Figura 19. Mapa de distribución de concentraciones de Cu generado con el método Kriging (A partir de los datos de Razo (2006)).

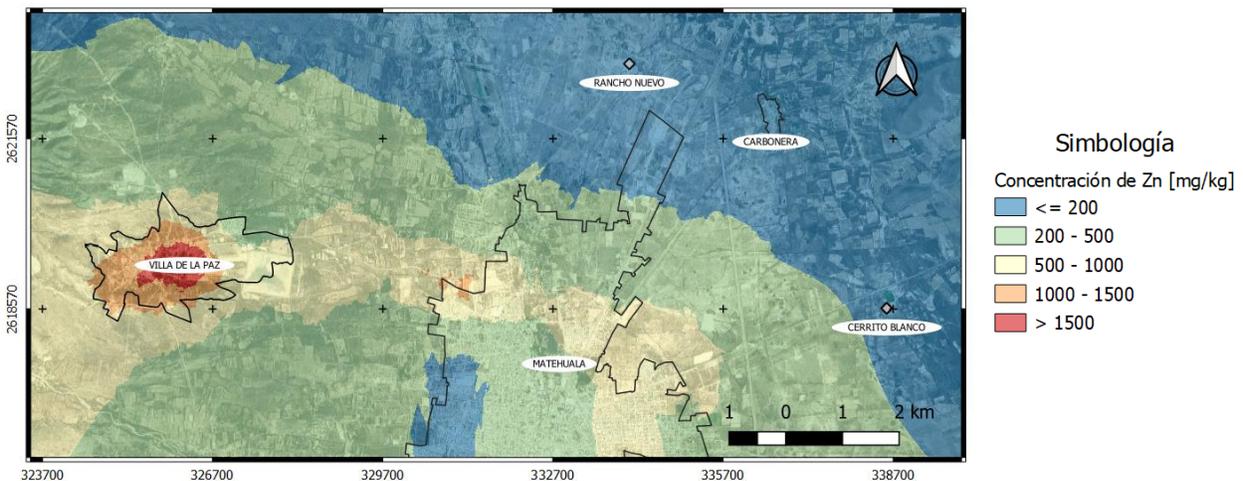


Figura 20. Mapa de distribución de concentraciones de Zn generado con el método Kriging (A partir de los datos de Razo (2006)).

3.7.2 - Sedimentos

En estudios previos de la geoquímica de sedimentos de Villa de la Paz – Matehuala, Monroy et al. en 2002 registraron concentraciones de As de 20 a 28,600 [mg/kg], Cu de 50 a 3,630 [mg/kg], Pb de 50 a 2,160 [mg/kg] y Zn de 110 a 5,940 [mg/kg] en sedimentos de arroyos y de tanques de almacenamiento de agua pluvial. Además, en el sistema de pozos y canales Cerrito Blanco se midieron concentraciones de As de 400 a 1,500 [mg/kg] (Caicedo, 2020).

Razo et al. (2004) analizaron muestras de sistemas con presencia de agua (pozos, canales y agua de mina) y de sistemas secos (ríos o arroyos en temporada de sequía) que tuvieran la posibilidad de dispersar los contaminantes debido a su ubicación próxima a la zona de las minas, terreros y presas de jales.

Los resultados obtenidos del estudio de Razo et al. (2004), fueron sintetizados en una tabla (tabla 8), que indica el tipo de sitio en el cual fueron muestreados los sedimentos, así como su promedio y el rango de valores de estos.

Estanques de almacenamiento y canales de agua de mina				
Elemento	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]
Promedio	1,503	779	2,153	1,034
Rango	103 - 5,917	57 - 3,240	162 - 9,780	158 - 2,280
Sistema de pozos y canales (Cerrito Blanco)				
Promedio	981	283	189	85
Rango	410 - 1,432	112 - 654	125 - 396	51 - 195
Corrientes de agua secas				
Promedio	4,173	672	1,025	1,243
Rango	105 - 28,599	72 - 2,160	106 - 3,630	132 - 5,940

Tabla 8. Tabla de concentraciones de promedio de metales pesados en sedimentos de la zona de Villa de la Paz – Matehuala (Generada a partir de los datos de Razo, 2004).

3.7.3 - Agua

La geoquímica del agua de la zona Villa de la Paz - Matehuala, varía considerablemente dependiendo de su fuente y ambiente geoquímico. En condiciones naturales los rangos más altos de concentraciones de metales pesados son resultado de las interacciones agua-roca, condiciones como el pH y el potencial de oxidación-reducción (Eh), sin embargo, también se pueden apreciar concentraciones elevadas de metales pesados asociadas con su proximidad a las fuentes de contaminación antropogénica (Monroy et al., 2002); (Martínez-Villegas et al, 2013); (Lara-del Río, 2015).

Debido a las diversas fuentes de contaminación, ha sido complicado esclarecer un rango de valores de concentraciones de metales en el agua de la zona. Uno de los elementos más estudiados es el As por el impacto que su ingesta a largo plazo puede ocasionar a la salud. Monroy et al. en 2002 registraron concentraciones de hasta 265 [µg/L] en tanques de almacenamiento de agua pluvial, lo cual representa cinco veces más que lo permitido por la NOM-127-SSA1-1994 (50 [µg/L]) (Monroy et al., 2002); (Lara-del Río, 2015); (Caicedo, 2020).

El sistema de pozos y canales “Cerrito Blanco” ha sido ampliamente estudiado ya que históricamente se han registrado concentraciones elevadas de As. Monroy et al. (2002) midieron concentraciones de As de 4,800 a 7,000 [µg/L]. Razo et al. en 2004 lo analizaron obteniendo concentraciones de 7,165 a 5,894 [µg/L]. Estudios más recientes y detallados como el de Martínez-Villegas et al. (2013) registraron concentraciones de entre 5.1 y 19.6 [mg/L] de As en el sistema y un promedio 91.5 [mg/L] en un surgimiento de agua conocido como “Campo de tiro”, el cual está conectado al sistema formando parte del acuífero somero (Gómez-Hernández et al., 2020).

Con los datos de Martínez-Villegas et al. (2013); (tabla 9), se realizó una interpolación de Kriging con las concentraciones promedio de As del sistema (figura 21) en la que se puede apreciar la distribución de este.

Punto de muestreo	Lugar	Fuente y profundidad al espejo de agua	X	Y	Concentración promedio de As [mg/L]
A	Campo de tiro	Resurgimiento de agua - 2 [m]	332802	2617518	91.51
B	Instituto Tecnológico de Matehuala	Lumbrera - 34 [m]	333710	2618423	11.27
C	Afuera del Instituto	Lumbrera - 23 [m]	334314	2618679	11.69
D	Camino rural	Lumbrera - 13 [m]	335359	2618896	11.42
E	Camino rural	Canal - 5 [m]	335736	2618975	11.26
F	Camino rural	Canal 0.5 [m]	336395	2619102	11.18
G	Granja	Canal - 0 [m]	337934	2619038	10.52
H	Entrada al estanque de Cerrito Blanco	Canal- 0 [m]	338492	2618869	10.69

Tabla 9. Tabla de concentraciones de promedio de As del sistema de pozos y canales Cerrito Blanco (Modificado de Martínez-Villegas, 2013).

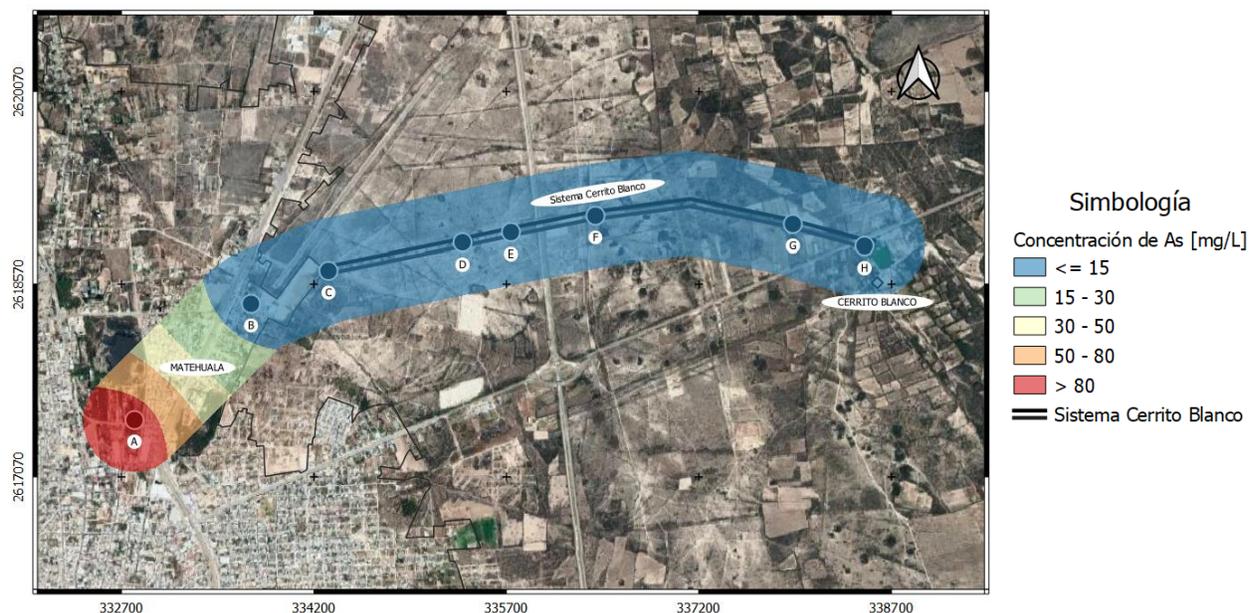


Figura 21. Mapa de distribución de concentraciones de As del sistema de pozos y canales Cerrito Blanco generado con el método Kriging (A partir de los datos de Martínez-Villegas et al., 2013).

3.8 - Modelos de dispersión eólico e hidrográfico

Para predecir la dispersión de los contaminantes, se realizó un modelo de dispersión eólica e hidrográfico tomando como puntos de visibilidad (sitios a partir de los cuales se genera la dispersión), los terreros y presas de jales, no así, las escorias ya que estas no pueden ser dispersadas eólicamente.

Un modelo de dispersión eólica consiste en determinar las áreas de visibles desde cada punto o conjunto de puntos de visibilidad, bien simultáneamente o en secuencia, para la posterior evaluación de la medida en que cada área (punto de visibilidad) contribuye a la acumulación, nos permiten determinar áreas de acumulación de contaminantes o puntos vulnerables a esta contaminación (Goyal & Krishna, 2002); (Otero et al., 2009).

Por otro lado, el modelo de dispersión hidrográfico nos permite conocer cuál es el área en la cual puede ser distribuido un contaminante que es transportado de manera hídrica, depende principalmente de parámetros como la pendiente, velocidad flujo y volumen de precipitación, que nos indicaran cuales son los tamaños de partículas que se pueden movilizar (Hernández-Cruz et al., 2015). El proceso de generación de estos modelos puede ser explicado mediante un modelo lógico conceptual (figura 22).

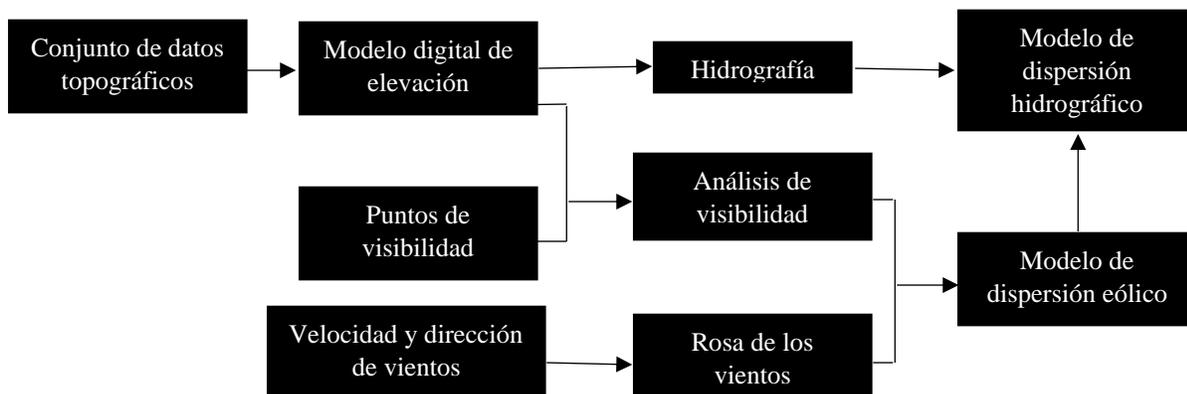


Figura 22. Modelo lógico-conceptual de la generación de los modelos de dispersión eólica e hidrográfico.

El modelo de dispersión eólica (figura 23) nos muestra una aproximación del número de sitios que pueden depositar partículas en un área en específica, ya que estos jales y terreros han sido depositados desde hace varias décadas, se hizo la suposición que la distancia de dispersión es infinita, y que la altura máxima que pueden alcanzar los jales es de 10 [m]. Para el modelo de dispersión hidrográfico (figura 24) al tratarse de una pendiente moderada se realizó la consideración de que la distancia máxima a la cual pueden influenciar a partir de su cauce es de 50[m] (Torres, 2010).

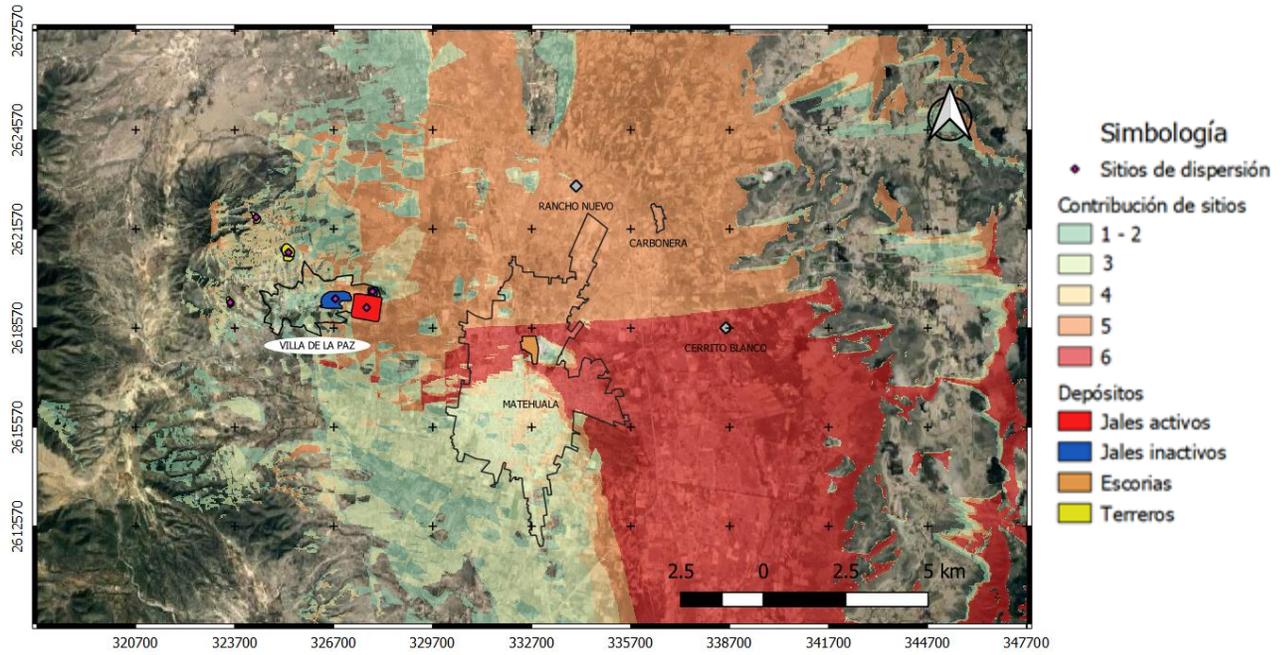


Figura 23. Modelo de dispersión eólica del Valle de Matehuala.

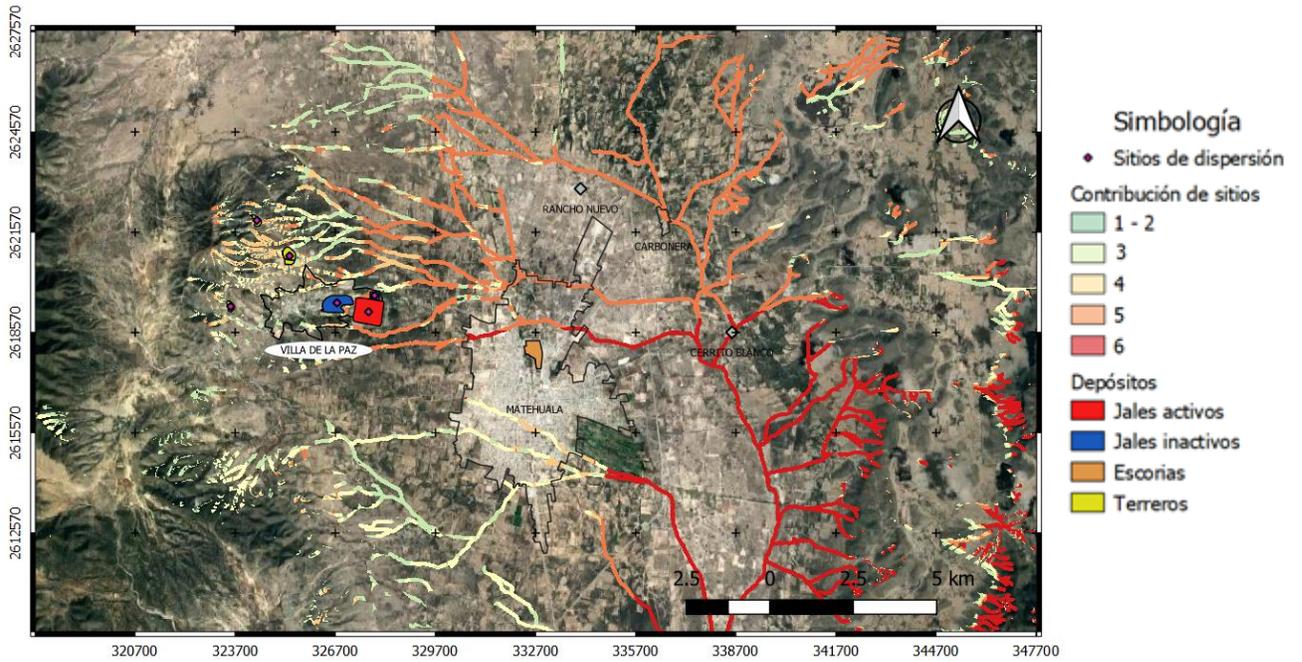


Figura 24. Modelo de dispersión hidrográfico del Valle de Matehuala.

4. - Caracterización de las fuentes de contaminación

4.1 - Metodología

Para la caracterización de las fuentes de contaminación se diseñó un plan de muestreo y análisis para aquellas de las que se carecía de información (jales y residuos de tostación) y una recopilación de información de las más estudiadas (escorias y polvos residuales de metalurgia) a partir de datos proporcionados de manera personal por Caicedo (2020) y Sierra-Salamanca (2020).

Una vez obtenidos los datos se utilizó tanto la estadística básica, como métodos de análisis univariado (coeficiente de correlación de Pearson) y multivariado (*hierarchical clustering* y diagramas ternarios). En la estadística básica se utilizaron los parámetros promedio, mediana, desviación estándar (SDEV), desviación absoluta con respecto a la mediana (MAD), máximos, mínimos y coeficiente de variación (CV).

4.1.1 - Muestreo

El muestreo de jales y residuos de tostación consistió en la toma de cincuenta y cuatro (54) muestras superficiales simples (figura 25), y treinta y cinco (35) muestras en 8 zanjas de entre 0 a 100 y 200 [cm] de profundidad (figura 26), de aproximadamente 1 [kg] cada una, tomadas con una cuchara (pala) de acero inoxidable para evitar su contaminación. Se distribuyeron en tres depósitos de jales (presas de jales), dos antiguas y una activa, y un depósito de residuos de un proceso de tostación.

Los puntos de muestreo dentro de las presas de jales y el depósito de residuos de tostación (anexo 1) se seleccionaron considerando una distribución sistemática que abarcara toda la extensión de los depósitos, asegurando de esta manera la mayor representatividad posible.

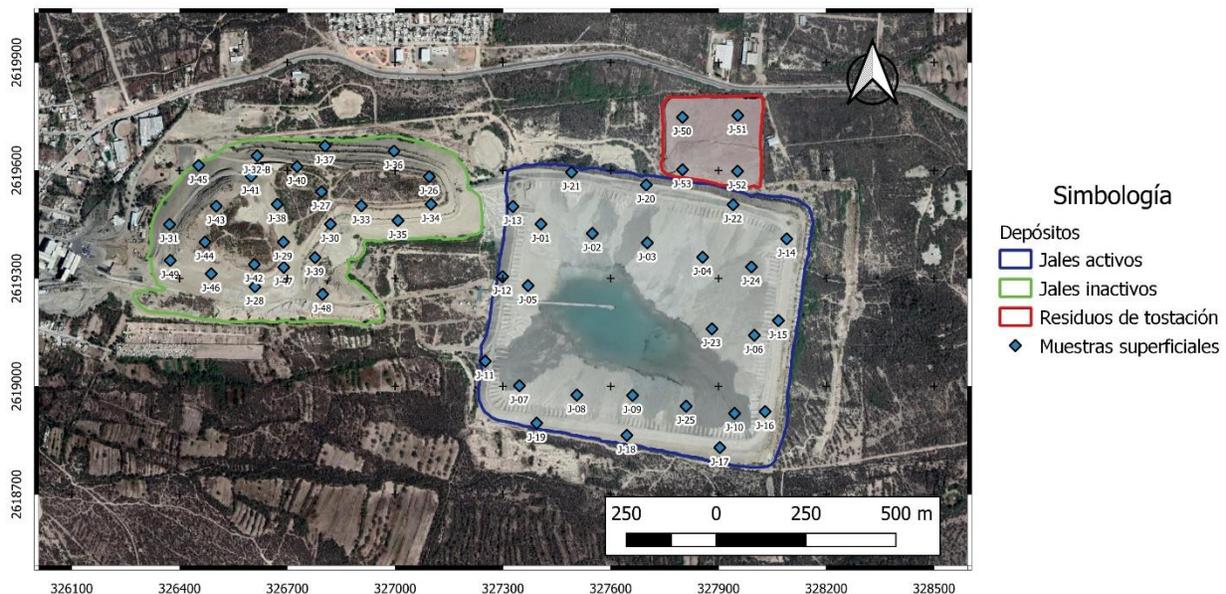


Figura 25. Mapa de distribución de puntos del muestreo de jales superficiales y depósitos de residuos de tostación (n=54).



Figura 26. Mapa de distribución de puntos del muestreo de zanjas en jales y depósitos de residuos de tostación ($n=8$).

4.1.2 - Preparación de muestras

Las muestras de jales superficiales y zanjas obtenidas fueron secadas a 40 °C, cuarteadas, tamizadas a un tamaño de partícula <2 [mm] (malla 10) y envasadas en bolsas de polietileno para los análisis de pH y CE.

Para realizar los análisis de la concentración de elementos totales por FRX, las muestras fueron cuarteadas hasta obtener una muestra de 50[g], y pulverizadas en un molino pulverizador de anillos concéntricos marca Herzog con recipiente de carburo de tungsteno, finalmente se procedió a un nuevo tamizado de un tamaño de partícula de 250 [μ m] (malla 60).

4.1.3 - Análisis de laboratorio

4.1.3.1 - Parámetros fisicoquímicos (Determinación de pH y CE)

La medición de pH y CE se realizó en el extracto con una relación [1:5] material: agua doblemente desionizada MilliQ con agitación orbital de 180 [rpm] por 1[h] con un tiempo de sedimentación de 1[h] por triplicado.

La medición de pH se realizó en un equipo Denver Instrument Ultrabasic (UB) 10 (figura 27), calibrado con las soluciones buffer de pH = 4.01, pH = 7.01 y pH= 10.01, según el procedimiento establecido en la NMX-AA-025-1984.

La medición de la CE se realizó en un equipo OAKTON CON 700 (figura 27) calibrado con una solución de calibración de 1413 [μ S/cm], según el método establecido por la *Soil Science Society of America* (SSSA) en el libro *SSSA Series 5 Part 3 Chapter 14 - Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids* (Sparks, 1996).

4.1.3.2 - Concentraciones totales por FRX

Se realizó la determinación de concentraciones totales la suite de elementos: As, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Ti, V y Zn, empleando el analizador portátil de FRX “Niton XL3t Ultra” de Thermo Scientific (figura 27), en su modo de suelos con tres filtros y un tiempo de análisis de 30[s] por cada filtro de acuerdo con el método estandarizado US-EPA 6200 (US EPA, 2007). El informe de resultados obtenidos se generó mediante el software “Niton Data Transfer” de Thermo Scientific.

Como control de calidad cada veinte muestras se midieron los materiales: Montana Soil 2710 y un blanco (Óxido de silicio). Además, se generaron duplicados analíticos para corroborar la precisión y exactitud, por lo que los resultados son analíticamente aceptables.

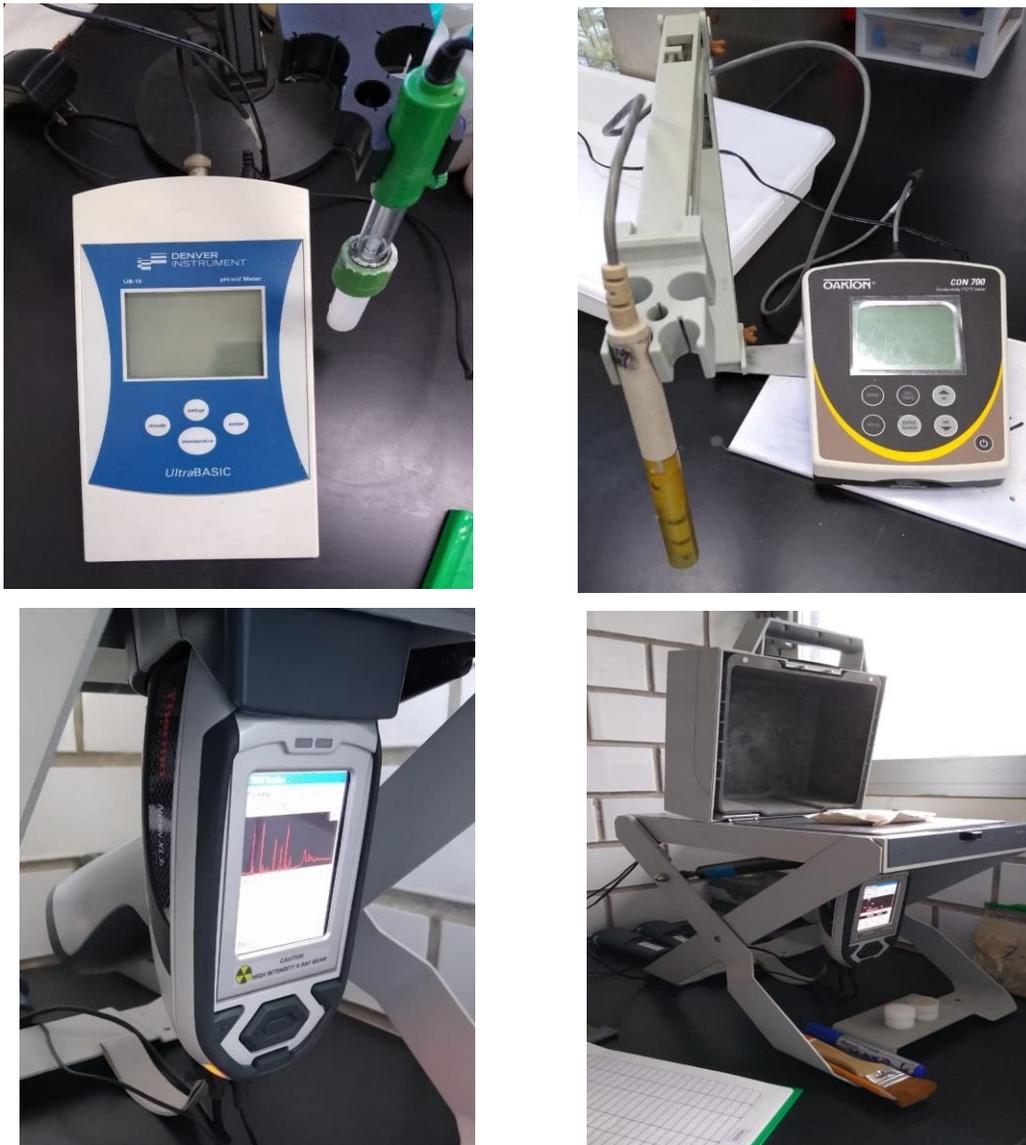


Figura 27. Equipo instrumental utilizado para el análisis de las muestras, Denver Instrument Ultrabasic (UB) 10 (arriba izquierda), OAKTON CON 700 (arriba derecha) y Niton XL3t Ultra (abajo).

4.1.4 - Análisis estadístico

4.1.4.1 - Métodos univariados

Coefficiente de correlación de Pearson

Es un método de análisis univariado que se utiliza para medir la dependencia lineal de dos variables aleatorias cuantitativas, a diferencia de otros métodos bivariados como la covarianza es independiente de las escalas de medida de las variables. Suele representarse con una r , puede tomar valores que van de -1 a 1.

Los valores de $0 < r \leq 1$ nos indican correlaciones lineales positivas, valores cercanos a 0 nos indican una nula correlación lineal, sin embargo, debe considerarse que podría tener otro tipo de correlación no lineal, finalmente, valores de $-1 \leq r < 0$ se trata de correlaciones lineales negativas (figura 28); (Restrepo & González, 2007).

Se calcula mediante la siguiente formula:

$$r_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Donde r_{xy} es el coeficiente de correlación lineal de Pearson, σ_{xy} es la covarianza de (x, y), σ_x es la desviación estándar (SDEV) de x, del mismo modo, σ_y es la desviación estándar de y.

De una manera análoga podemos representarla como:

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

Donde n es el número de datos, $\sum x_i y_i$ es la sumatoria de x por y, $\sum x_i$ es la sumatoria de los valores de x y $\sum y_i$ es la sumatoria de los valores de y.

4.1.4.2 - Métodos multivariados

Hierarchical clustering

El *Hierarchical clustering* o agrupamiento jerárquico es un tipo de análisis de agrupamiento en el cual se construye un “árbol” o dendrograma para representar los datos. Las familias de datos se agrupan en segmentos u hojas que se conectaran con otros en grupos de dos dependiendo de las semejanzas de estos grupos, este nuevo segmento o rama se unirá a otro y así sucesivamente hasta formar una estructura de “árbol” que incluya a todos los grupos (figura 29). En este dendrograma los segmentos que se unen de forma temprana corresponden a grupos de elementos con mayor semejanza entre sí (Tiwari, 2017).

Existen distintos métodos para realizar el agrupamiento, en este trabajo se utilizará el agrupamiento por el método de grupo de pares no ponderados con media aritmética (UPGMA) que se trata de un algoritmo que permite calcular las distancias promedio de cada uno de los elementos

de un grupo con todos los elementos de los diferentes grupos, para así, de acuerdo con su proximidad generar las agrupaciones (figura 30); (Hammer, 2019).

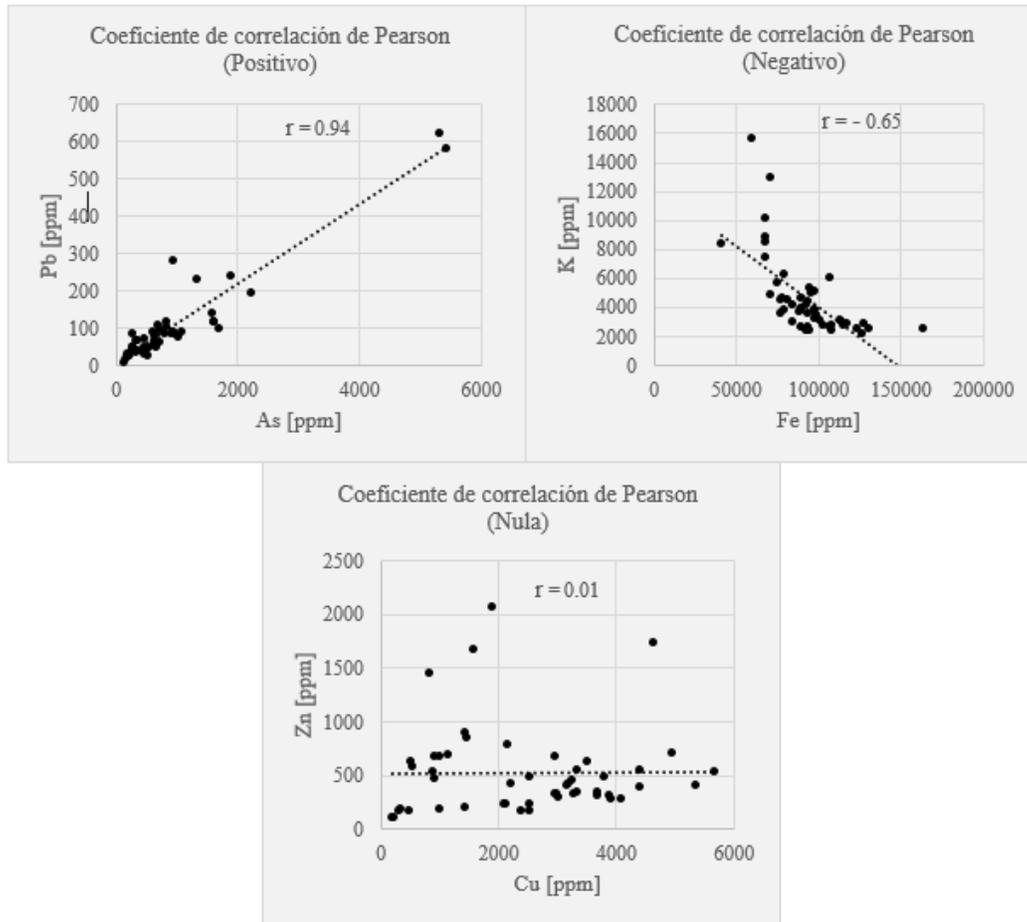


Figura 28. Diagramas de correlación con diferentes valores de coeficiente de correlación de Pearson (r). Correlación positiva (arriba izquierda), correlación negativa (arriba derecha), correlación nula (abajo).

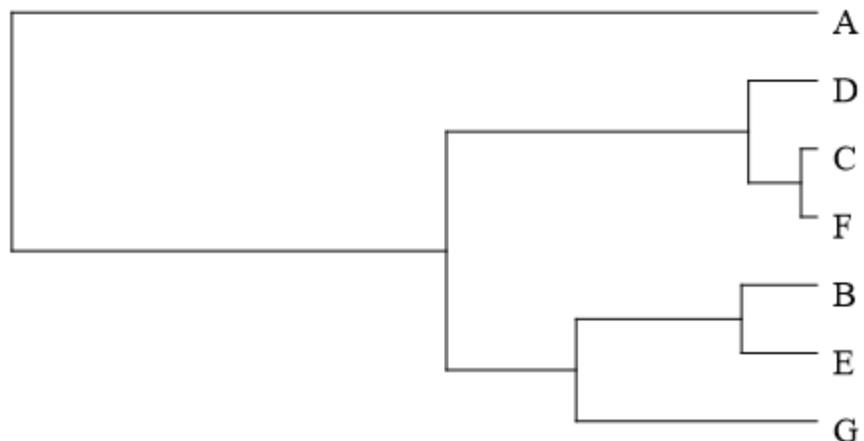


Figura 29. Ejemplo de dendrograma que se genera mediante un análisis de Hierarchical clustering.

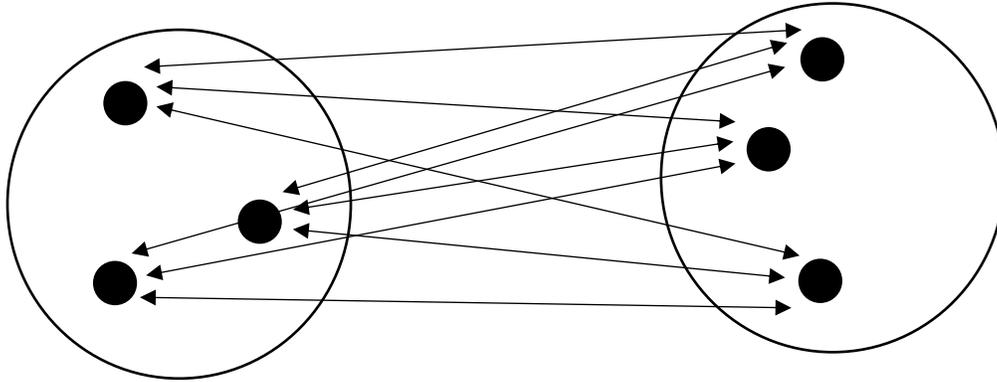


Figura 30. Diagrama esquemático del funcionamiento de agrupación por medio de UPGM, en el cual se muestra el cálculo de las distancias promedio de cada elemento de un grupo con cada uno de los elementos del otro.

Las distancias entre los elementos de estos grupos se calcularon mediante distancias euclidianas (entre filas). Las distancias euclidianas (entre filas) se trata simplemente del cálculo de la raíz cuadrada de las diferencias cuadradas entre los elementos correspondientes de las filas. Es uno de los métodos más usados para calcular las distancias entre elementos (Hammer, 2019). Su fórmula es la siguiente:

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{ik} - X_{jk})^2}$$

Donde X es una matriz cuyas filas son i y j.

Diagramas ternarios

Los diagramas ternarios son herramientas gráficas que nos permiten representar sistemas de tres componentes y observar cómo estos interactúan entre sí, además, convenientemente cada uno de los lados del que constituye el triángulo de este diagrama es un sistema binario, lo que nos permite obtener aún más información de este tipo de gráficos (Hewlett & Liska, 2019).

Son diagramas triangulares en los que cada uno de sus vértices representa el porcentaje de un componente (figura 31) y han sido ampliamente utilizados en distintas disciplinas de la ciencia, debido a que con ellos se pueden establecer distintas zonas que sirven para clasificar una gran variedad de elementos. En las ciencias de la tierra se utiliza para la paleontología, geoquímica, sedimentología y tienen una importancia aún más significativa en la petrología debido a que la mayoría de los sistemas utilizados en ella están basados en ellos (Weltje, 2002).

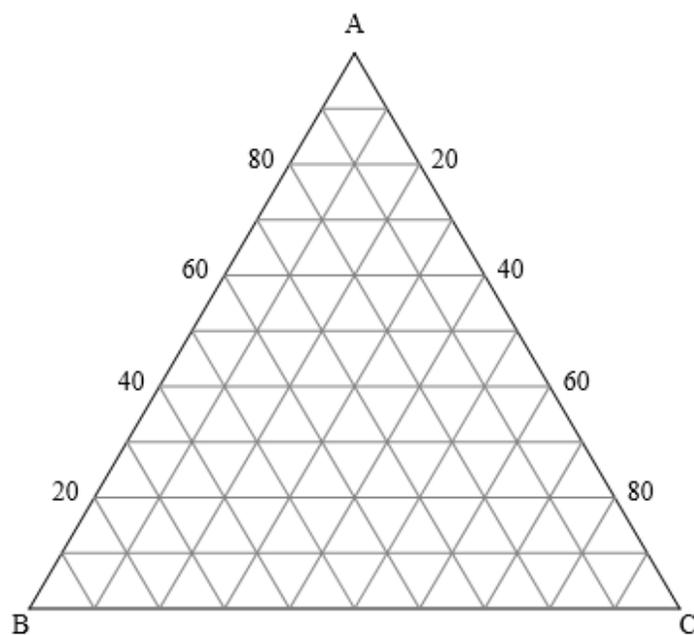


Figura 31. Estructura característica de un diagrama ternario.

4.2 - Resultados

De acuerdo con algunas de sus características fisicoquímicas (color, pH, CE) , variaciones en la concentración de elementos e investigación documental, las muestras de jales y residuos de tostación fueron agrupadas como:

- Jales (agrupa la presa de jales activa (gris) e inactivas (café)) (J01 - J49) (n=50)
- Residuos de tostación (presa pequeña de color rojizo) (J50 - J53) (n=4)

La lista completa de análisis de pH, CE y concentraciones totales de elementos se encuentra en los anexos (anexo 2). Las concentraciones de elementos obtenidos de las muestras arrojaron valores que se encuentran por debajo del límite de detección (LOD) del equipo, por lo que, para el uso estadístico de los datos estos fueron reemplazados por la mitad del valor del límite de detección del equipo.

Para realizar los análisis geoestadísticos de las muestras, se utilizó Excel y PAST, que se trata de un software libre para análisis de datos científicos, que permite la manipulación y graficado de datos, así como análisis estadístico univariado y multivariado de datos, fue creado por la Universidad de Oslo.

4.2.1 - Jales superficiales

Para la caracterización de los jales superficiales se obtuvo el rango, y los demás parámetros estadísticos básicos. Los resultados obtenidos y agrupados en la tabla (tabla 10) muestran que los jales se caracterizan por sus contenidos de $Cu > Mn > As > Zn > Ti > Pb > Cr$, la conductividad eléctrica es variable desde 31 a 2,910 [$\mu S/cm$], mientras que, el pH ronda entre los 7 – 9, la muestra J-32-A es una excepción y presenta un pH ácido de 2.83, lo cual se podría deberse a la generación de un drenaje ácido localizado.

Mediante un análisis de coeficiente de correlación de Pearson (tabla 11) se calcularon las relaciones entre elementos y su significancia, estas correlaciones se representan mediante elipses que incluyen el 95% de los datos (figura 33), el proceso para la generación de estas elipses se puede observar en una secuencia esquemática (figura 32).

Jales superficiales							
Elemento	LOD [mg/kg]	Rango [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	11	140 - 5,439	884	609	1,048	546	119
Ba	100	187 - 464	258	248	46	26	18
Ca	500	86,761 - 163,592	139,942	141,254	14,571	11,024	10
Cr	85	85 - 110	98	99	6	5	6
Cu	35	198 - 5,680	2,464	2,531	1,472	1,240	60
Fe	100	41,314 - 163,683	93,511	93,308	21,149	15,472	23
Mn	85	1,141 - 2,220	1,464	1,410	222	166	15
Pb	13	<LOD - 620	98	68	118	59	121
Ti	160	<LOD - 891	370	327	146	83	40
V	70	<LOD - 105	71	77	20	13	28
Zn	25	99 - 2,076	521	414	418	264	80
Propiedad fisicoquímica	LOD	Rango	Promedio	Mediana	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	2.83 - 9.47	8.25	8.30	1.01	0.60	12.19
CE [μ S/cm]	-	31 - 2,910	474	321	539	327	114

Tabla 10. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de jales superficiales (n=50).

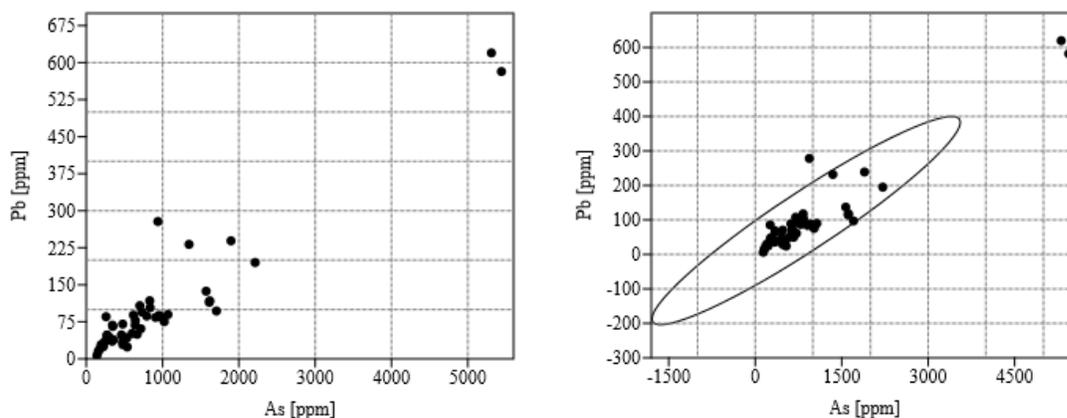


Figura 32. Secuencia esquemática de figuras que muestra el proceso de generación de las elipses para el análisis de correlación, se grafica la concentración de un elemento contra otro, posteriormente se trata de ajustar el 95% de los datos en una elipse, entre más estrecha sea esta elipse mayor será la correlación de los elementos y viceversa.

	As	Ba	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Ti	V	Zn
As	-	0.78**	-0.43**	0.07	-0.13	-0.29*	0.48**	0.94**	0.71**	-0.32*	0.80**
Ba		-	-0.24	0.13	-0.26	-0.57**	0.51**	0.79**	0.80**	-0.22	0.68**
Ca			-	0.23	-0.49**	-0.32*	-0.35*	-0.47**	-0.25	0.54**	-0.40**
Cr				-	-0.20	-0.30*	0.13	0.16	0.19	0.20	0.11
Cu					-	0.68**	0.27	-0.05	-0.33*	-0.12	0.01
Fe						-	0.11	-0.33*	-0.62**	0.03	-0.38**
Mn							-	0.56**	0.30*	-0.17	0.34*
Pb								-	0.76**	-0.33*	0.83**
Ti									-	-0.12	0.62**
V										-	-0.36**
Zn											-

Tabla 11. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos en jales superficiales, los coeficientes marcados con * tienen una significancia de 0.05, mientras que los marcados con ** tienen una significancia de 0.01 (n=50).

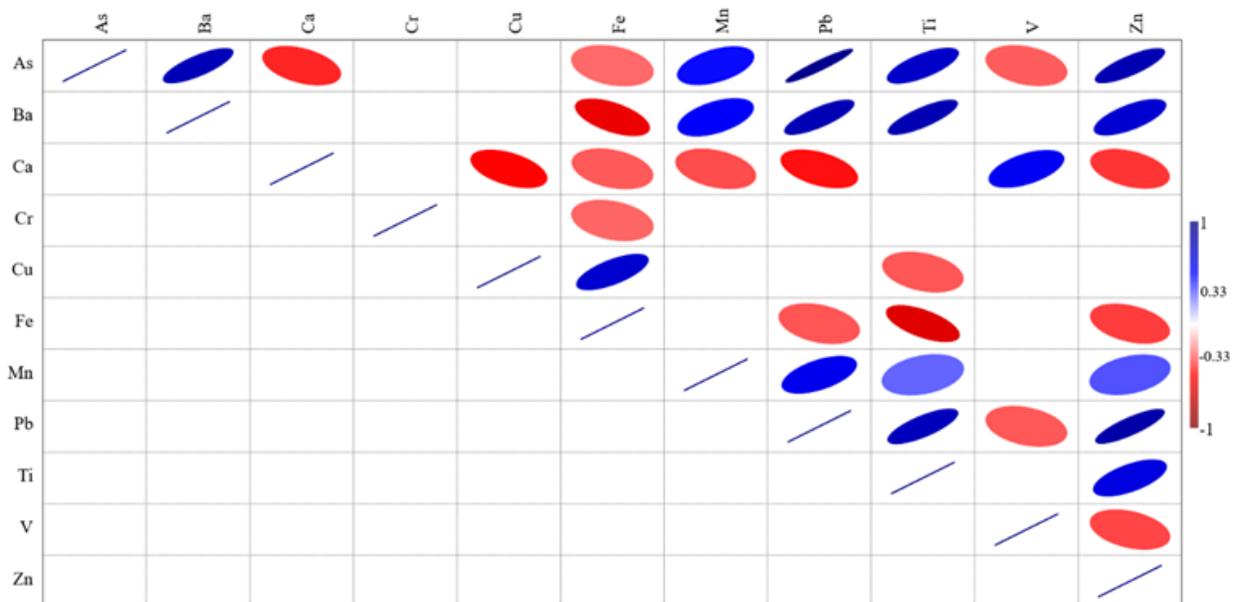


Figura 33. Coeficientes de correlación de Pearson de los elementos en jales superficiales representados mediante elipses, entre más estrechas sean las elipses mayor será la correlación entre los elementos y viceversa, las de color azul representan correlaciones positivas y las rojas correlaciones negativas (n=50).

Podemos observar que existe una buena correlación entre As-Pb, ya que $r > 0.9$ y las relaciones de As-Ba, As-Ti, As-Zn, Ba-Pb, Ba-Ti y Pb-Ti tienen un $r > 0.7$.

Posteriormente se realizó el análisis de *hierarchical clustering* (figura 34) con los elementos de mayor interés: As, Cu, Cr, Mn, Pb, Ti y Zn. Los datos fueron normalizados mediante el uso de logaritmos para minimizar las diferencias entre rangos de valores.

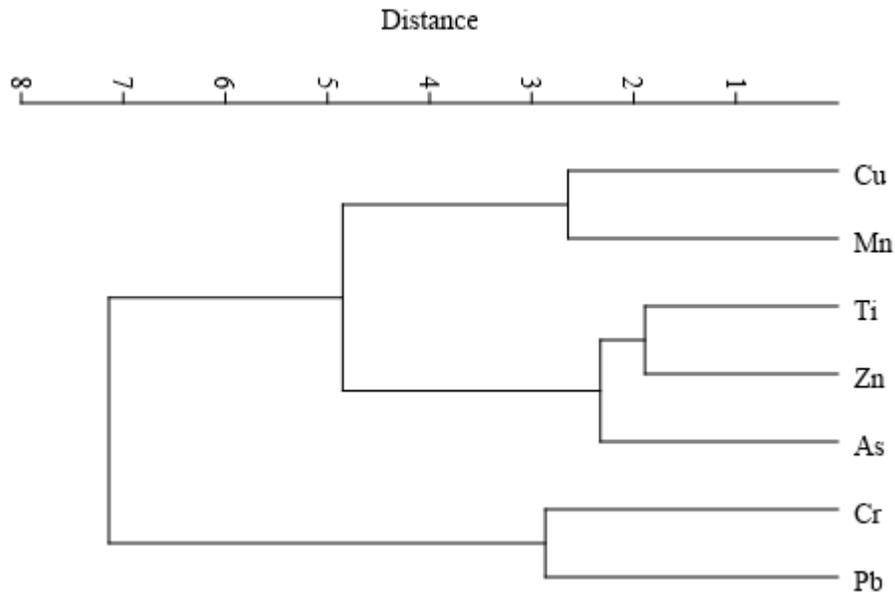


Figura 34. Hierarchical clustering de las muestras de jales superficiales ($n=50$).

Finalmente se graficaron los jales mediante un diagrama ternario (figura 35) de As, Pb y Zn, ya que estos son los EPT presentes en el área de estudio y tienen importantes variaciones dependiendo de la fuente de contaminación.

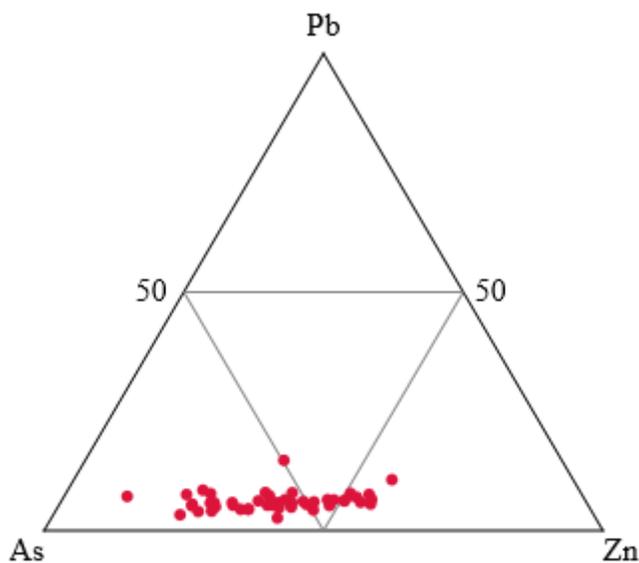


Figura 35. Diagrama ternario de jales superficiales generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn ($n=50$).

4.2.2 - Residuos de tostación

Se caracterizaron los residuos de tostación obteniendo su rango, y los demás parámetros estadísticos básicos. Los resultados agrupados en una tabla (tabla 12) nos muestran que estos residuos están caracterizados por contenidos de $Mn > Pb > Zn > As > Ti > Cu > Cr$, presenta una variabilidad en la CE de 152 – 1,080 [$\mu S/cm$], el pH parece mantenerse estable de 9.62 – 10.

Elemento	R. de tostación						
	LOD [mg/kg]	Rango [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	11	743 - 1,019	849	818	120	81	14
Ba	100	1,200 - 1,441	1,323	1,325	124	106	9
Ca	500	27,326 - 48,648	40,870	43,752	9,579	6,688	23
Cr	85	95 - 115	106	106	8	5	8
Cu	35	250 - 356	310	317	44	30	14
Fe	100	40,405 - 52,947	43,676	40,675	6,182	3,138	14
Mn	85	18,686 - 29,266	25,946	27,917	4,882	2,645	19
Pb	13	2,325 - 3,206	2,854	2,942	417	333	15
Ti	160	435 - 649	505	469	97	58	19
V	70	78 - 92	83	82	6	4	7
Zn	25	1,883 - 2,880	2,516	2,650	440	287	17
Propiedad físicoquímica	LOD	Rango	Promedio	Mediana	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	9.62 - 10	9.81	9.80	0.16	0.12	1.64
CE [$\mu S/cm$]	-	152 – 1,080	455	294	422	240	93

Tabla 12. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros físicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de residuos de tostación ($n=4$).

Calculando el coeficiente de correlación de Pearson en los residuos de tostación (tabla 13), se obtuvieron buenas correlaciones lineales, sin embargo, la mayoría de estas carecían de suficiente significancia estadística por lo que solo se consideraron aquellas con una significancia menor a 0.05, lo cual seguramente se debe al reducido número de muestras de este tipo de residuo. Las mejores correlaciones son Cu-Mn, Pb-Ba, Pb-Ca, Ti-V, Zn-Ca, Zn-Cu y Zn-Mn, todas con un $r > 0.9$, las cuales están representadas en el diagrama de elipses (figura 36).

Se realizó el análisis de *hierarchical clustering* (figura 37) con los elementos de mayor interés: As, Cu, Cr, Mn, Pb, Ti y Zn. Los datos fueron normalizados mediante el uso de logaritmos para minimizar las diferencias entre rangos de valores.

Finalmente, del mismo modo que los jales se graficaron los residuos de tostación mediante un diagrama ternario (figura 38) de As, Pb y Zn.

	As	Ba	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Ti	V	Zn
As	-	0.80	0.47	0.55	0.68	0.94	0.42	0.68	-0.45	-0.46	0.56
Ba		-	0.86	0.02	0.85	0.62	0.71	0.96*	-0.32	-0.23	0.83
Ca			-	-0.13	0.92	0.37	0.94	0.96*	0.17	0.29	0.97*
Cr				-	0.26	0.80	0.09	-0.01	0.11	-0.03	0.11
Cu					-	0.68	0.95*	0.94	0.19	0.25	0.99*
Fe						-	0.44	0.55	-0.18	-0.24	0.54
Mn							-	0.88	0.43	0.51	0.98*
Pb								-	-0.05	0.05	0.95
Ti									-	0.98*	0.26
V										-	0.34
Zn											-

Tabla 13. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos en residuos de tostación, los coeficientes marcados con un * tienen una significancia de 0.05, mientras que los marcados con ** tienen una significancia de 0.01 (n=4).

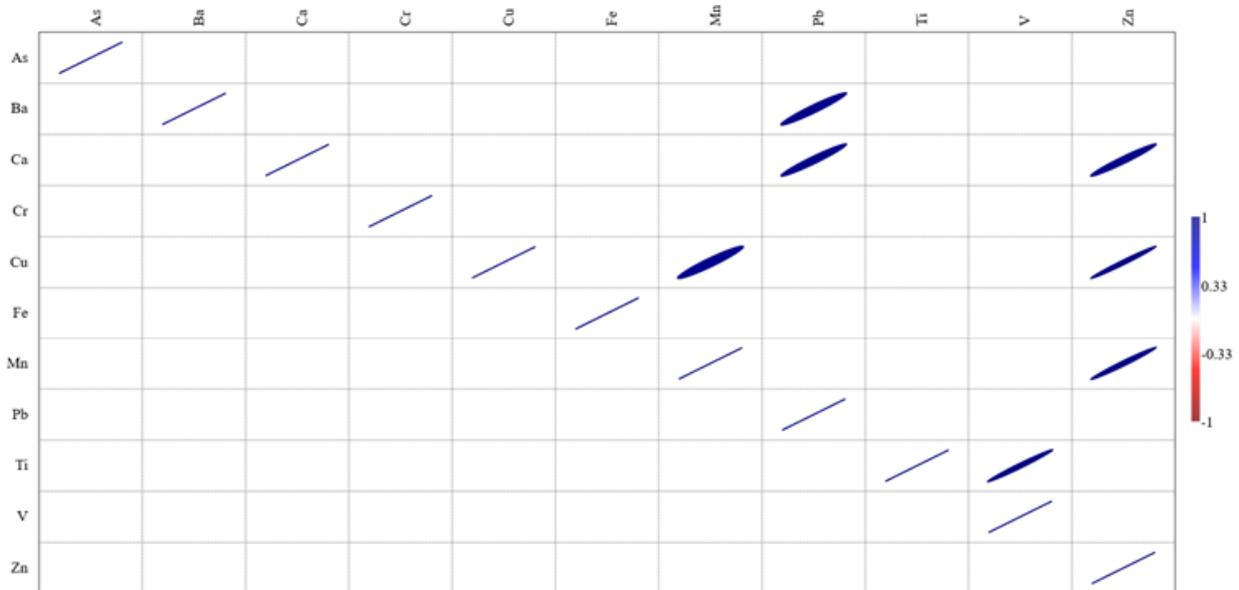


Figura 36. Coeficientes de correlación de Pearson de los elementos en residuos de tostación representados mediante elipses, entre más estrechas sean las elipses mayor será la correlación entre los elementos y viceversa, las de color azul representan correlaciones positivas y las rojas correlaciones negativas (n=4).

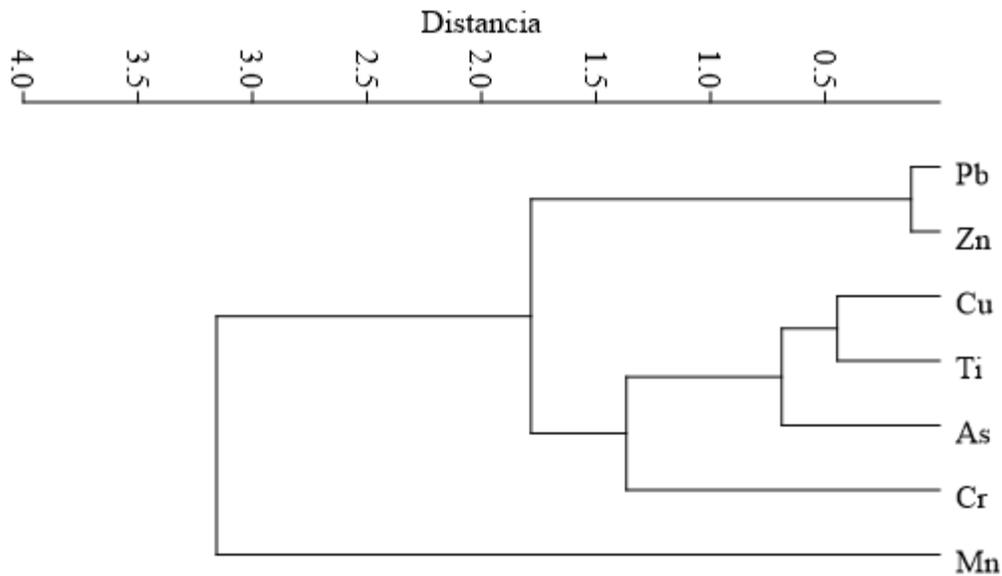


Figura 37. Hierarchical clustering de las muestras de residuos de tostación (n=4).

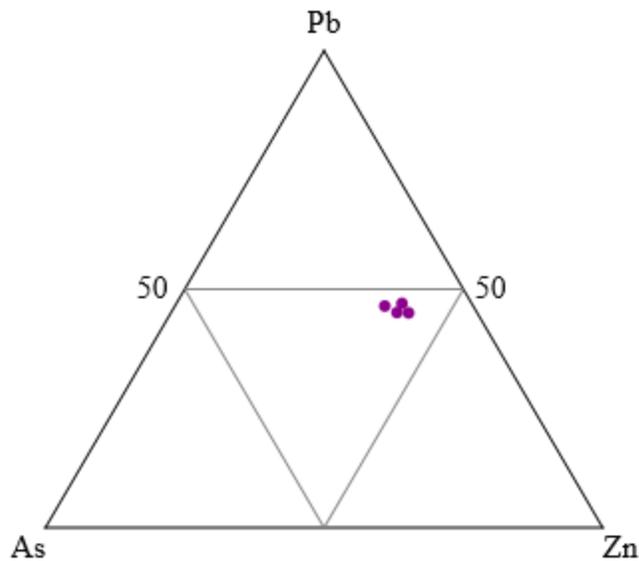


Figura 38. Diagrama ternario de residuos de tostación generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn (n=4).

4.2.3 - Jales (Zanjas)

En las muestras de zanjas se realizaron graficas de barras (figuras 39-42) para comparar las concentraciones de As, Cu, Pb y Zn a diferentes profundidades y estudiar los comportamientos de cada una de estas presas. La zanja Z-01 corresponde a los residuos de tostación, las zanjas Z-02, Z-03, Z-04 y Z-05 se tomaron en la presa de jales activa, por otro lado, las zanjas Z-06, Z-07 y Z-08 son de la presa de jales inactiva.

En lo concerniente al As, podemos observar que en la Z-01 hay una mayor concentración de este en la zona superficial y va descendiendo con la profundidad. Las Z-03 y Z-04 muestran que

la concentración de As es mayor en la parte superior de la zanja y disminuye con profundidad, por el contrario, en la Z-02, parece acumularse en la zona más profunda. La Z-05 no sigue un patrón como las anteriores. En las zanjas Z-06, Z-07 y Z-08, el As parece mantenerse estable con la profundidad.

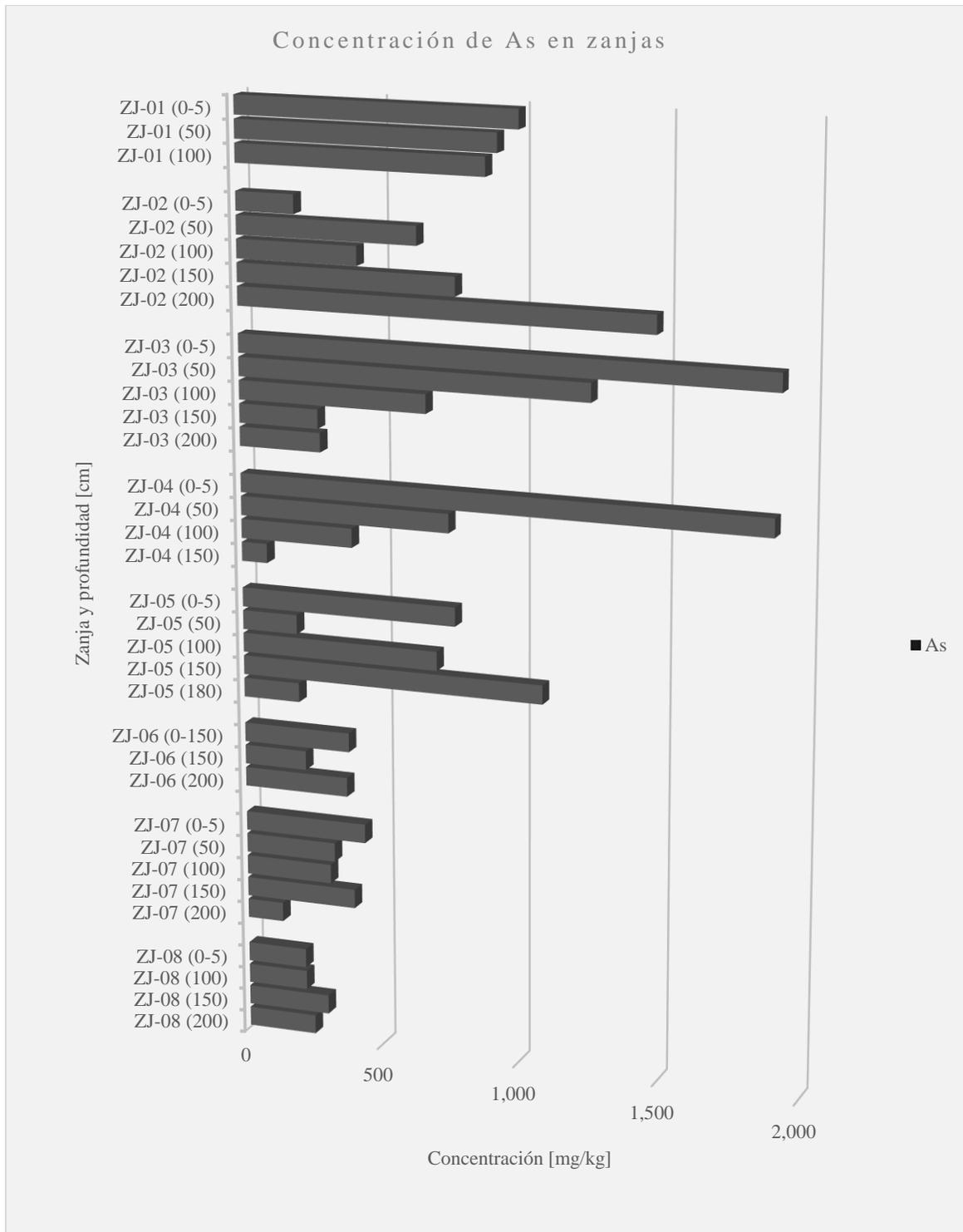


Figura 39. Gráfico de barras de las concentraciones de As en zanjas (n=27).

Para el Cu podemos observar que en la Z-01 el Cu se mantiene estable con una ligera disminución con la profundidad. En la Z-02 el Cu parece aumentar con la profundidad, por el contrario, en las Z-03 y Z-04 el Cu se concentra en las zonas más superficiales de la zanjas, la Z-05 no sigue un patrón con la profundidad. En la Z-06 y Z-07 la concentración aumenta con la profundidad hasta los 150 [cm] donde comienza a disminuir, es destacable que la concentración de Cu es mucho mayor en la Z-07 que, en las zanjas aledañas, en la Z-08 la concentración parece mantenerse estable con la profundidad.

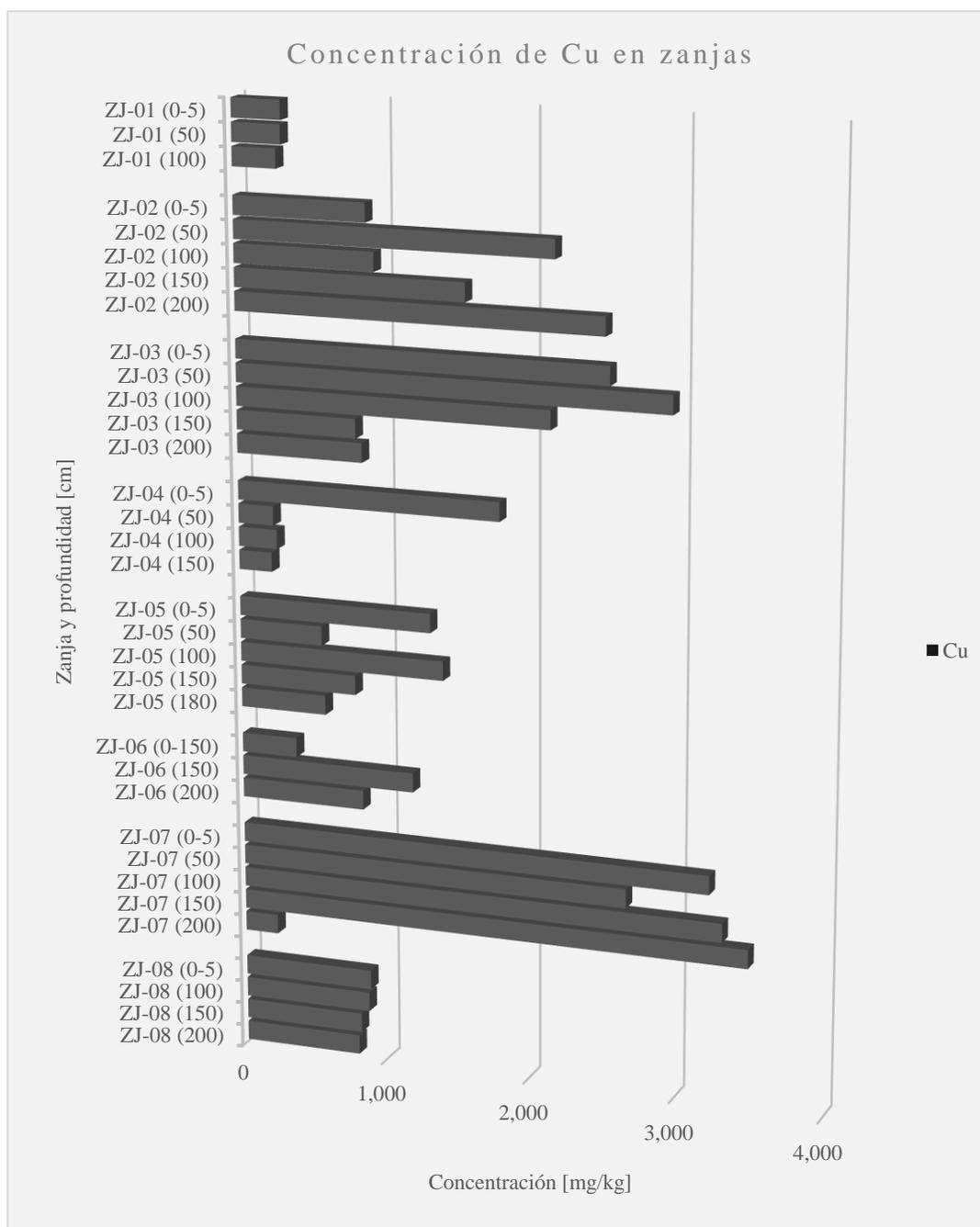


Figura 40. Gráfico de barras de las concentraciones de Cu en zanjas (n=27).

En lo referente al Pb, las muestras Z-01 tiene concentraciones un orden de magnitud mayores que las otras zanjas y su mayor concentración se encuentra en los 50 [cm]. En la Z-02 y Z-07 la concentración aumenta con la profundidad, por el contrario, en las Z-03, Z-04 y Z-05 y Z-06 disminuye con la profundidad. En la Z-08 parece mantenerse estable, con una ligera disminución con la profundidad.

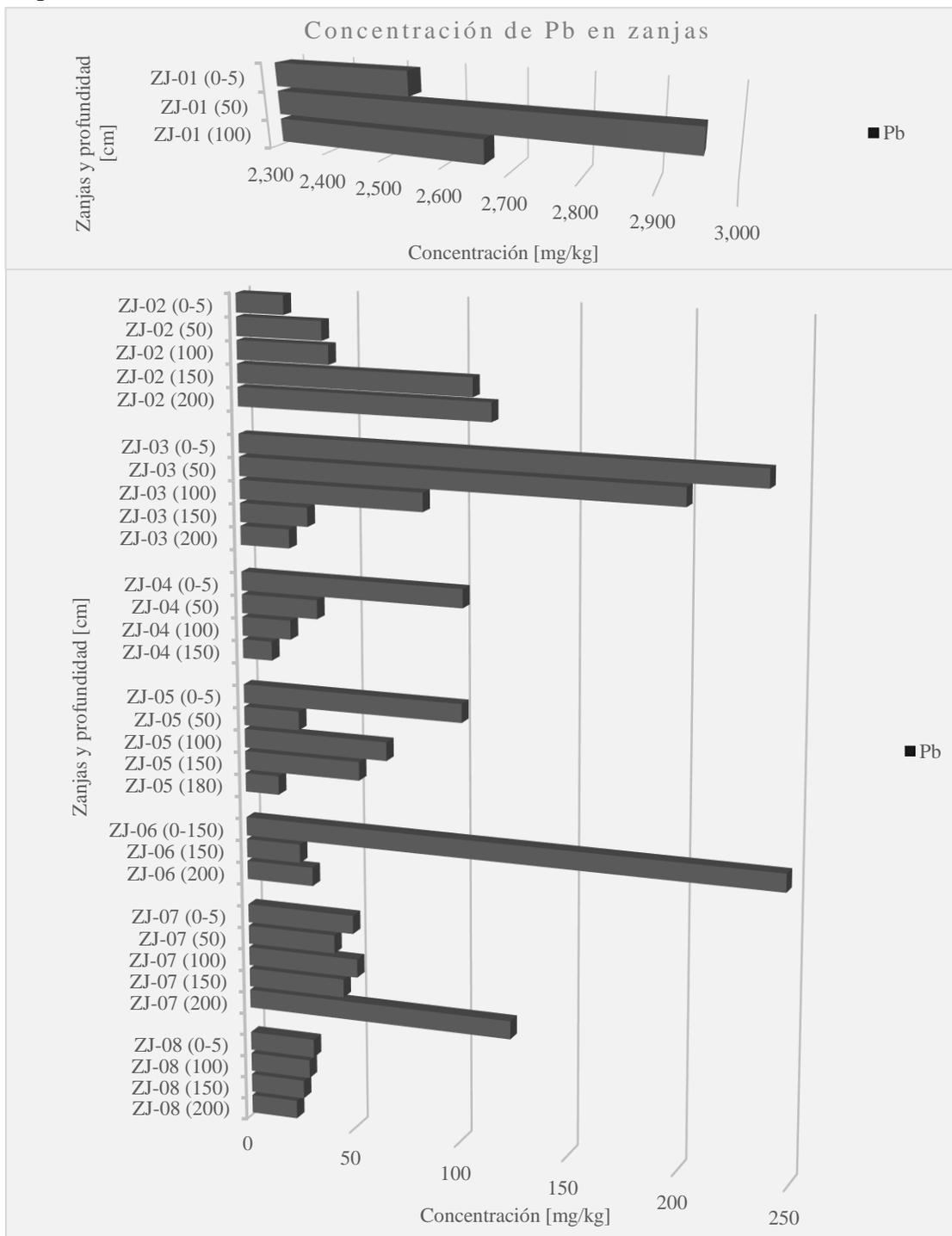


Figura 41. Gráfico de barras de las concentraciones de Pb en zanjas (n=27).

En cuanto al Zn, la Z-01 tiene concentraciones muy superiores a las otras zanjas a excepción de la Z-03 y su mayor concentración se encuentra en los 50 [cm]. En la Z-02 la concentración aumenta con la profundidad, mientras que, en las Z-03, Z-04 y Z-06 disminuye con la profundidad, la Z-05 no sigue un patrón con la profundidad. Las Z-07 y Z-08 parecen ser más constantes con la concentración con una ligera disminución en la Z-08 con la profundidad.

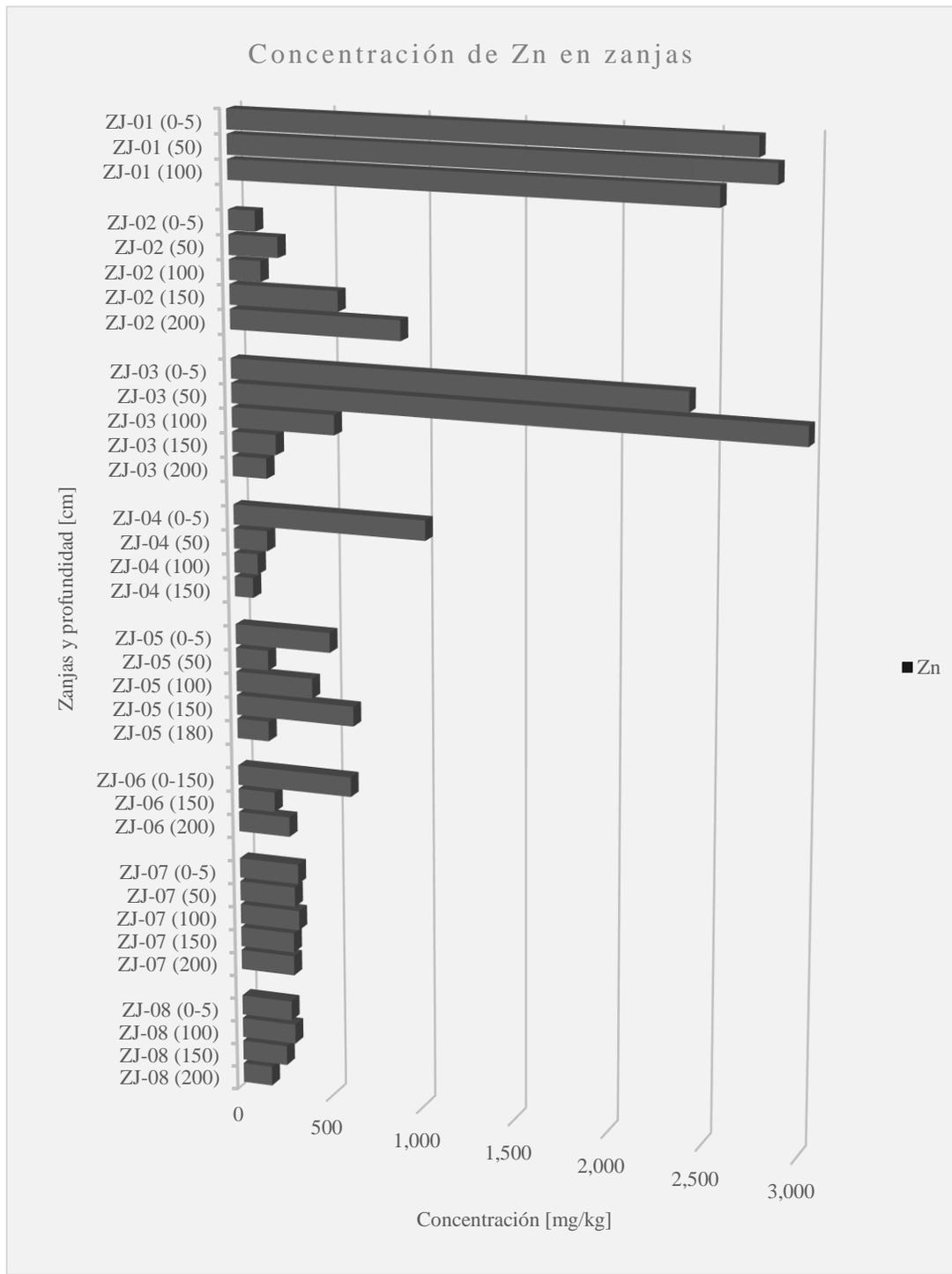


Figura 42. Gráfico de barras de las concentraciones de Zn en zanjas (n=27).

4.2.4 - Escorias

En la caracterización de las escorias se utilizaron los datos proporcionados por Caicedo (2020). A partir de estos se calculó el rango y los demás parámetros estadísticos básicos y se agruparon en una tabla (tabla 14). Además, coeficiente de correlación de Pearson, el *hierarchical clustering* y el diagrama ternario como en los jales y residuos de tostación.

Los resultados obtenidos muestran que las escorias están caracterizadas por sus contenidos de Zn > Mn > Pb > Cu > As > Cr, la conductividad eléctrica es variable desde 40 a 331 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], mientras que, el pH ronda entre los 8.5 – 9.5.

Elemento	Escorias						
	LOD [mg/kg]	Rango [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	15	679 - 2,672	1,101	1,115	367	215	33
Ba	175	433 - 1,418	845	741	357	316	42
Ca	100	68,000 - 123,700	86,139	81,900	14,712	10,861	17
Cr	75	113 - 200	132	126	18	10	14
Cu	36	1,225 - 4,193	1,775	1,645	614	352	35
Fe	80	117,500 - 179,400	141,375	137,300	15,577	12,039	11
Mn	55	2,255 - 20,066	6,021	4,392	4,095	2,453	68
Pb	25	2,109 - 4,300	3,058	2,936	584	465	19
Zn	30	9,118 - 29,652	20,818	21,866	4,733	3,330	23
Propiedad fisisicoquímica	LOD	Rango	Promedio	Mediana	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	8.51 - 9.57	9.27	9.35	0.23	0.17	3
CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	-	40 - 311	80	61	55	31	69

Tabla 14. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de escorias, generado a partir de los datos de Caicedo (2020) (n=28).

Los coeficientes de correlación de Pearson en escorias (tabla 15), arrojaron correlaciones moderadas de 0.38 a 0.61 en aquellas con suficiente significancia estadística. Se encontró que existen correlaciones positivas de As-Ba, As-Pb, Ba-Ca, Ba-Mn, Ba-Zn, Fe-Mn y Mn-Zn, además, algunas correlaciones negativas de Ba-Pb, Ca-Pb y Cu-Zn, las cuales están representadas en el diagrama de elipses (figura 43).

Se realizó el análisis de *hierarchical clustering* (figura 44) con los elementos de mayor interés: As, Cu, Cr, Mn, Pb y Zn. Los datos fueron normalizados mediante el uso de logaritmos para minimizar las diferencias entre rangos de valores.

Finalmente, del mismo modo que los jales y residuos de tostación se graficaron las escorias mediante un diagrama ternario (figura 45) de As, Pb y Zn. Para aumentar el set de datos, se graficaron las muestras superficiales de las zanjas de escorias de Caicedo (2020).

	As	Ba	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
As	-	0.44*	0.09	0.04	0.09	0.11	0.13	0.40*	0.11
Ba		-	0.52**	0.00	-0.16	0.23	0.61**	-0.39*	0.38*
Ca			-	-0.09	-0.34	0.17	0.29	-0.57**	0.12
Cr				-	0.26	0.27	0.15	-0.12	-0.03
Cu					-	0.24	-0.08	0.21	-0.40*
Fe						-	0.53**	-0.19	0.19
Mn							-	-0.27	0.45*
Pb								-	-0.30
Zn									-

Tabla 15. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos en escorias, los coeficientes marcados con un * tienen una significancia de 0.05, mientras que los marcados con ** tienen una significancia de 0.01 (n=28).

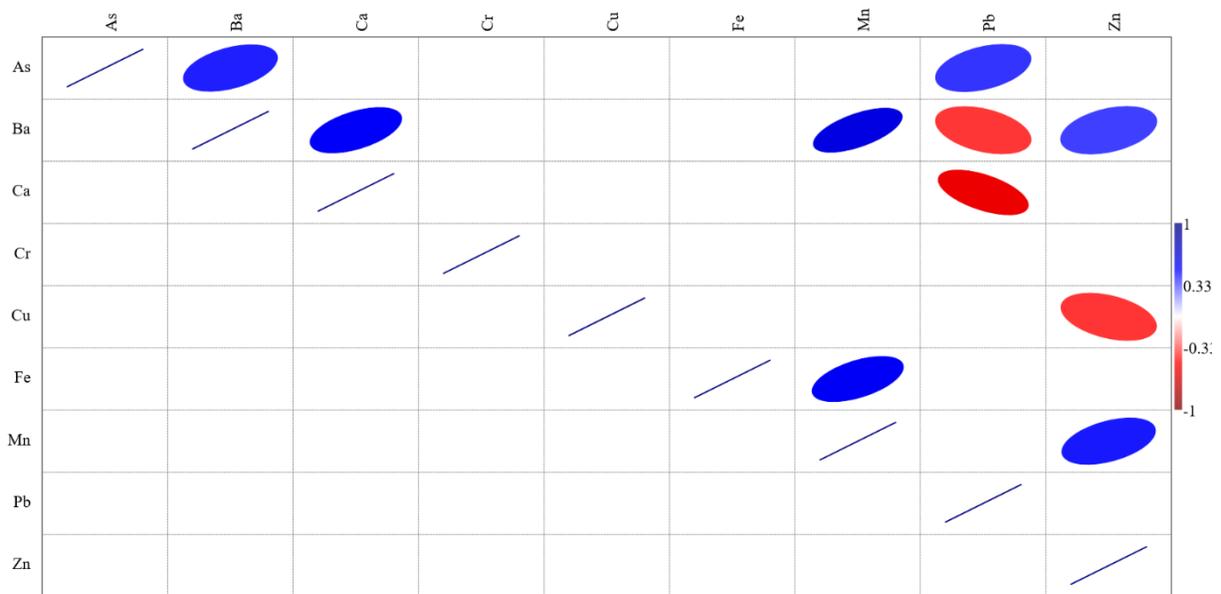


Figura 43. Coeficientes de correlación de Pearson de los elementos en escorias representados mediante elipses, entre más estrechas sean las elipses mayor será la correlación entre los elementos y viceversa, las de color azul representan correlaciones positivas y las rojas correlaciones negativas (n=28).

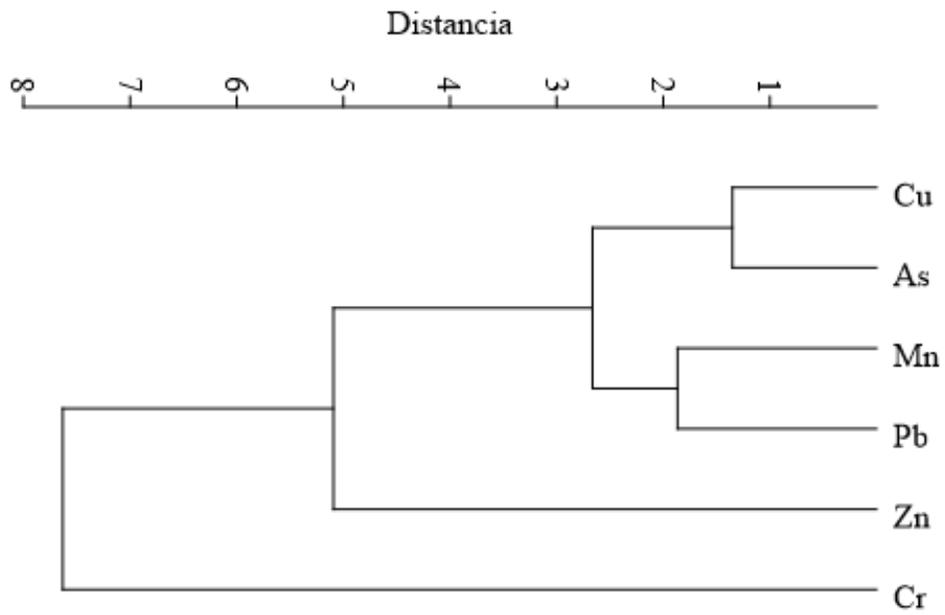


Figura 44. Hierarchical clustering de las muestras de escorias (n=28).

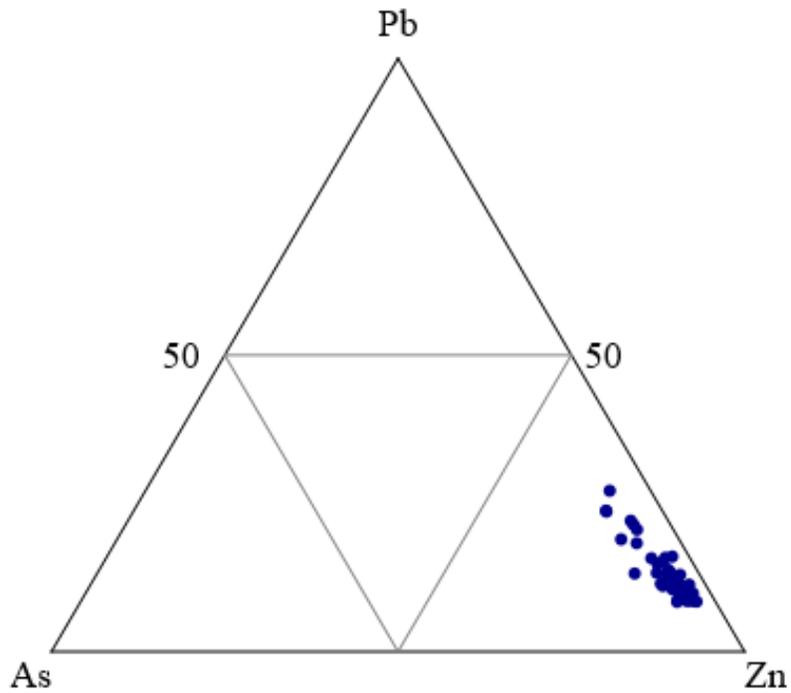


Figura 45. Diagrama ternario de escorias generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn (n=28).

4.2.5 - Polvos residuales de metalurgia

En la caracterización de los polvos metalúrgicos se utilizaron los datos proporcionados por Sierra-Salamanca (2020). Se seleccionaron aquellas muestras con las mayores concentraciones como representantes de estos polvos, las seleccionadas fueron: 649, 650, 651 y 660 en su fracción menor a 150[μm] (malla 100), a partir de estos se calculó el rango y los demás parámetros estadísticos básicos y se agruparon en una tabla (tabla 16). Además, coeficiente de correlación de Pearson, el *hierarchical clustering* y el diagrama ternario.

Polvos de metalurgia							
Elemento	LOD [mg/kg]	Rango [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	11	1,188 - 298,106	133,799	117,952	143,034	119,357	107
Ba	100	180 - 1,085	584	536	374	232	64
Ca	500	18,975 - 141,224	66,808	53,517	53,222	36,873	80
Cr	85	90 - 126	107	106	18	16	17
Cu	35	219 - 2,683	1,408	1,365	1,057	813	75
Fe	100	13,037 - 62,063	39,826	42,103	21,207	16,236	53
Mn	85	43 - 873	331	205	392	289	118
Pb	13	815 - 378,289	147,062	104,572	175,868	136,682	120
Ti	160	494 - 1,483	924	860	457	370	49
V	70	35 - 94	60	55	30	25	50
Zn	25	332 - 35,992	17,261	16,360	16,684	13,864	97
Propiedad fisicoquímica	LOD	Rango	Promedio	Mediana	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	5.38 - 8.41	6.95	7.01	1.40	1.15	20
CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	-	171 - 2,230	964	727	964	750	100

Tabla 16. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de polvos residuales de metalurgia, generado a partir de los datos de Sierra-Salamanca (2020) ($n=4$).

Los resultados obtenidos muestran que estos polvos están caracterizados por sus concentraciones de $\text{Pb} > \text{As} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Cr}$, la conductividad eléctrica es variable desde 171 a 2,230 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], mientras que, el pH ronda entre los 5.38 – 8.41.

Los coeficientes de correlación de Pearson en polvos residuales de metalurgia (tabla 17) muestran buenas correlaciones lineales, sin embargo, la mayoría de estas carecen de suficiente significancia estadística por lo que solo se consideraron aquellas con una significancia menor a 0.05, las cuales son: As-Pb, Cu-Zn, Mn-Ti, Mn-V y Ti-V, con correlaciones positivas, las cuales están representadas en el diagrama de elipses (figura 46).

Se realizó el análisis de *hierarchical clustering* (figura 47) con los elementos de mayor interés: As, Cu, Cr, Mn, Pb y Zn. Los datos fueron normalizados mediante el uso de logaritmos para minimizar las diferencias entre rangos de valores.

	As	Ba	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Ti	V	Zn
As	-	0.87	-0.86	-0.23	0.79	0.35	-0.78	0.98*	-0.90	-0.92	0.87
Ba		-	-0.89	-0.19	0.54	0.28	-0.41	0.92	-0.61	-0.60	0.60
Ca			-	-0.22	-0.82	-0.68	0.38	-0.82	0.57	0.63	-0.81
Cr				-	0.34	0.83	0.50	-0.37	0.44	0.30	0.15
Cu					-	0.80	-0.60	0.65	-0.69	-0.79	0.98*
Fe						-	-0.01	0.20	-0.12	-0.26	0.67
Mn							-	-0.74	0.97*	0.95*	-0.74
Pb								-	-0.87	-0.86	0.76
Ti									-	0.99*	-0.82
V										-	-0.89
Zn											-

Tabla 17. Coeficientes de correlación de Pearson de elementos en polvos residuales de metalurgia, los coeficientes marcados con un * tienen una significancia de 0.05, mientras que los marcados con ** tienen una significancia de 0.01 (n=4).

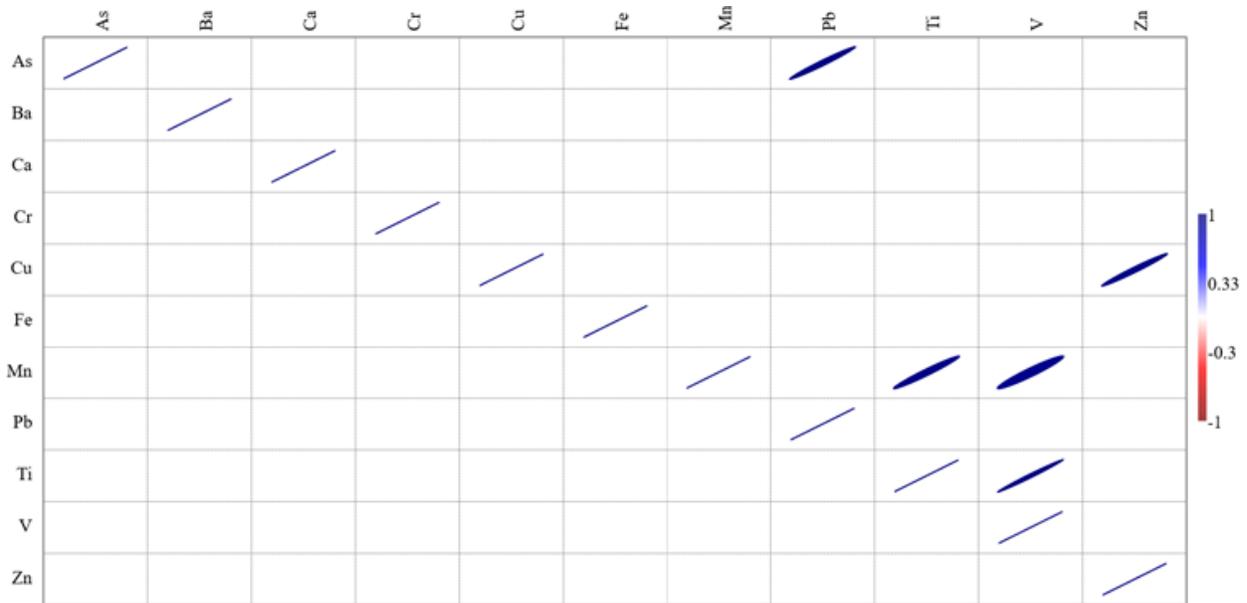


Figura 46. Coeficientes de correlación de Pearson de los elementos en polvos residuales de metalurgia, representados mediante elipses, entre más estrechas sean las elipses mayor será la correlación entre los elementos y viceversa, las de color azul representan correlaciones positivas y las rojas correlaciones negativas (n=4).

Finalmente, del mismo modo que los jales, residuos de tostación y escorias se graficaron los polvos residuales de metalurgia mediante un diagrama ternario (figura 48) de As, Pb y Zn.

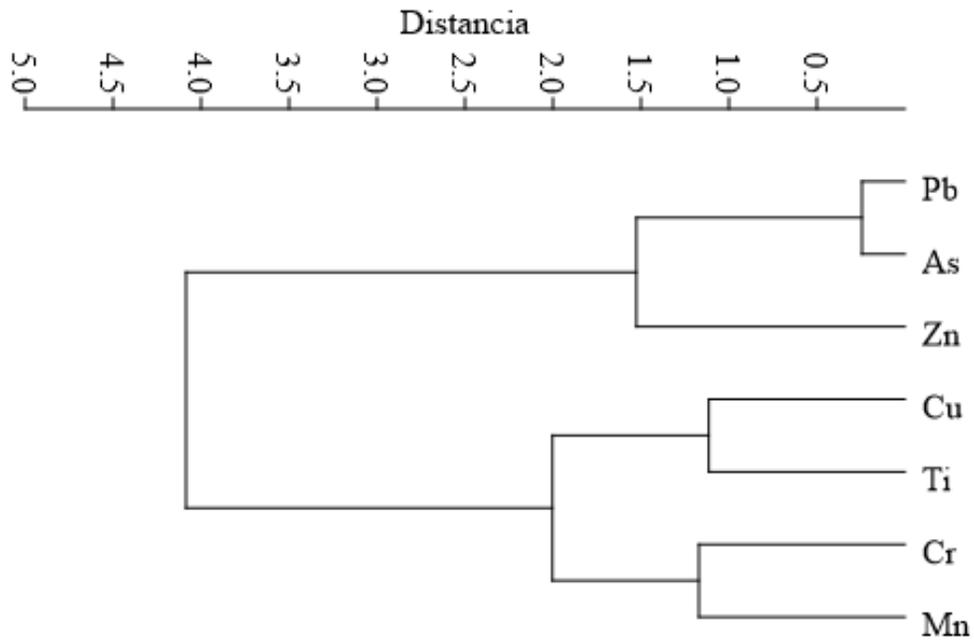


Figura 47. Hierarchical clustering de las muestras de polvos residuales de metalurgia (n=4).

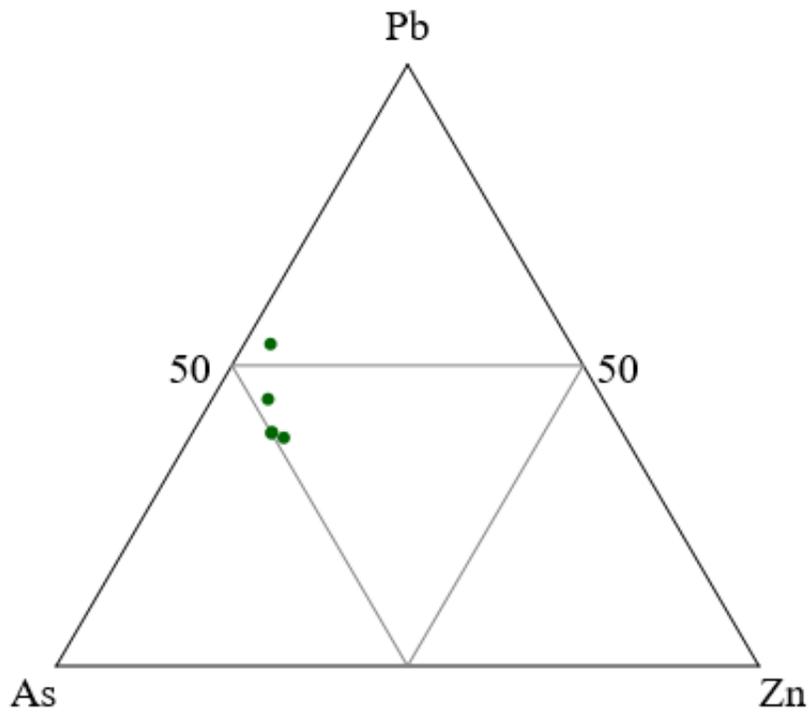


Figura 48. Diagrama ternario de polvos residuales de metalurgia generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn (n=4).

5. - Valores de fondo

5.1 - Metodología

Para la determinación de valores de fondo se diseñó un plan de muestreo y análisis en el cual se buscó obtener información de la mayor parte de las litologías presentes en el área de estudio, además, el suelo y los sedimentos asociados a estas por lo que se muestrearon puntos estratégicos donde todas las matrices pudieran ser colectadas.

Una vez obtenidos los datos se calcularon los valores de fondo de datos en bruto y los valores de fondo de datos seleccionados haciendo uso de los métodos media + 2 desviaciones estándar ($A + 2\sigma$), mediana + 2 desviaciones absolutas con respecto a la mediana (MAD) ($M + 2MAD$), cercas interiores de Tukey (TIF), percentil 95 (P_{95}) y percentil 98 (P_{98}), para posteriormente realizarse una comparativa de estos valores y seleccionar los más adecuados para el área de estudio.

5.1.1 - Muestreo

El diseño del plan de muestreo se realizó tomando como base el análisis espacial de datos de estudios previos de la zona y los modelos de dispersión, para establecer posibles áreas de influencia. Posteriormente dividió el área de estudio con una cuadrícula de 3×3 [km] (figura 49), de manera que, el muestreo, se realizara lo más sistemático posible y fuera representativo, tratando de caracterizar de manera apropiada las tres matrices ambientales de interés: suelo, sedimento, rocas.

Los sitios de muestreo se seleccionaron en base a su ubicación geográfica, accesibilidad del sitio (análisis espacial de calles, caminos y carreteras) y análisis de la cuenca hidrográfica, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de matrices en cada punto.

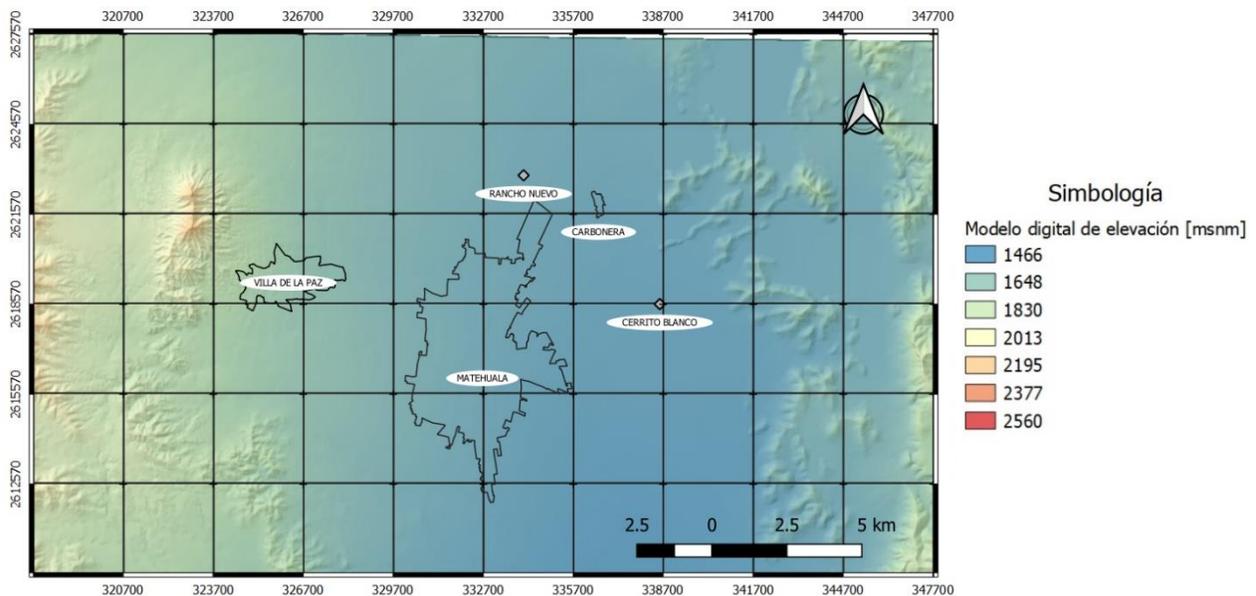


Figura 49. Cuadrícula del área de estudio dividida en secciones de 3×3 [km]

5.1.1.1 - Suelo

El muestreo de suelos consistió en la toma de cincuenta y nueve (59) muestras superficiales simples (de 0 a 25 [cm]) de aproximadamente 1 [kg], tomadas con una cuchara (pala) de acero inoxidable para evitar su contaminación, retirándose en la mayoría de los casos, raíces y rocas mayores a 2[cm], y almacenadas en doble bolsa de polietileno.

Los sitios se distribuyeron de tal manera que cubrieran de manera óptima el área de estudio, así como, el mayor número de edafologías posibles. En la tabla (anexo 3) se muestra la relación de muestras de suelo, ubicación en coordenadas UTM, y una breve descripción de la muestra, su distribución geográfica en un mapa (figura 50), además una memoria fotográfica de la toma de algunas muestras (anexo 3).

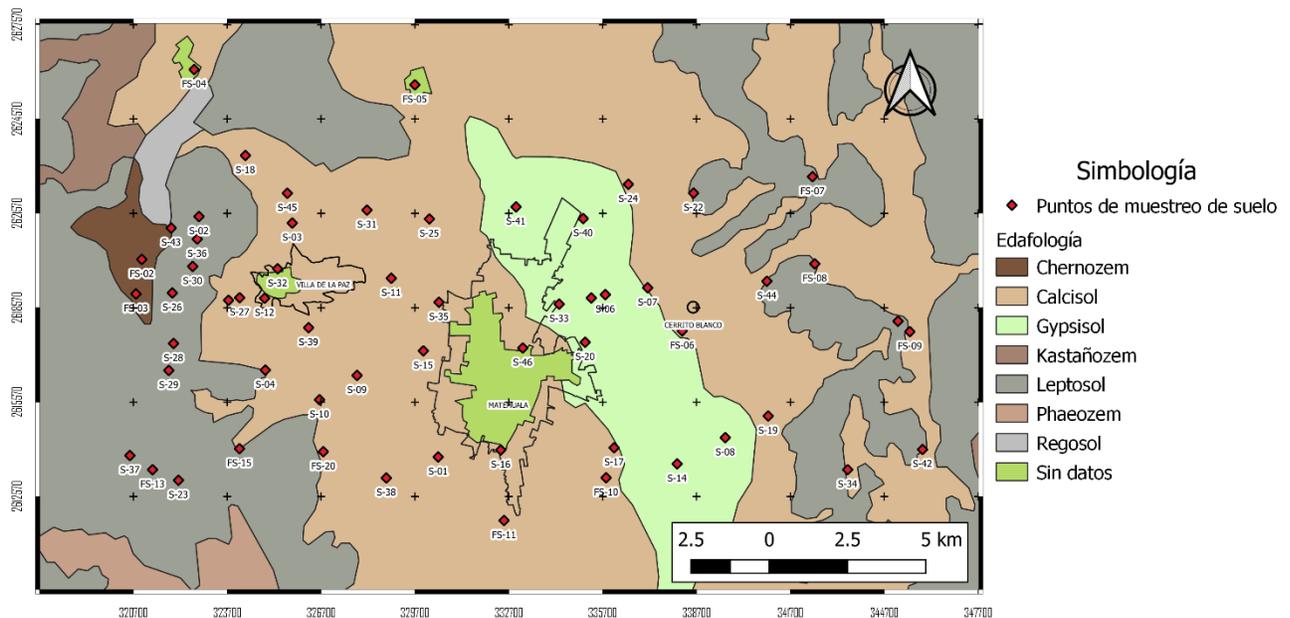


Figura 50. Mapa de distribución de puntos del muestreo de suelos

5.1.1.2 - Sedimentos

El muestreo de sedimentos consistió en la toma de treinta y uno (31) muestras superficiales simples (de 0 a 25 [cm]) de aproximadamente 1 [kg], tomadas con una cuchara (pala) de acero inoxidable para evitar su contaminación, y almacenadas en doble bolsa de polietileno.

Para la determinación de sitios de muestreo se realizó un análisis espacial de la hidrografía para determinar los ríos o arroyos de mayor orden, ya que en su mayoría se trata de ríos intermitentes, y estos nos ofrecían una mayor probabilidad de obtener las muestras, también, la búsqueda de cuerpo de agua superficiales como manantiales o estanques. En la tabla (anexo 4) se muestra la relación de muestras de sedimentos, ubicación en coordenadas UTM, y una breve descripción de la muestra, su distribución geográfica en un mapa (figura 51), además una memoria fotográfica de la toma de algunas muestras (anexo 4).

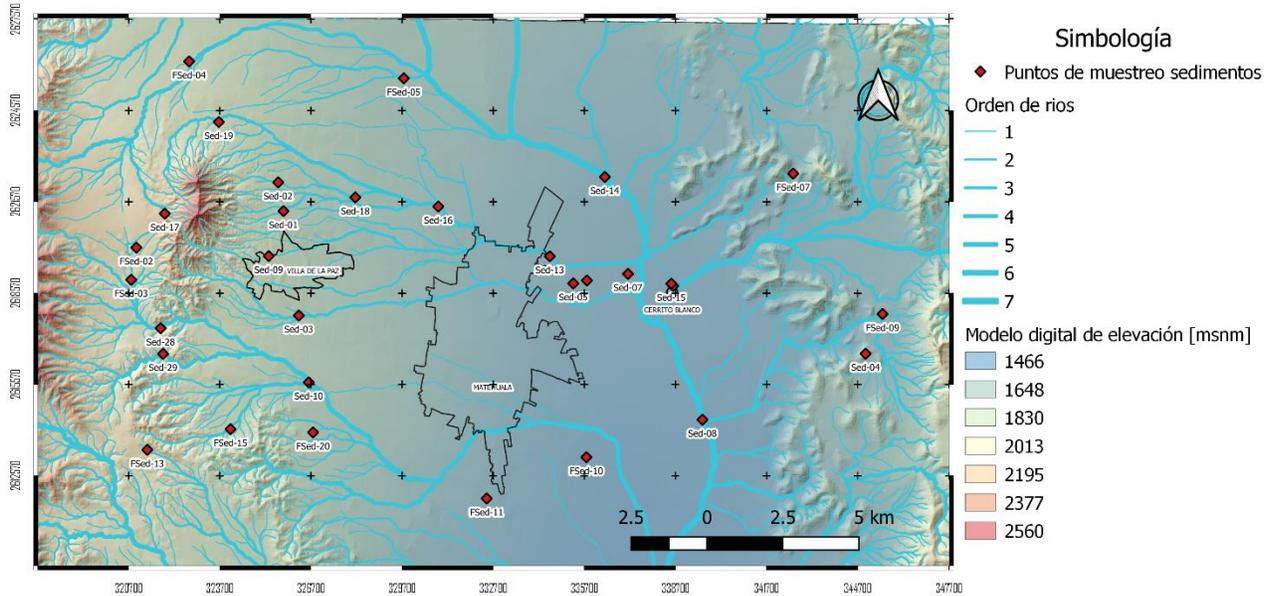


Figura 51. Mapa de distribución de puntos del muestreo de sedimentos

5.1.1.3 - Rocas

El muestreo de rocas consistió en la toma de veintitrés (23) muestras simples en afloramientos de aproximadamente 1 [kg], tomadas con una pica de geólogo de acero inoxidable para evitar su contaminación, y almacenadas en doble bolsa de polietileno.

La selección de los sitios de muestreo se realizó en base a la distribución espacial de las diferentes litologías de la zona, buscando obtener muestras suficientes para poder caracterizar cada una de ellas de una manera adecuada. En la tabla (anexo 5) se muestra la relación de muestras de rocas, ubicación en coordenadas UTM, una breve descripción de la muestra y memoria fotográfica, la distribución geográfica de los puntos se aprecia en el mapa (figura 52).

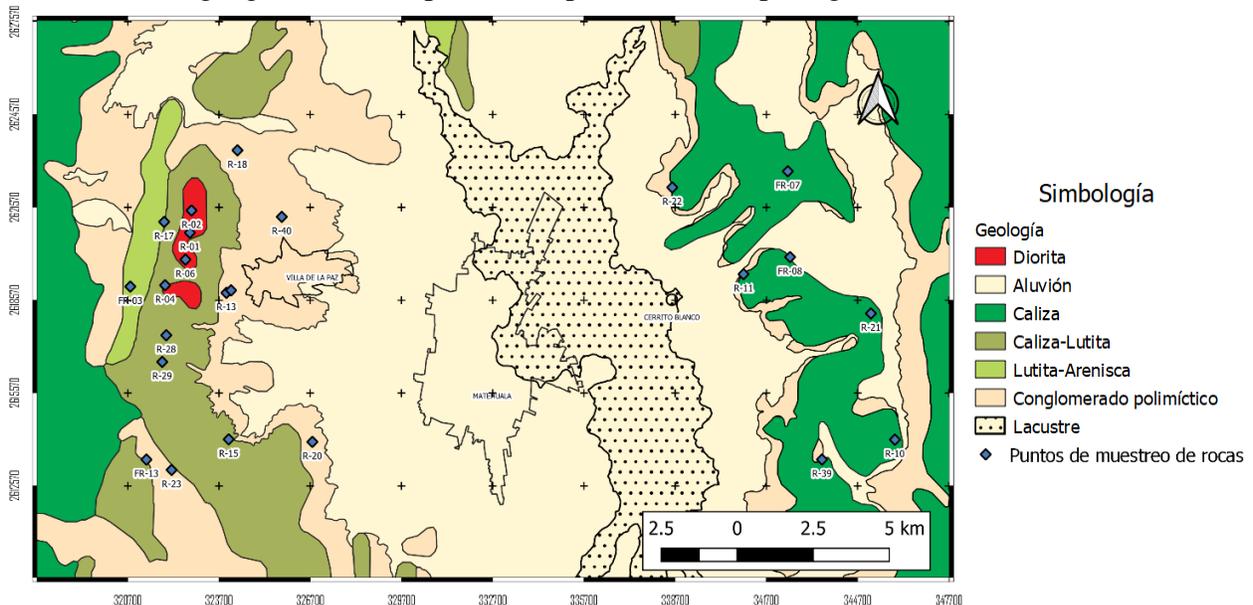


Figura 52. Mapa de distribución de puntos del muestreo de rocas

5.1.2 - Preparación de muestras

Las muestras de suelo y sedimento obtenidas fueron secadas a 40 °C, cuarteadas, tamizadas a un tamaño de partícula <2 [mm] (malla 10) y envasadas en bolsas de polietileno para los análisis de pH y CE.

Las muestras de rocas fueron fragmentadas, y posteriormente trituradas mediante una trituradora eléctrica, tamizadas a un tamaño de partícula <2 [mm] (malla 10) y envasadas en bolsas de polietileno para los análisis de pH y CE.

Para realizar los análisis de la concentración de elementos totales por FRX, las muestras fueron cuarteadas hasta un tamaño de 50[g], y pulverizadas en un molino pulverizador de anillos concéntricos marca Herzog con recipiente de carburo de tungsteno, finalmente se procedió a un nuevo tamizado de un tamaño de partícula de 250 [µm] (malla 60).

5.1.3 - Análisis estadístico

Para el cálculo de valores de fondo se utilizaron cuatro distintos instrumentos de análisis estadístico los dos primeros están basados parámetros estadísticos básicos y los dos últimos se basan en la distribución de los datos mediante el uso de percentiles. Estos últimos dependen del supuesto de que la distribución de los datos es normal, sin embargo, si se realiza una correcta selección de datos, pueden ser aplicados a juicio de experto (Reimann et al, 2008); (Reimann & de Caritat, 2017).

5.1.3.1 - Media + 2 desviaciones estándar (A + 2σ)

Consiste en utilizar el promedio más dos veces la desviación estándar (SDEV), un método simple que le da importancia a los valores atípicos o outliers, ya que estos repercuten de gran manera el promedio y la desviación estándar. Fue el primer método empleado en el cálculo de valores de fondo, y era utilizado para la geoquímica de exploración, aunque actualmente ha caído en desuso (Gałuszka & Migaszewski, 2011); (Reimann & de Caritat, 2017). Se abreviará como A + 2σ y su fórmula es la siguiente:

$$A + 2\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} + 2\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Donde n es el número de datos, X_i es un elemento del conjunto de datos y \bar{X} es la media del conjunto de datos.

5.1.3.2 - Mediana + 2 desviaciones absolutas con respecto a la mediana (M + 2 MAD)

Consiste en el empleo de la mediana más dos veces la desviación absoluta con respecto a la mediana (MAD), es estadísticamente más robusto que el primero debido al empleo de la mediana como medida de tendencia central, esta tiene la ventaja de no considerar los valores atípicos, además la MAD nos permite integrar la variación del conjunto de datos con respecto a la media, que, si bien funciona muy bien con valores atípicos suele ser un método conservativo (Reimann et al, 2008); (Reimann & de Caritat, 2017). Se abreviará como M + 2 MAD y su fórmula es la siguiente:

$$M + 2 MAD = L_{i-1} \frac{\frac{n}{2} - F_{i-1}}{f_i} A + 2 \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \tilde{X}|}{n}$$

Donde L_{i-1} es el límite inferior del intervalo, F_{i-1} es la frecuencia acumula anterior, f_i es la frecuencia absoluta del intervalo, n es número de datos, X_i es un elemento del conjunto de datos y \tilde{X} es la mediana.

5.1.3.3 - Diagramas de cajas y bigotes con cercas interiores de Tukey (TIF)

Este método consiste en el uso de los cuartiles (Q), que son elementos que dividen la distribución de los datos en cuatro partes, se emplea el Q_1 , Q_2 (Mediana) y el Q_3 para trazar una caja, posteriormente, se calculan las cercas interiores de Tukey (TIF) (Reimann et al, 2008); (Reimann & de Caritat, 2017). Cuya fórmula es la siguiente:

$$\text{Para la cerca inferior} \quad TIF_i = Q_1 - 1.5 (IQR)$$

$$\text{Para la cerca superior} \quad TIF_s = Q_3 + 1.5 (IQR)$$

Donde el IQR es la distancia intercuartil y se calcula mediante la diferencia de $(Q_3 - Q_1)$

Finalmente se trazan los bigotes los cuales se les conoce como valores adyacentes, en la cerca inferior es el primer valor superior a la TIF_i y en la cerca superior es el primer valor menor a TIF_s .

Este método además nos plantea la posibilidad de determinar outlayer, mediante la adición de otros parámetros conocidos como cercas exteriores de Tukey (TOF) (Schwertman et al, 2004) cuyas formulas son las siguientes:

$$\text{Para la cerca inferior} \quad TOF_i = Q_1 - 3 (IQR)$$

$$\text{Para la cerca superior} \quad TOF_s = Q_3 + 3 (IQR)$$

Donde el IQR es la distancia intercuartil y se calcula mediante la diferencia de $(Q_3 - Q_1)$

Con este parámetro añadido los valores que se encuentran entre la TIF y la TOF se consideran como posibles outlayers y los valores que están fuera de la TOF son outlayers. A continuación, se muestra un diagrama esquemático (figura 53) con los principales elementos del método de diagrama de cajas y bigotes con uso de cercas interiores.

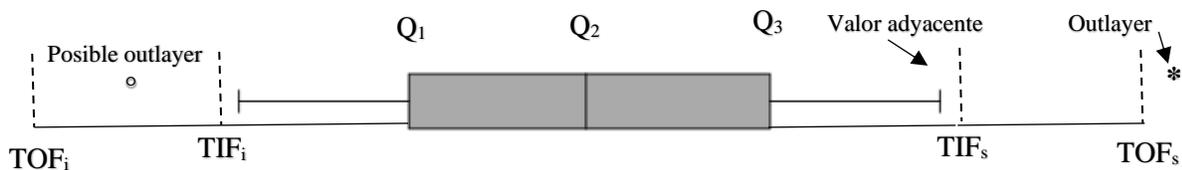


Figura 53. Diagrama esquemático de elementos del diagrama de cajas y bigotes con uso de cercas interiores.

5.1.3.4 - Percentiles

Este método consiste en el uso de los percentiles, que es una medida de distribución estadística de datos que divide la amplitud de los datos en noventa y nueve partes iguales para obtener cien partes, y nos indican el porcentaje de datos que se encuentra por debajo del número del percentil (Reimann et al, 2008). La fórmula para el cálculo del percentil es la siguiente:

$$P = L_i + \frac{1}{f_i} \left(\frac{kn}{100} - f_a \right)$$

Donde L_i es el límite inferior de la puntuación del centil, f_i es la frecuencia de la puntuación donde se encuentra el centil, f_a es la frecuencia acumulada hasta la puntuación en la que se encuentra el centil, n es número de datos, k es el porcentaje de casos del centil.

Se emplea para el cálculo de valores de fondo en algunos países ya que, basados en diversas pruebas estadísticas, la tendencia en la distribución de los datos cambia drásticamente a partir de ciertos percentiles. Se usa comúnmente el percentil noventa y cinco (P_{95}) y el percentil noventa y ocho (P_{98}) (Reimann & de Caritat, 2017).

5.2 - Resultados

La lista completa de análisis de pH, CE y concentraciones totales de elementos de las distintas matrices se encuentra en los anexos (anexo 6, 8 y 9). Los resultados obtenidos de las muestras arrojaron valores que se encuentran por debajo del límite de detección (LOD) del equipo, por lo que, para el uso estadístico de los datos estos fueron reemplazados por la mitad del valor del límite de detección del equipo. Para realizar los análisis geoestadísticos de las muestras, se utilizó Excel y PAST.

5.2.1 - Suelos

Para evaluar lo planteado en la hipótesis uno se realizó el cálculo de valores de fondo en las muestras de suelo con los datos en bruto sin utilizar ningún criterio estadístico o geológico para la selección de los datos, posteriormente, se realizará el mismo procedimiento a datos seleccionados aplicando criterios geológicos y estadísticos para mejorar los resultados, finalmente, se dividieron las muestras de suelo con respecto a la litología que les dio su origen.

5.2.1.1 - Suelos - Datos en bruto

Los resultados de los análisis de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones totales por FRX de las muestras de suelo de los datos en bruto se resumen en la siguiente tabla (tabla 18), la cual muestra los principales parámetros estadísticos que además será de utilidad para el cálculo de los métodos $A + 2\sigma$, $M + 2 \text{ MAD}$, la base de datos extendida de los mismo se encuentra en los anexos (anexo 6).

La tabla muestra que los suelos de toda el área de estudio presentan una amplia variabilidad en los datos, elementos como el As, Cu, Mn, Pb y Zn tienen coeficientes de variación por encima del 200 [%], esto se debe a que existen anomalías geoquímicas o sitios contaminados que elevan en gran medida los promedios y otros parámetros estadísticos como la SDEV, o la distribución de

los datos. De igual manera la CE presenta un rango amplio de datos, es importante conocerla ya que se asocia con la movilidad de los elementos.

Además, podemos observar que en los elementos anteriormente mencionados existe una gran variación entre el promedio y la mediana, del mismo modo con la SDEV y el MAD, lo cual es típico cuando se presentan outliers.

Posteriormente se realizó el cálculo de $A + 2\sigma$ y $M + 2 \text{ MAD}$ de los suelos, cuyos valores fueron compilados en una tabla (tabla 19) para comparar las diferencias entre los valores de fondo obtenidos por ambos métodos.

Suelos en bruto							
Elemento	LOD [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	Rango [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	11	338	18	<LOD - 6,374	1,222	329	362
Ba	100	131	106	<LOD - 589	100	79	76
Ca	500	139,463	148,519	33,609 - 290,675	45,390	32,320	33
Cr	85	84	92	<LOD - 174	30	23	36
Cu	35	286	39	<LOD - 7,301	995	265	348
Fe	100	15,649	12,287	297 - 174,194	25,018	9,288	160
Mn	85	406	275	<LOD - 6,101	828	249	204
Pb	13	104	24	<LOD - 2,277	310	91	297
Ti	160	937	978	<LOD - 2,197	577	461	62
V	70	68	76	<LOD - 237	37	28	54
Zn	25	277	79	<LOD - 7,010	940	230	340
Propiedad fisicoquímica	LOD	Promedio	Mediana	Rango	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	8.32	8.26	7.72 - 9.13	0.32	0.25	4
CE	-	617 [μS/cm]	170 [μS/cm]	84 - 5,780 [μS/cm]	1,049 [μS/cm]	491 [μS/cm]	170

Tabla 18. Tabla de principales parámetros estadísticos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de suelo en bruto (n=59).

Mediante un análisis de gráfico de barras y bigotes (figura 54) se puede apreciar la diferencia entre el promedio y la mediana, así como de la SDEV con el MAD, las agrupaciones de elementos se llevaron a cabo en base a concentraciones semejantes que permiten una mejor apreciación gráfica.

Analito	A + 2σ	M + 2 MAD
As [mg/kg]	2,781	676
Ba [mg/kg]	332	263
Ca [mg/kg]	230,243	213,159
Cr [mg/kg]	144	138
Cu [mg/kg]	2,276	569
Fe [mg/kg]	65,685	30,863
Mn [mg/kg]	2,062	772
Pb [mg/kg]	724	205
Ti [mg/kg]	2,092	1,900
V [mg/kg]	142	132
Zn [mg/kg]	2,156	540
pH	8.95	8.76
Ce [μS/cm]	2,716	1,151

Tabla 19. Comparativa de valores de fondo entre A + 2σ y M + 2 MAD en muestras de suelo en bruto (n=59).

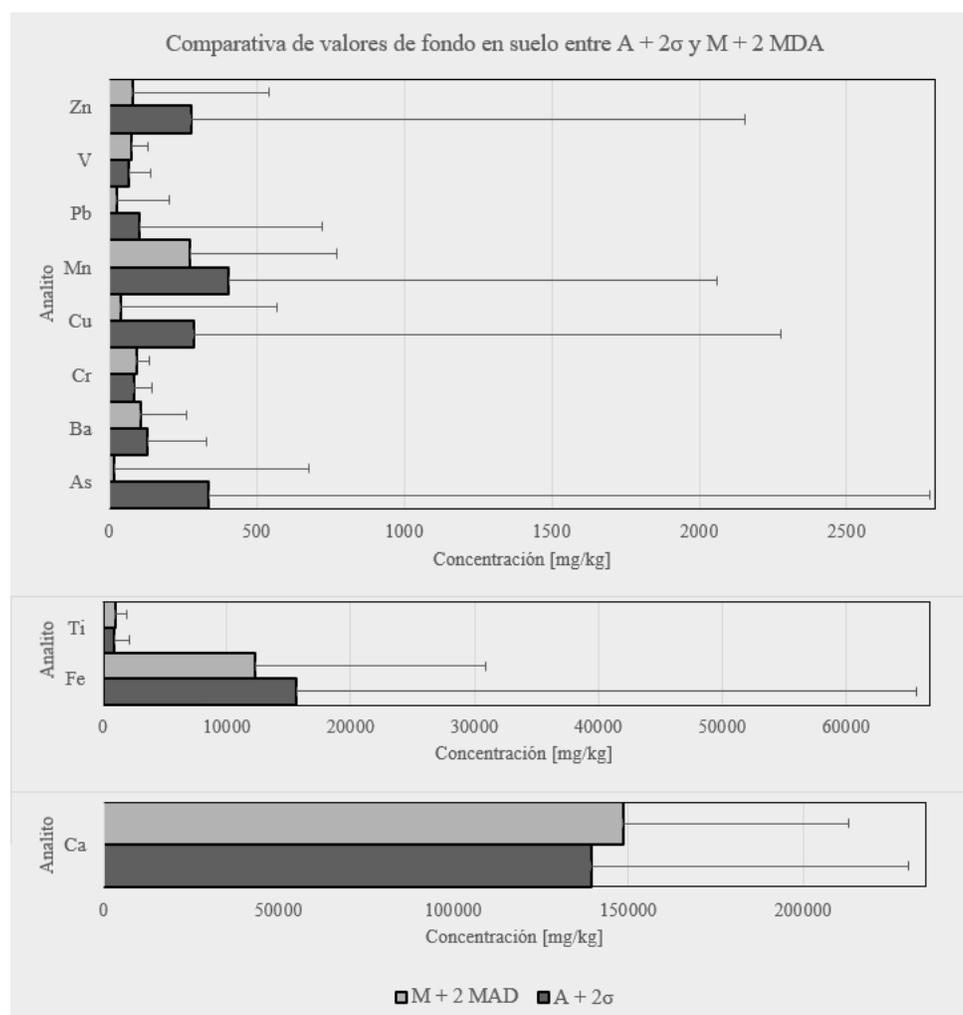


Figura 54. Comparativa de valores de fondo de suelos en bruto mediante gráficas de barras y bigotes, en A + 2σ, la barra representa la media y su bigote dos desviaciones estándar, por otro lado, en M + 2 MAD, la barra representa la mediana y su bigote representa dos MAD (n=59).

Posteriormente, mediante el uso de diagramas de cajas y bigotes con cercas interiores (Figura 55 y 56) se realiza una comparativa de los datos en bruto, y su normalización mediante una transformación logarítmica, el valor de fondo estará definido por el TIF superior. Estos datos se compilaron en una tabla (tabla 20).

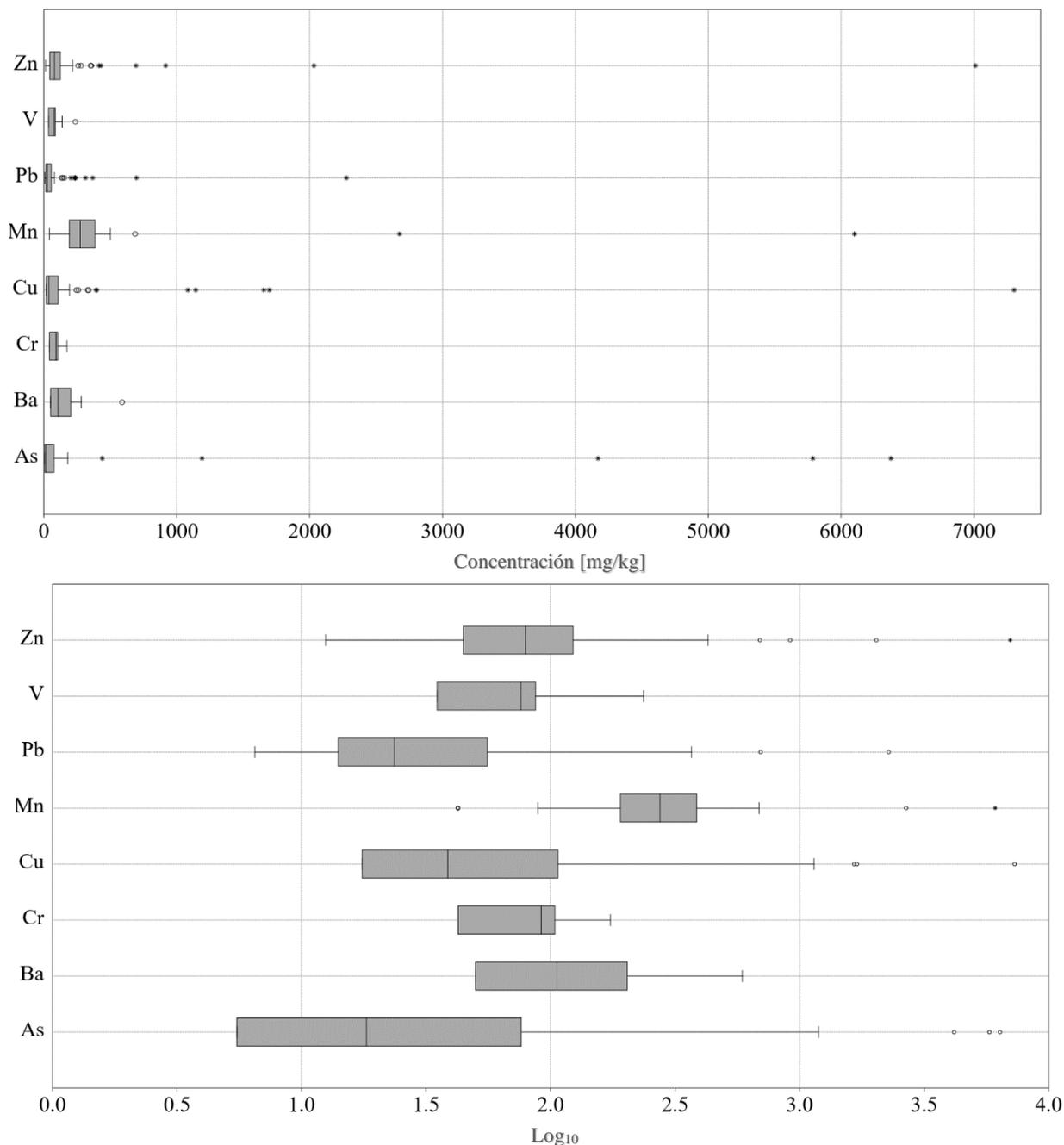


Figura 55. Diagrama de cajas y bigotes con cercas interiores de valores de fondo en suelo de muestras en bruto (PTI), en la figura superior se muestra la distribución de los datos sin transformar y en la inferior se muestra la distribución de datos que han sido transformados logarítmicamente, los círculos representan posibles outliers y los asteriscos se clasifican como outliers (n=59).

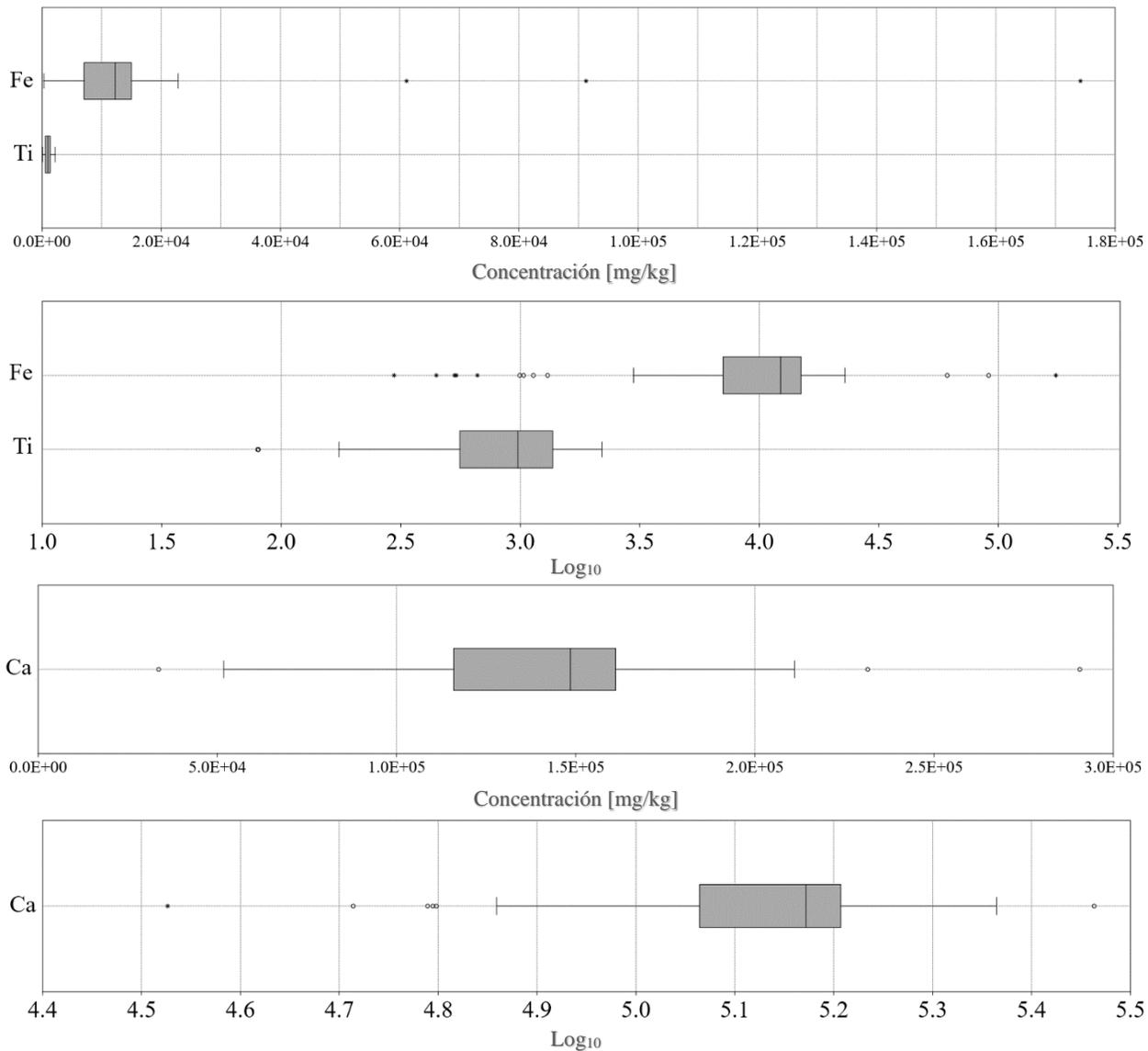


Figura 56. Diagrama de cajas y bigotes con cercas interiores de valores de fondo en suelo de muestras en bruto (PT2), en la figura superior se muestra la distribución de los datos sin transformar y en la inferior se muestra la distribución de datos que han sido transformados logarítmicamente los círculos representan posibles outliers y los asteriscos se clasifican como outliers (n=59).

Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
TIF	183	433	228,880	196	241	26,857	9.09
Log TIF	3,944	1,668	263,903	399	1,620	46,280	9.12
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [μS/cm]	
TIF	679	118	2,581	180	241	575	
Log TIF	1,112	441	5,239	341	564	1,162	

Tabla 20. Comparativa de valores de fondo obtenidos con TIF de datos en bruto y normalizados con logaritmos (n=59).

Finalmente, se calcularon los percentiles P_{95} y P_{98} de los datos en bruto y los normalizados mediante escala logarítmica, se compilaron en una tabla (tabla 21) y se graficaron como ejemplos los percentiles de los elementos As, Cu, Mn, Pb y Zn (figura 57 y 58), ya que estos presentan la mayor variabilidad.

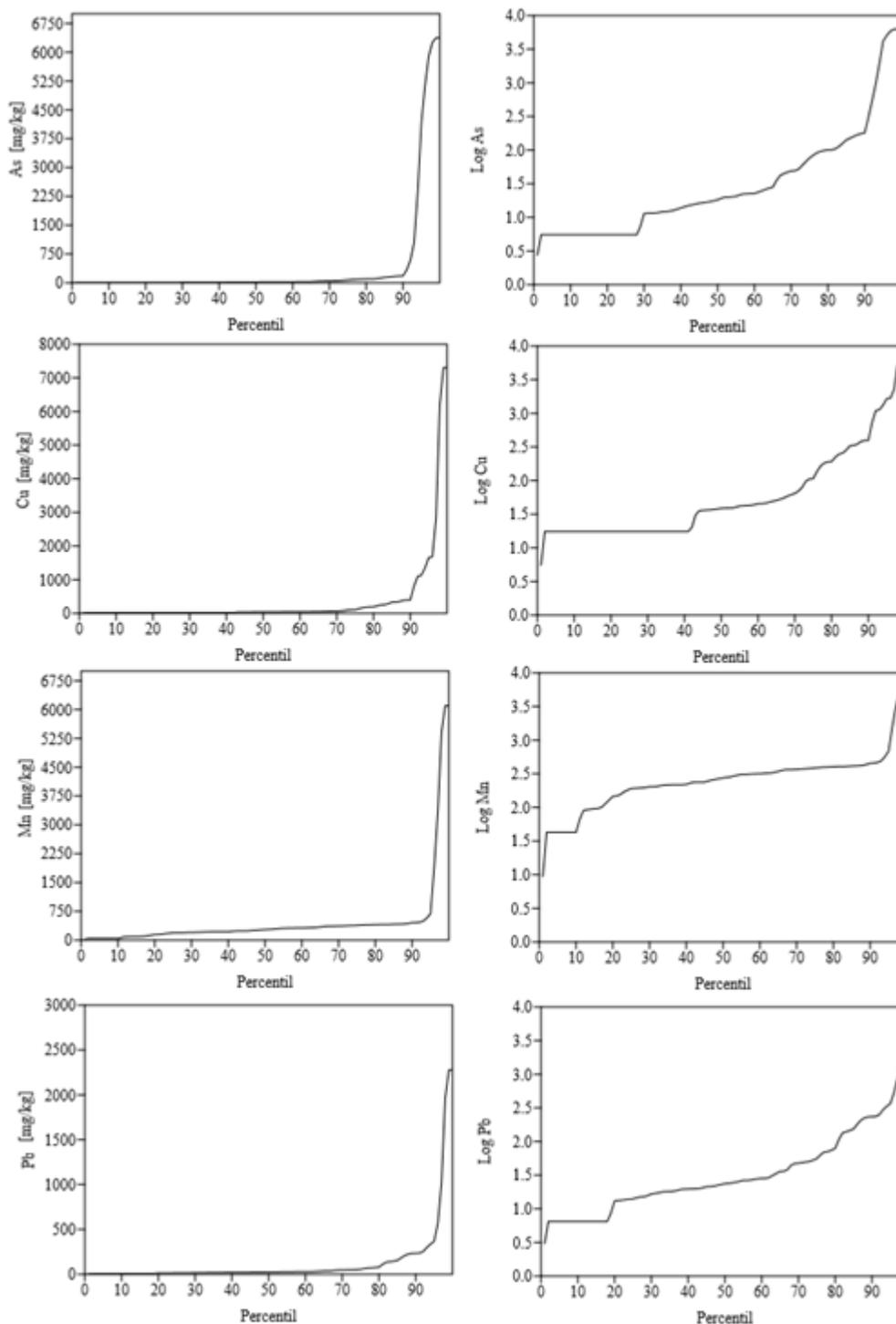


Figura 57. Gráfico de los percentiles de los datos en bruto y normalizados con logaritmos de As, Cu, Mn y Pb ($n=59$).

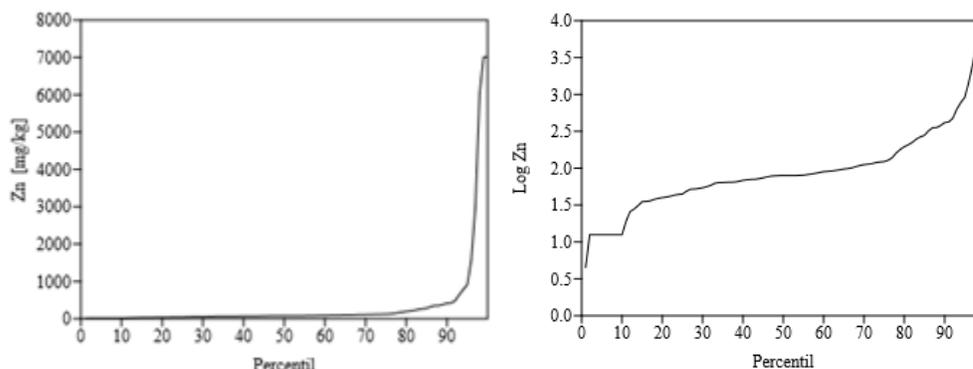


Figura 58. Gráfico de los percentiles de los datos en bruto y normalizados con logaritmos de Zn (n=59).

Analito	P ₉₅	P ₉₈	Log P ₉₅	Log P ₉₈
As [mg/kg]	4,171	6,374	4,171	6,374
Ba [mg/kg]	275	527	275	508
Ca [mg/kg]	211,086	278,838	211,086	277,735
Cr [mg/kg]	118	163	118	161
Cu [mg/kg]	1,656	6,180	1,656	5,453
Fe [mg/kg]	61,136	157,605	61,136	153,063
Mn [mg/kg]	687	5,416	687	5,174
Pb [mg/kg]	368	2,277	368	2,277
Ti [mg/kg]	2,013	2,168	2,013	2,167
V [mg/kg]	130	217	130	212
Zn [mg/kg]	917	6,015	917	5,473
pH	8.92	9.10	8.92	9.10
CE [μS/cm]	2,250	5,326	2,250	5,231

Tabla 21. Comparativa de valores de fondo obtenidos por P₉₅ y P₉₈ de datos en bruto y normalizados con logaritmos (n=59).

Los valores de fondo de percentiles P₉₅ de los datos en bruto y los normalizados son muy similares para la mayoría de los elementos, mientras que en los obtenidos por P₉₈ si presentan algunas variaciones más notables como en el Cu y Zn.

Finalmente se obtuvo una tabla (tabla 22) en la que se integraron todos los métodos y se puede observar la gran variabilidad en los valores de fondo y las limitaciones que estos presentan si no se seleccionan los datos previamente, siendo M + 2 MAD y A + 2σ los más conservadores y apropiados, sin embargo los valores de fondo en algunos elementos como As, Cu, Mn, Pb y Zn son muy elevados y no reflejan el comportamiento real de la zona por lo que es mejor utilizar criterios de selección de datos para obtener mejores resultados.

Valores de fondo de suelos en datos en bruto								
Analito	A + 2σ	M + 2 MAD	TIF	P ₉₅	P ₉₈	Log TIF	Log P ₉₅	Log P ₉₈
As [mg/kg]	2,781	676	183	4,171	6,374	3,944	4,171	6,374
Ba [mg/kg]	332	263	433	275	527	1,668	275	508
Ca [mg/kg]	230,243	213,159	228,880	211,086	278,838	263,903	211,086	277,735
Cr [mg/kg]	144	138	196	118	163	399	118	161
Cu [mg/kg]	2,276	569	241	1,656	6,180	1,620	1,656	5,453
Fe [mg/kg]	65,685	30,863	26,857	61,136	157,605	46,280	61,136	153,063
Mn [mg/kg]	2,062	772	679	687	5,416	1,112	687	5,174
Pb [mg/kg]	724	205	118	368	2,277	441	368	2,277
Ti [mg/kg]	2,092	1,900	2,581	2,013	2,168	5,239	2,013	2,167
V [mg/kg]	142	132	180	130	217	341	130	212
Zn [mg/kg]	2,156	540	241	917	6,015	564	917	5,473
pH	8.95	8.76	9.09	8.92	9.10	9.12	8.92	9.10
CE [μS/cm]	2,716	1,151	575	2,250	5,326	1,162	2,250	5,231

Tabla 22. Comparativa de valores de fondo de suelos obtenidos de todos los métodos en datos en bruto (n=59).

5.2.1.2 – Suelos - Datos seleccionados

En este análisis se llevó a cabo una selección de los datos aplicando criterios estadísticos, geológicos y geoquímicos para discriminar adecuadamente muestras del listado de valores de fondo de suelos.

Con el uso de Qgis, se realizó un análisis de los datos obtenido por Razo en 2006, y mediante una multiplicación de las capas de distribución de As, Cu, Pb y Zn previamente generadas, se obtuvo un polígono (figura 59) que representa la zona de influencia o la zona de mayor concentración de estos elementos en el área de estudio, sin embargo, existen algunas concentraciones altas en zonas cercanas al polígono, por lo que este solo servirá de guía y la selección de los datos no se basará únicamente en este criterio.

Las muestras de suelo S-11, S-12, S-20, S-32, S-33 y S-35 (figura 60) se encuentran dentro de la zona de influencia por lo cual fueron eliminadas de la lista de datos para este análisis. Posteriormente se realizó un análisis de las muestras cercanas a la zona de influencia, en el cual se concluyó que las muestras S-03, S-13, S-25, S-27, S-31, S-39, S-45 y S-46 (figura 60) también presentan influencia antropogénica.

Los suelos S-03 y S-39 y S-46 se encuentran muy cerca de los límites de la zona de influencia, mientras que, las muestras S-13 y S-27 parecen tener cierta afectación debido a un río intermitente que pasa por un terrero ubicado al N-O cerca de los límites de la zona de influencia, del mismo modo, los suelos S-45, S-31 y S-25 parecen estar afectados por un terrero más distal también ubicado al N-O, en estos la concentración de los metales decae proporcionalmente con la distancia al terrero.

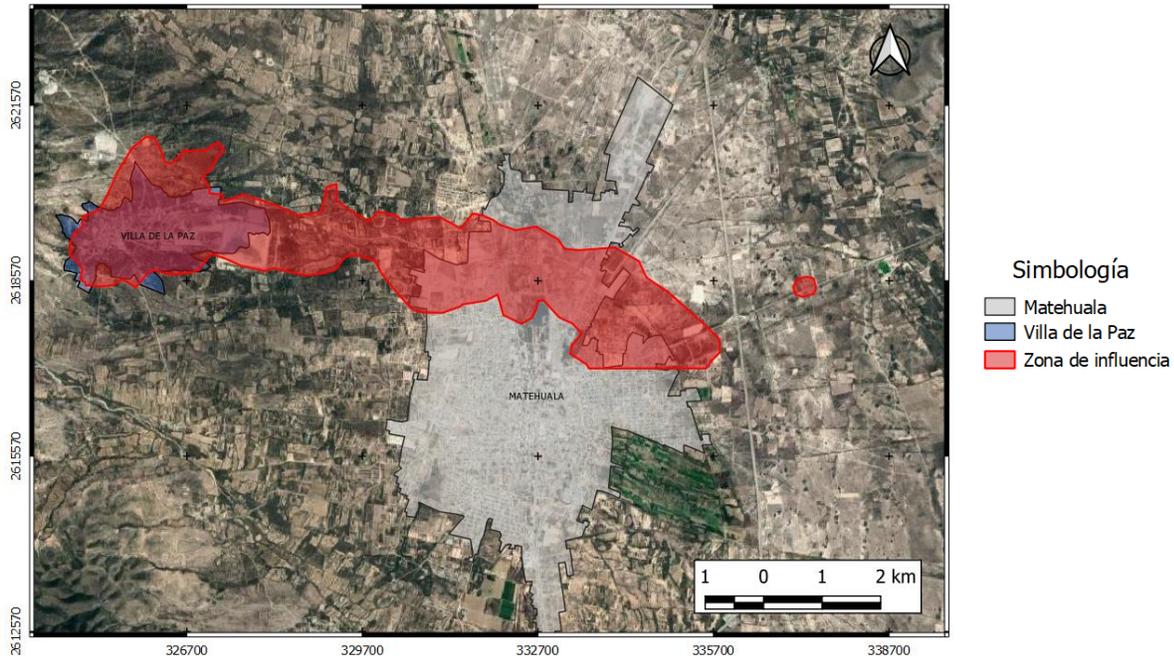


Figura 59. Zona de influencia de Matehuala, San Luis Potosí, México.

Dentro de las muestras de suelo existen dos que se tomaron en la zona mineralizada del cerro El Fraile (figura 60), comparando los datos geoquímicos obtenidos con la bibliografía, se concluyó que la muestra S-02 corresponde a un suelo generado a partir de la mineralización del skarn Cu-Au y la muestra S-30 corresponde a un suelo generado a partir de la mineralización de una veta de Pb-Zn-Ag. Esto se aprecia de mejor manera en la gráfica de barras (figura 61).

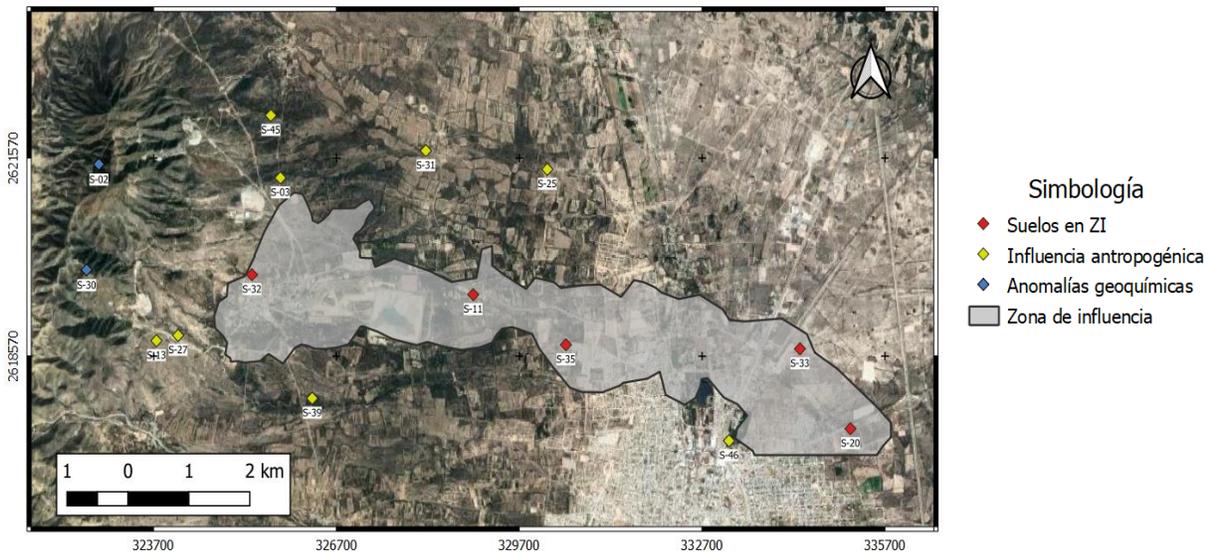


Figura 60. Muestras de suelo con influencia antropogénica y anomalías geoquímicas.

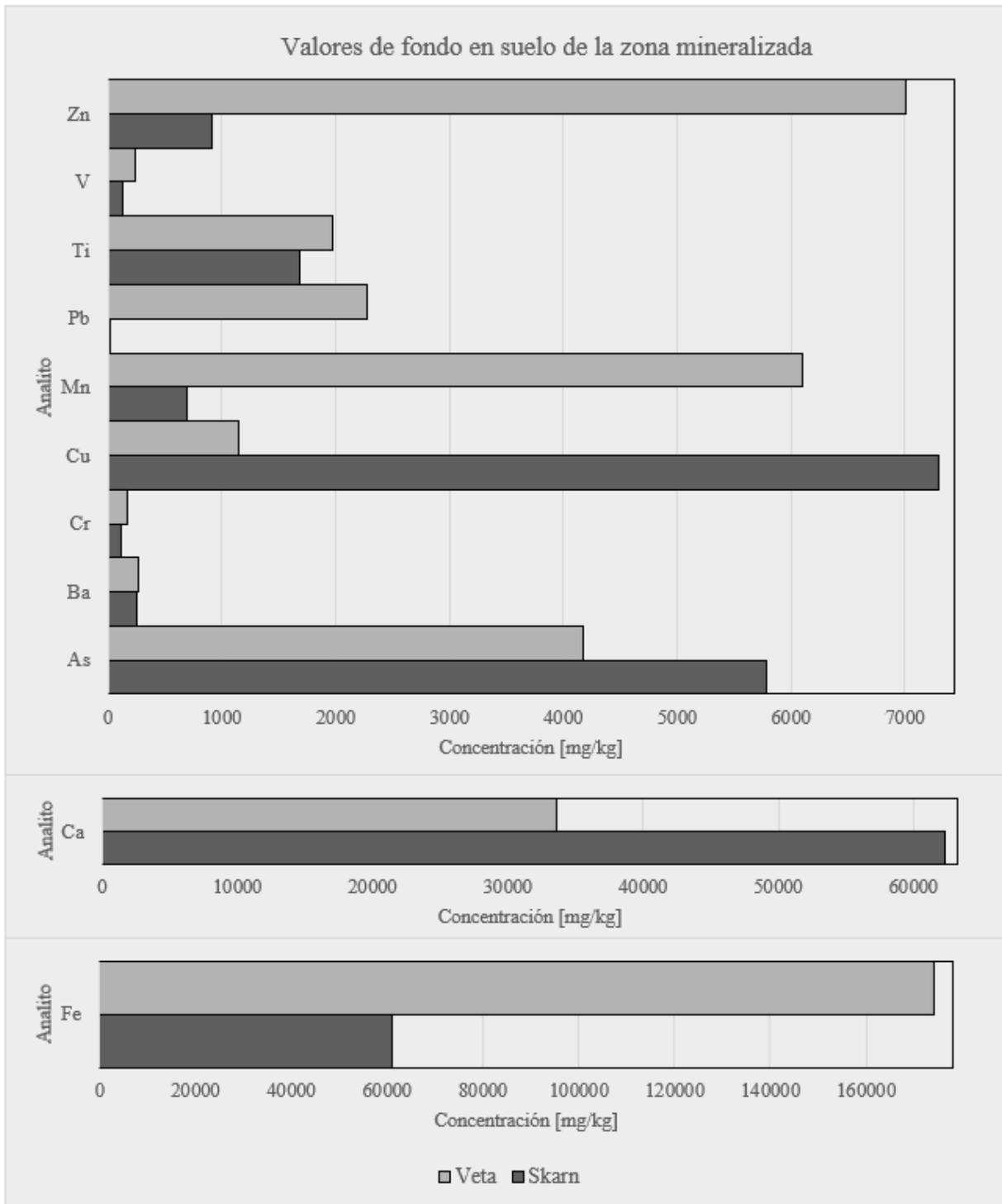


Figura 61. Comparativa de concentraciones de metales en suelos generados a partir de skarn (Cu-Au) y veta (Pb-Zn-Ag).

Una vez discriminados los datos se procedió al cálculo de los parámetros estadísticos básicos que fueron compilados en una tabla (tabla 23) en la cual se puede apreciar una notable mejoría en los coeficientes de variación (CV) de la mayoría de los elementos, además, es muy evidente la diferencia en los promedios, mediana, SDEV y MAD de los elementos As, Cu, Mn, Pb y Zn.

Suelos seleccionados							
Elemento	LOD [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	Rango [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	11	17	13	<LOD - 62	14	10	84
Ba	100	107	50	<LOD - 275	74	57	70
Ca	500	142,362	147,671	61,574 - 290,675	44,711	31,900	31
Cr	85	78	90	<LOD - 118	29	24	37
Cu	35	33	18	<LOD - 159	28	16	82
Fe	100	9,672	11,201	297 - 22,835	5,620	4,419	58
Mn	85	236	237	<LOD - 416	117	98	50
Pb	13	26	19	<LOD - 238	36	15	138
Ti	160	914	1,002	<LOD - 2,197	589	474	64
V	70	62	35	<LOD - 138	30	27	48
Zn	25	64	65	<LOD - 170	34	27	53
Propiedad fisicoquímica	LOD	Promedio	Mediana	Rango	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	8.34	8.26	7.86 - 9.13	0.32	0.25	9
CE	-	682 [μS/cm]	170 [μS/cm]	84 - 5,780 [μS/cm]	1,163 [μS/cm]	553 [μS/cm]	171

Tabla 23. Tabla de principales parámetros estadísticos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de suelo seleccionadas (n=43).

Se procedió al cálculo de $A + 2\sigma$ y $M + 2 \text{ MAD}$ de los suelos seleccionados, estos valores fueron compilados en una tabla (tabla 24) para comparar las diferencias entre los valores de fondo obtenidos por ambos métodos.

Analito	A + 2σ	M + 2 MAD	Analito	A + 2σ	M + 2 MAD
As [mg/kg]	45	33	Pb [mg/kg]	99	49
Ba [mg/kg]	256	164	Ti [mg/kg]	2,091	1,951
Ca [mg/kg]	231,784	211,470	V [mg/kg]	121	89
Cr [mg/kg]	136	138	Zn [mg/kg]	133	118
Cu [mg/kg]	89	49	pH	8.99	8.77
Fe [mg/kg]	20,913	20,038	Ce [μS/cm]	3,010	1,275
Mn [mg/kg]	470	433			

Tabla 24. Comparativa de valores de fondo entre $A + 2\sigma$ y $M + 2 \text{ MAD}$ en muestras de suelo seleccionadas (n=43).

Posteriormente, de igual manera que con los datos en bruto se utilizaron los diagramas de cajas y bigotes con cercas interiores (Figura 62 y 63) se realiza una comparativa de los datos sin transformar, y su normalización mediante una transformación logarítmica, el valor de fondo estará definido por el TIF superior. Estos datos compilaron en una tabla (tabla 25).

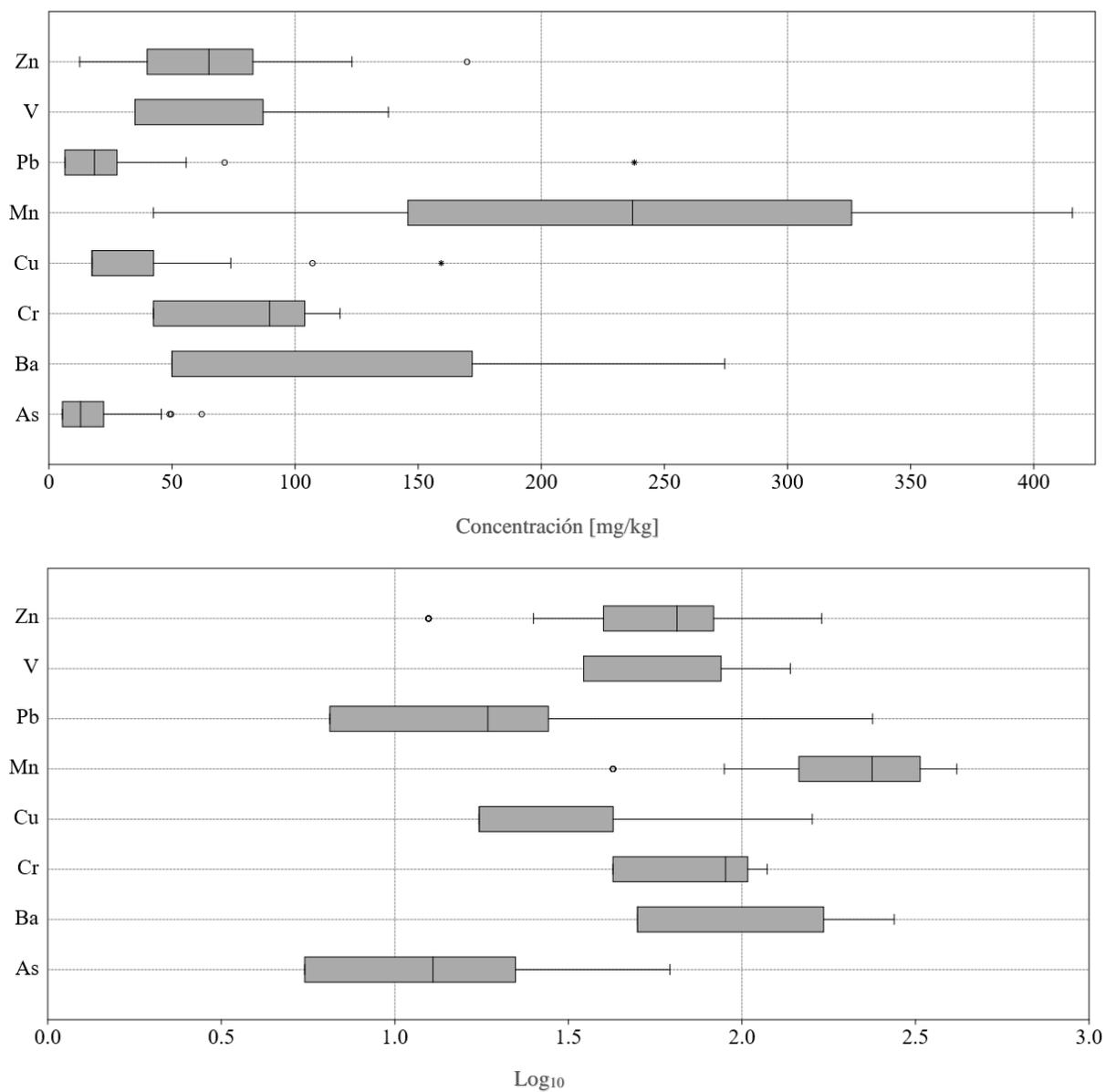


Figura 62. Diagrama de cajas y bigotes con cercas interiores de valores de fondo en suelo con muestras seleccionadas (PT1), en la figura superior se muestra la distribución de los datos sin transformar y en la inferior se muestra la distribución de datos que han sido transformados logarítmicamente, los círculos representan posibles outliers y los asteriscos se clasifican como outliers (n=43).

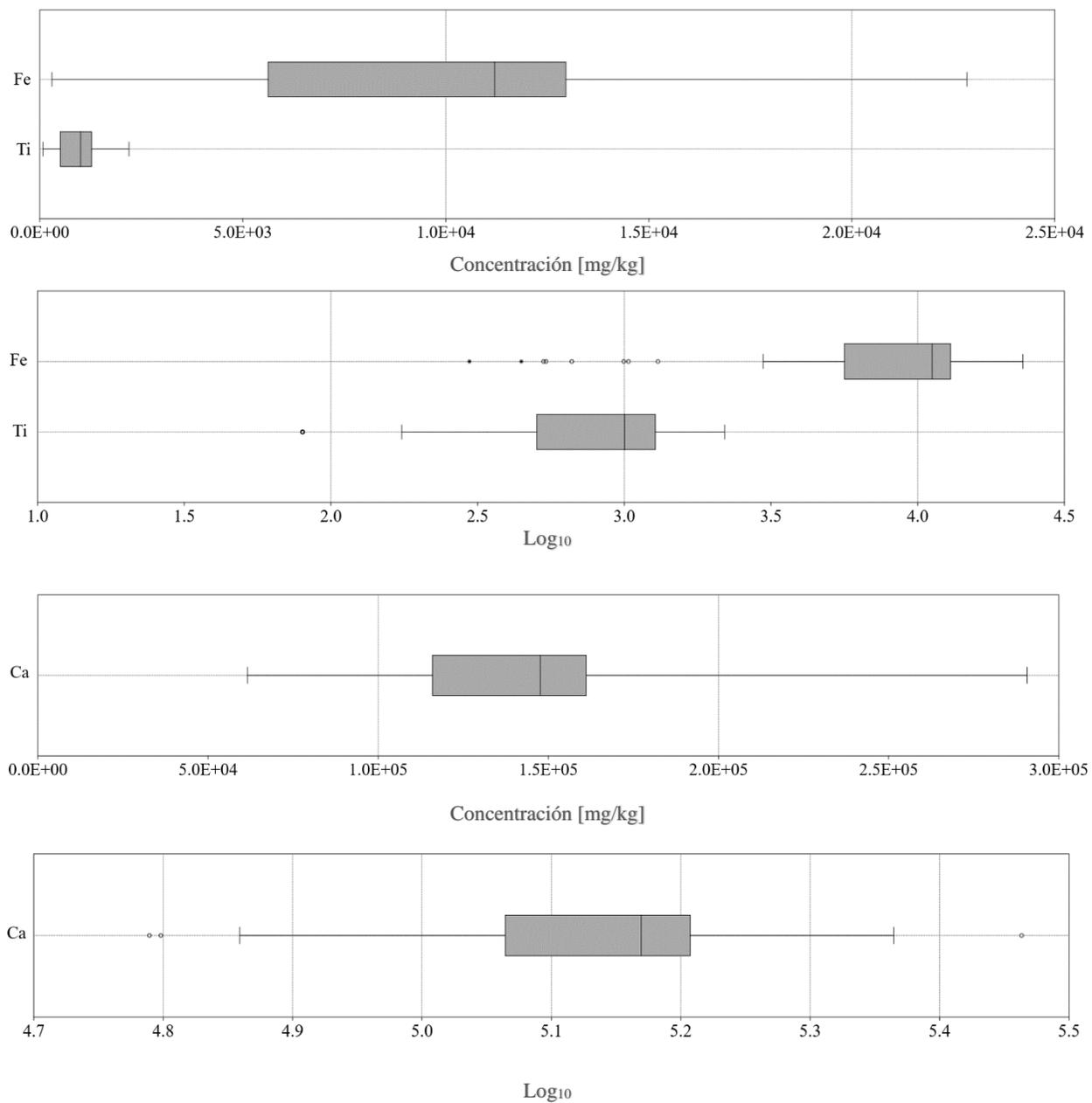


Figura 63. Diagrama de cajas y bigotes con cercas interiores de valores de fondo en suelo con muestras seleccionadas (PT2), en la figura superior se muestra la distribución de los datos sin transformar y en la inferior se muestra la distribución de datos que han sido transformados logarítmicamente, los círculos representan posibles outliers y los asteriscos se clasifican como outliers (n=43).

Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
TIF	47	353	228,880	196	80	23,954	9.22
Log TIF	181	1,098	263,903	397	161	45,291	9.27
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [μ S/cm]	
TIF	596	59	2,434	165	147	556	
Log TIF	1,090	243	5,153	341	248	1,014	

Tabla 25. Comparativa de valores de fondo obtenidos con TIF de datos seleccionados y normalizados con logaritmos ($n=43$).

Los resultados obtenidos mediante el TIF de datos sin procesar muestran una notable mejoría y se adaptan muy bien al comportamiento de la zona, además estos datos son muy similares a los obtenidos por los métodos de $A + 2\sigma$ y $M + 2 \text{ MAD}$, por el contrario, los datos normalizados con logaritmos presentan límites muy superiores a los valores máximos en la mayoría de los casos por lo que no son adecuados para caracterizar la zona.

De igual manera que con los datos en bruto, se calcularon los percentiles P_{95} y P_{98} de los datos seleccionados y los normalizados mediante escala logarítmica, se compilaron en una tabla (tabla 26), y como ejemplo se graficaron los percentiles de los elementos As, Cu, Mn, Pb y Zn (figura 64 y 65), para observar los cambios en la distribución de estos.

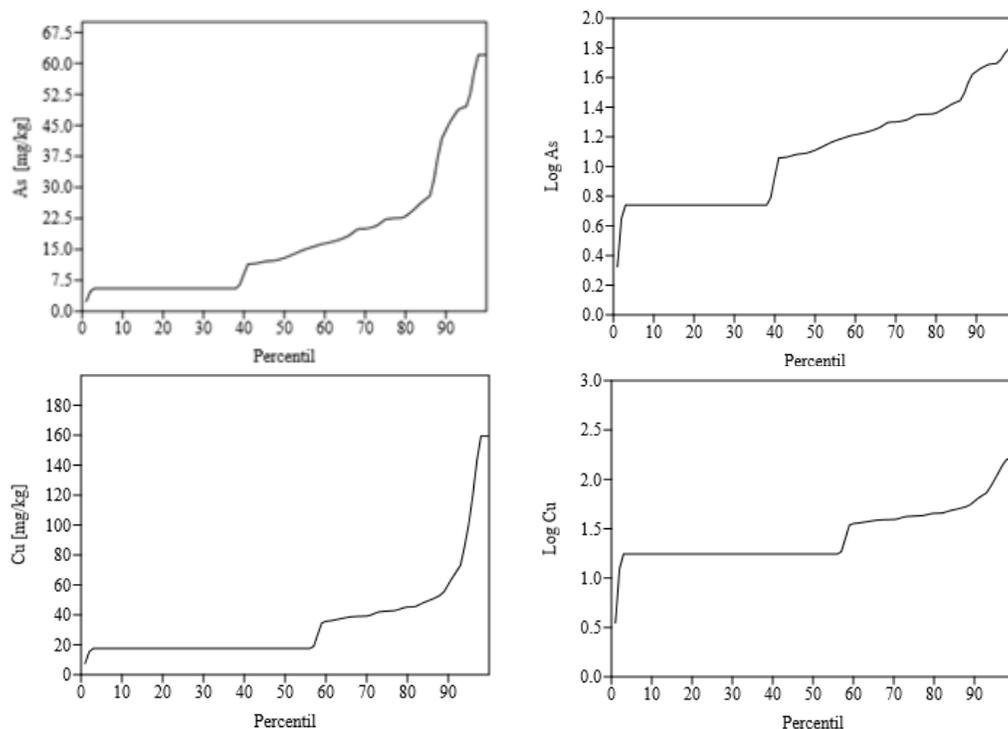


Figura 64. Gráfico de los percentiles de los datos seleccionados y normalizados con logaritmos de As y Cu ($n=43$).

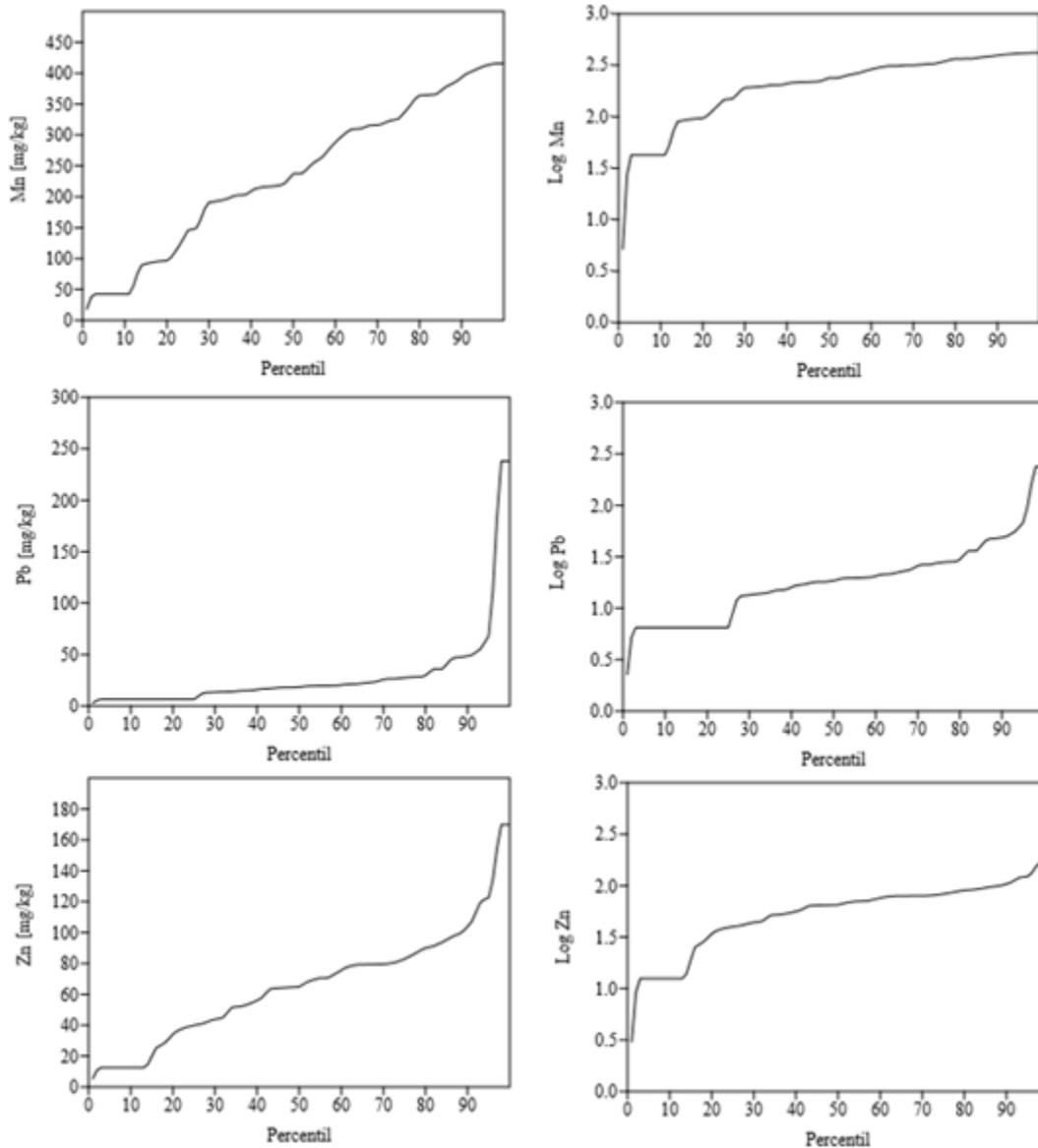


Figura 65. Gráfico de los percentiles de los datos seleccionados y normalizados con logaritmos de Mn, Pb y Zn (n=43).

Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
P95	50	245	227,022	114	100	18,276	8.98
P98	62	275	290,675	118	159	22,836	9.13
Log P95	50	245	226,840	114	99	18,275	8.98
Log P98	62	275	290,677	118	159	22,835	9.26
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [μS/cm]	
P95	411	68	2,044	109	123	3,258	
P98	416	238	2,197	138	170	5,780	
Log P95	411	68	2,044	109	123	3,211	
Log P98	416	238	2,197	138	170	5,780	

Tabla 26. Comparativa de valores de fondo obtenidos por P₉₅ y P₉₈ de datos seleccionados y normalizados con logaritmos (n=43).

Finalmente se obtuvo una tabla (tabla 27) en la que se integraron todos los métodos.

Analito	Valores de fondo de suelos en datos seleccionados							
	A + 2 σ	M + 2 MAD	TIF	P ₉₅	P ₉₈	Log TIF	Log P ₉₅	Log P ₉₈
As [mg/kg]	45	33	47	50	62	181	50	62
Ba [mg/kg]	256	164	353	245	275	1098	245	275
Ca [mg/kg]	231,784	211,470	228,880	227,022	290,675	263,903	226,840	290,677
Cr [mg/kg]	136	138	196	114	118	397	114	118
Cu [mg/kg]	89	49	80	100	159	161	99	159
Fe [mg/kg]	20,913	20,038	23,954	18,276	22,836	45,291	18,275	22,835
Mn [mg/kg]	470	433	596	411	416	1,090	411	416
Pb [mg/kg]	99	49	59	68	238	243	68	238
Ti [mg/kg]	2,091	1,951	2,434	2,044	2,197	5,153	2,044	2,197
V [mg/kg]	121	89	165	109	138	341	109	138
Zn [mg/kg]	133	118	147	123	170	248	123	170
pH	8.99	8.77	9.22	8.98	9.13	9.27	8.98	9.26
CE [μ S/cm]	3,010	1,275	556	3,258	5,780	1,014	3,211	5,780

Tabla 27. Comparativa de valores de fondo de suelos obtenidos de todos los métodos en datos seleccionados (n=43).

A diferencia de cuando se realizaron los análisis de datos en bruto, al utilizar criterios para la selección de estos, los valores de fondo se vuelven mucho más consistentes, los métodos A + 2 σ , M + 2 MAD, TIF y en algunos casos el P₉₅ coinciden de gran manera, por otro lado, al mejorarse la distribución la transformación logarítmica deja de ser útil y los resultados en el Log TIF arrojan valores muy elevados y que no coincide con los demás.

Analizando la distribución de todos los elementos, se seleccionaron los métodos M + 2 MAD y TIF como los más adecuados para representar los valores de fondo de la zona.

5.2.1.3 – Suelos - Análisis por tipo de litología

A consecuencia de que los suelos se generan a partir de una litología asociada, se plantea el cálculo de los valores de fondo clasificándolos a partir de esta, sin embargo, algunos de los métodos como TIF, P₉₅ y P₉₈ requieren mínimamente una base de datos de n=20, lo cual no se cumple si se realiza esta clasificación, por lo que únicamente se basara en el cálculo de A + 2 σ y M + 2 MAD.

A continuación, se presentarán tablas (tablas 28-33) donde se recopilaron estos valores de fondo, y un análisis de gráfico de barras de estas en los anexos (anexo 7).

Aluviales

Las muestras de suelo asociadas a esta litología son: FS-04, FS-05, FS-10, FS-11, S-01, S-09, S-10, S-15, S-24 y S-38.

Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
A + 2σ	50	324	178,661	132	73	15,539	8.97
M + 2 DMA	40	305	173,863	120	63	14,773	8.84
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [μS/cm]	
A + 2σ	421	71	1,744	114	112	307	
M + 2 DMA	385	52	1,569	109	99	260	

Tabla 28. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de depósitos aluviales (n=10).

Calizas grises

Las muestras de suelo asociadas a esta litología son: FS-07, FS-08, FS-09, S-19, S-22, S-34, S-42 y S-44.

Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
A + 2σ	16	135	219,623	137	< LOD	17,023	8.75
M + 2 DMA	10	85	210,939	124	< LOD	15,815	8.51
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [μS/cm]	
A + 2σ	502	52	2,146	91	107	307	
M + 2 DMA	450	40	1,963	59	104	261	

Tabla 29. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de calizas grises (n=8).

Caliza-Lutita

Las muestras de suelo asociadas a esta litología son: FS-13, FS-15, S-23, S-26, S-28, S-29, S-36 y S-37.

Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
A + 2σ	26	303	311,880	136	98	21,414	9.31
M + 2 DMA	25	269	274,453	125	72	19,112	9.18
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [μS/cm]	
A + 2σ	373	29	1,716	139	117	199	
M + 2 DMA	304	28	1,532	128	98	198	

Tabla 30. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de caliza-lutitas (n=8).

Conglomerado polimíctico

Las muestras de suelo asociadas a esta litología son: FS-20, S-08 y S-18.

Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
A + 2σ	80	208	184,592	119	225	17,700	9.01
M + 2 DMA	69	121	152,206	113	159	15,675	8.80
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [μS/cm]	
A + 2σ	439	341	1,637	100	163	202	
M + 2 DMA	371	196	1,435	95	145	159	

Tabla 31. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de conglomerado polimíctico (n=3).

Lacustre (Yesos)

Las muestras de suelo asociadas a esta litología son: FS-06, S-05, S-06, S-07, S-08, S-14, S-17, S-40 y S-41.

Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
A + 2 σ	42	134	170,195	< LOD	< LOD	2,610	8.20
M + 2 DMA	21	74	167,222	< LOD	< LOD	1,660	8.10
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [μ S/cm]	
A + 2 σ	149	29	< LOD	< LOD	39	5,185	
M + 2 DMA	101	18	< LOD	< LOD	25	3,301	

Tabla 32. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de rocas lacustres (Yeso) (n=9).

Lutita-Arenisca

Las muestras de suelo asociadas a esta litología son: FS-02, FS-03 y S-43.

Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
A + 2 σ	23	323	244,996	155	55	30,166	8.97
M + 2 DMA	20	172	228,787	93	34	23,055	8.83
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [μ S/cm]	
A + 2 σ	385	20	2,850	168	75	313	
M + 2 DMA	305	18	2,007	123	73	233	

Tabla 33. Comparativa de valores de fondo de suelos en la zona de lutita-arenisca (n=3).

De las tablas anteriores podemos observar la variabilidad del suelo dependiendo de su litología, como era de esperarse los suelos asociados a litologías proximales a la mineralización presentan valores más altos en As, Pb, Cu y Zn. El Mn parece tener un valor cercano a cuatrocientos en la mayoría de la zona a excepción de los suelos formados a partir de rocas lacustres.

Si bien esta clasificación es mucho más detallada que la agrupación general de la zona tiene que ser tomada con reservas debido a la limitada cantidad de muestras para algunas de estas litologías, sin embargo, es un buen precedente como método para evaluar sitios con varios tipos de fuentes de contaminación antropogénica.

5.2.2 - Sedimentos

Para el análisis de sedimentos se utilizó el mismo proceso de selección de datos aplicado para el cálculo de los valores de fondo de suelos, debido a que se comprobó su utilidad. La base de datos se encuentra en los anexos (anexo 8) y está conformada por los análisis de pH, CE y concentraciones totales de elementos por FRX, de las muestras obtenidas en campo y datos de las cartas geoquímicas F14A24 y F14A25 del Servicio Geológico Mexicano (SGM) que se adicionaron para complementarla.

5.2.2.1 - Selección de datos

La selección de datos se realizó siguiendo los mismos que fueron aplicados en la selección de suelos, se excluyeron los datos que se encontraban en la zona de influencia y se analizaron los datos circundantes a la misma.

Los datos Sed-09 y SGM 65 se encuentran dentro de la zona de influencia. Los sedimentos Sed-05, Sed-06, Sed-07, Sed-12 y Sed-15 pertenecientes al sistema de canales cerrito blanco y presenta elevadas concentraciones de As, Pb y Zn mucho más elevados que el promedio de la zona por lo cual fueron retirados del análisis.

Por otro lado, los SGM-85 y SGM-86 se encuentran cerca de un terrero ubicado al O del área de influencia, Sed-03, SGM-91 y SGM-92 parecen estar influenciados por este terrero y las presas de jales, ambos grupos tienen valores muy elevados de As, Cu, Pb y Zn.

Finalmente, las muestras Sed-01, Sed-02, Sed-18, SGM-62, SGM-63, SGM-64, SGM-69 y SGM-70, están ubicados cerca de dos terreros al N-O de la zona de influencia y presentan concentraciones muy elevadas de As, Cu, Pb y Zn. El Sed-16 presenta concentraciones un poco más elevadas en algunos elementos que el promedio, sin embargo, no tan elevadas como las anteriores por lo que si fue considerado para el análisis. Los datos excluidos se pueden apreciar en un mapa (figura 66).

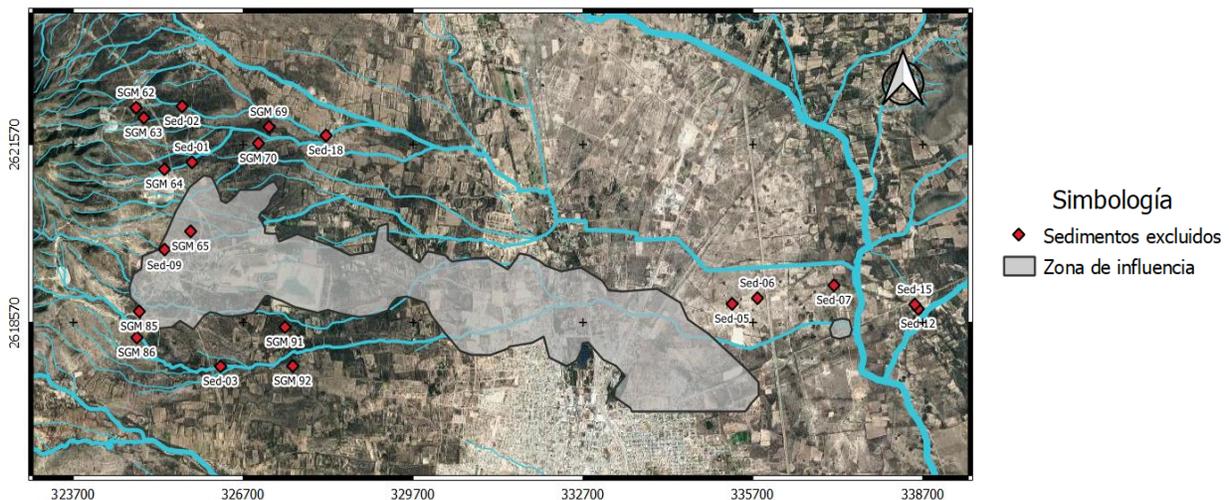


Figura 66. Mapa de muestras excluidas de sedimentos del análisis de valores de fondo

Una vez generada una base de datos adecuada para determinar los valores de fondo se calcularon los parámetros estadísticos básicos y se agruparon en una tabla (tabla 34). Algunos elementos como el V y Ti, no cuentan con la base de datos completa, para estos se trabajó con los datos existentes. Los datos del SGM tienen valores inferiores al LOD del equipo de FRX por lo que en algunos elementos el valor inferior del rango será menor al LOD.

Sedimentos seleccionados							
Elemento	LOD [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	Rango [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	11	17	4	1 - 160	31	16	181
Ba	100	157	147	<LOD - 449	61	42	39
Ca	500	180,984	186,200	70,691 - 296,100	47,909	40,943	26
Cr	85	27	10	1 - 119	34	26	124
Cu	35	29	19	6 - 241	31	16	105
Fe	100	11,285	10,013	704 - 22,034	4,692	3,796	42
Mn	85	287	275	<LOD - 575	88	62	31
Pb	13	22	15	2 - 211	25	13	113
Ti	160	390	114	44 - 2,423	553	309	142
V	70	74	81	<LOD - 125	31	24	42
Zn	25	53	49	14 - 153	23	16	44
Propiedad fisicoquímica	LOD	Promedio	Mediana	Rango	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	8.56	8.57	7.77 - 9.25	0.44	0.35	5.16
CE [μ S/cm]	-	402	119	44.4 - 2,220	723	321	180

Tabla 34. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de sedimentos seleccionadas (n=106).

En esta tabla podemos apreciar que los elementos As, Cr, Cu, Pb y Ti, tiene CV mayores a cien, que se debe al amplio rango de sus valores, lo cual es parte de la variabilidad natural que se presenta en el área de estudio. Posteriormente, se calculó el $A + 2\sigma$ y $M + 2$ MAD de los sedimentos seleccionados, estos valores fueron compilados en una tabla (tabla 35) y se generaron gráficos de barras y bigotes (figura 67) para comparar las diferencias entre los valores de fondo obtenidos por ambos métodos.

Analito	A + 2 σ	M + 2 MAD	Analito	A + 2 σ	M + 2 MAD
As [mg/kg]	78	37	Pb [mg/kg]	71	40
Ba [mg/kg]	279	231	Ti [mg/kg]	1,495	731
Ca [mg/kg]	276,802	268,087	V [mg/kg]	135	129
Cr [mg/kg]	95	63	Zn [mg/kg]	100	81
Cu [mg/kg]	91	50	pH	9.44	9.26
Fe [mg/kg]	20,668	17,604	CE [μ S/cm]	1,849	761
Mn [mg/kg]	462	400			

Tabla 35. Comparativa de valores de fondo entre $A + 2\sigma$ y $M + 2$ MAD en muestras de sedimentos seleccionadas (n=106).

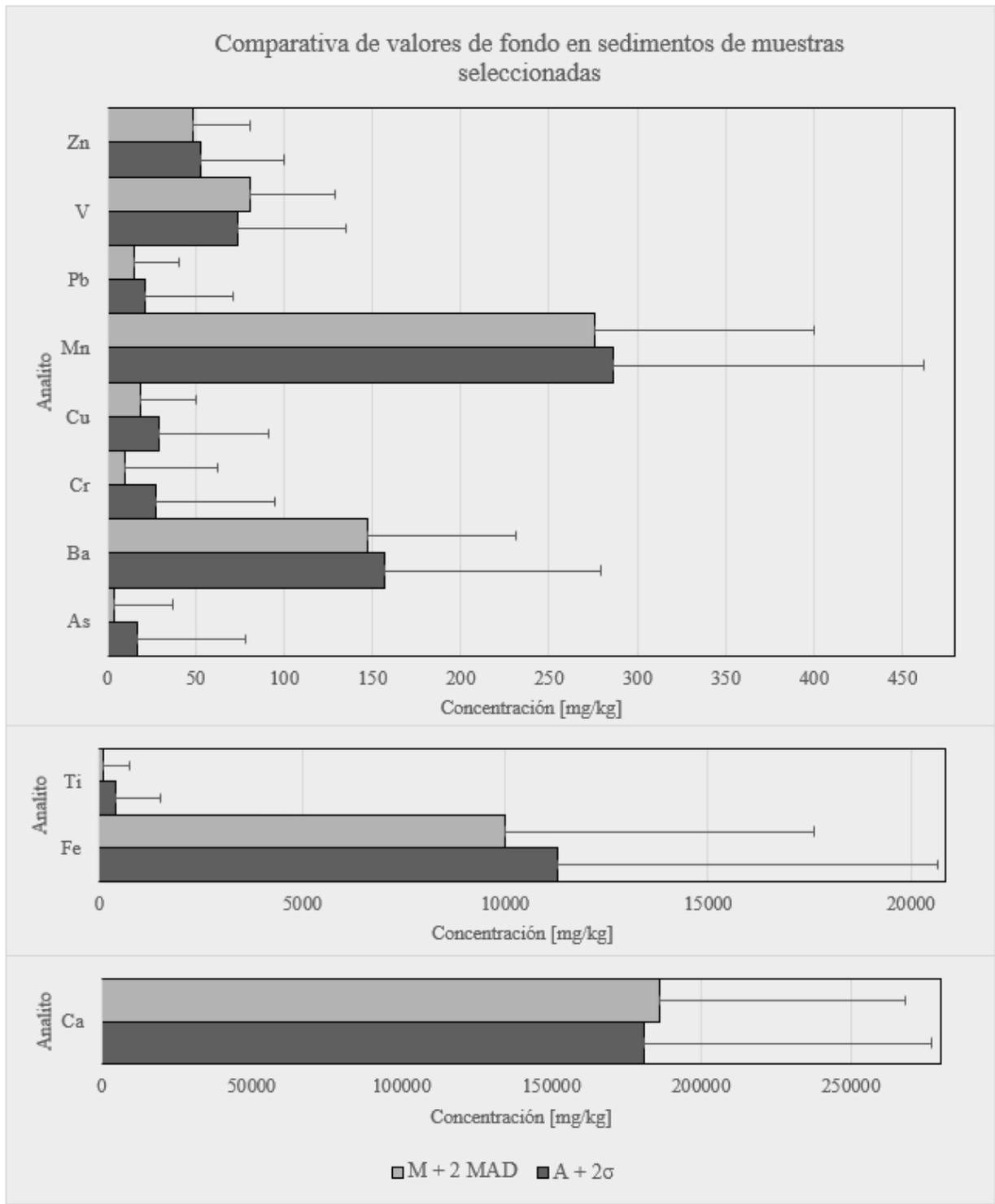


Figura 67. Comparativa de valores de fondo de sedimentos seleccionados mediante gráficas de barras y bigotes, en $A + 2\sigma$, la barra representa la media y su bigote dos desviaciones estándar, por otro lado, en $M + 2 MAD$, la barra representa la mediana y su bigote representa dos MAD ($n=106$).

Después se realizó el análisis de cajas y bigotes (Figura 68) para calcular el TIF, con lo observado en el análisis de suelo, después de realizar una selección de datos se puede aplicar el TIF sin necesidad de normalizar los datos por lo que no se utilizó esta transformación para el análisis. Los resultados obtenidos se agruparon en una tabla (tabla 36).

En las gráficas podemos observar que algunos datos que se encuentran por encima del valor de TIF, esto se debe a que la base de datos de sedimentos es mucho más amplia que en los suelos y representan un porcentaje muy bajo del total de estos datos.

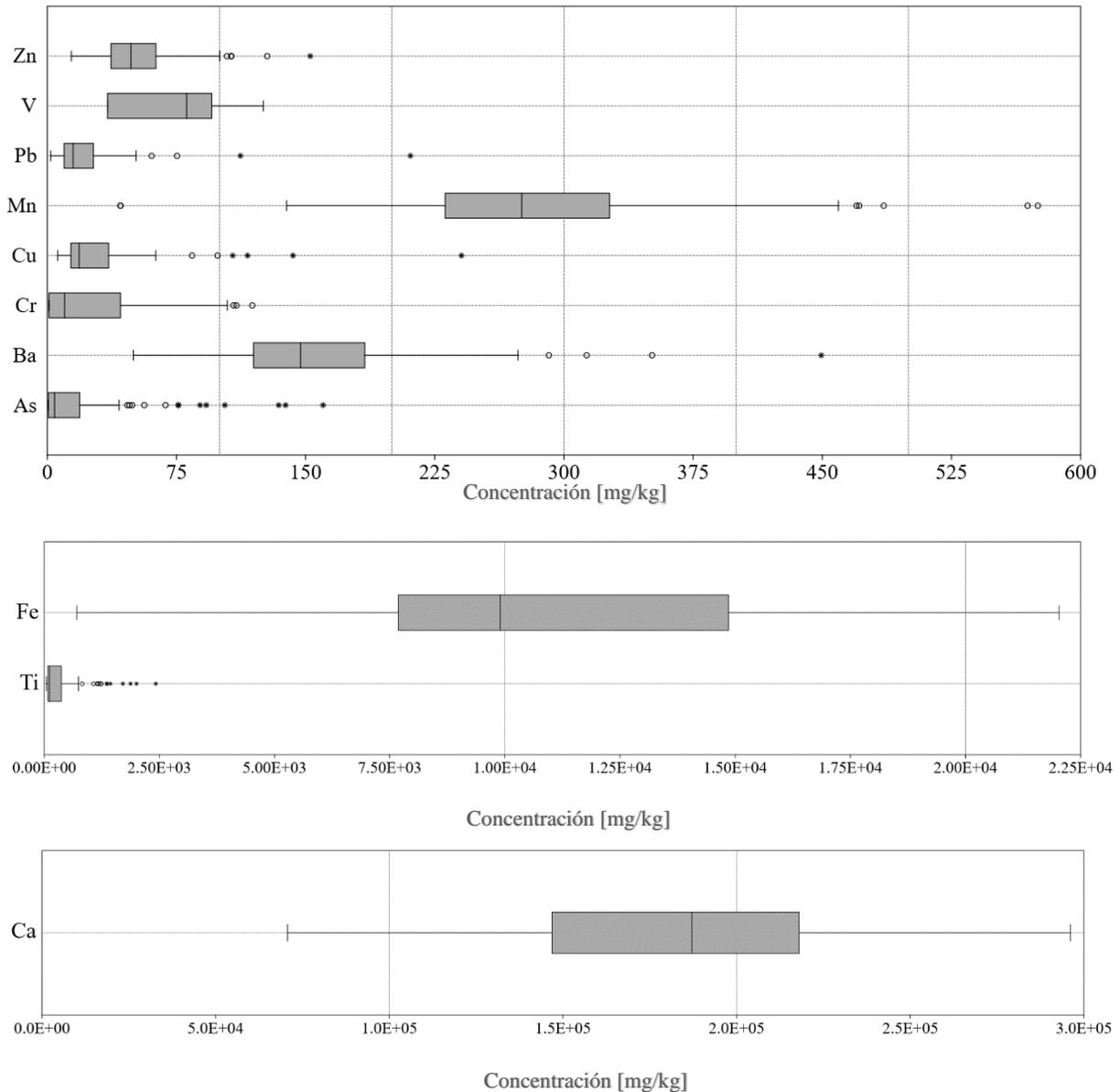


Figura 68. Diagrama de cajas y bigotes con cercas interiores de valores de fondo en sedimentos seleccionados (n=106).

Posteriormente, se calcularon los percentiles P_{95} y P_{98} y se recopilaron en una tabla (tabla 36), del mismo modo que con los suelos se graficaron los percentiles de los elementos As, Cu, Mn, Pb y Zn (figura 69), para observar los cambios en la distribución de estos.

Analito	TIF	P_{95}	P_{98}	Analito	TIF	P_{95}	P_{98}
As [mg/kg]	46	91	138	Pb [mg/kg]	52	51	107
Ba [mg/kg]	281	271	346	Ti [mg/kg]	807	1,748	2,213
Ca [mg/kg]	325,433	252,895	284,706	V [mg/kg]	186	124	125
Cr [mg/kg]	105	102	110	Zn [mg/kg]	102	103	125
Cu [mg/kg]	68	94	139	pH	10.25	9.25	9.25
Fe [mg/kg]	25,478	20,923	21,784	CE [μ S/cm]	3,923	2,284	2,350
Mn [mg/kg]	470	466	558				

Tabla 36. Comparativa de valores de fondo entre TIF y P_{95} y P_{98} en muestras de sedimentos seleccionadas ($n=106$).

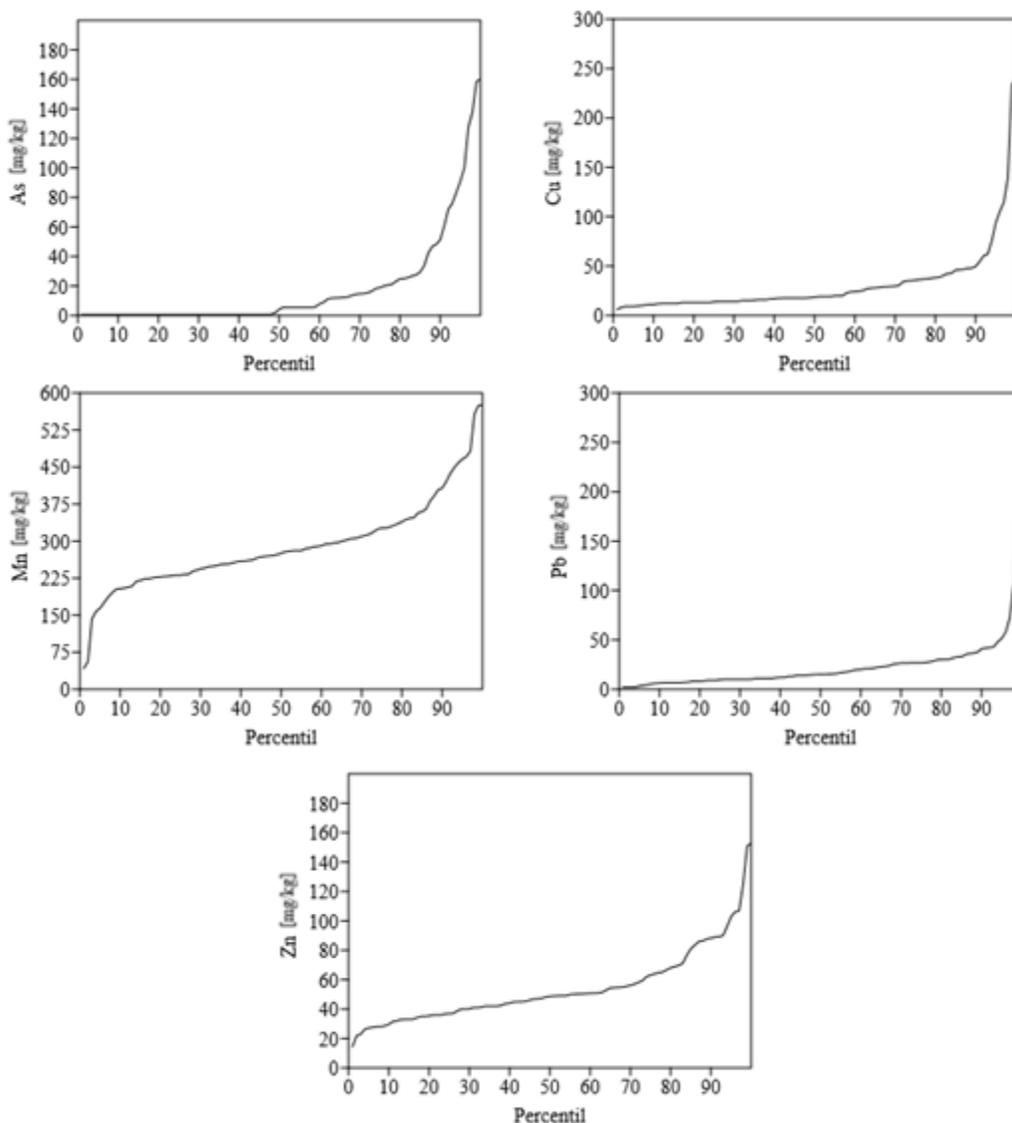


Figura 69. Gráfico de los percentiles de los datos de sedimentos seleccionados de As, Cu, Mn, Pb y Zn. ($n=106$)

Finalmente se obtuvo una tabla (tabla 37) en la que se integraron todos los métodos.

Analito	Sedimentos seleccionados				
	A + 2 σ	M + 2 MAD	TIF	P ₉₅	P ₉₈
As [mg/kg]	78	37	46	91	138
Ba [mg/kg]	279	231	281	271	346
Ca [mg/kg]	276,802	268,087	325,433	252,895	284,706
Cr [mg/kg]	95	63	105	102	110
Cu [mg/kg]	91	50	68	94	139
Fe [mg/kg]	20,668	17,604	25,478	20,923	21,784
Mn [mg/kg]	462	400	470	466	558
Pb [mg/kg]	71	40	52	51	107
Ti [mg/kg]	1,495	731	807	1,748	2,213
V [mg/kg]	135	129	186	124	125
Zn [mg/kg]	100	81	102	103	125
pH	9.44	9.26	10.25	9.25	9.25
CE [μ S/cm]	1,849	761	3,923	2,284	2,350

Tabla 37. Comparativa de valores de fondo de sedimentos obtenidos de todos los métodos en datos seleccionados (n=106).

De igual manera que con el análisis de suelo los métodos de TIF y M + 2 MAD parecen ser de los que se obtienen los mejores resultados para valores de fondo.

En una base de datos mayor TIF parece arrojar mejores resultados, aunque no es un buen método para determinar valores de fondo en pH o CE por lo que en el caso de estas dos propiedades fisicoquímicas será mejor solo utilizar su intervalo de valores.

5.2.3 - Rocas

Para el cálculo de valores de fondo de rocas, a diferencia de los suelos y sedimentos, estas no pueden ser influenciadas por la contaminación antropogénica, por lo que, todo el rango de valores obtenidos se debe a la variabilidad natural de la zona. La base de datos extendida de las muestras de roca se encuentra en los anexos (anexo 9).

Se agruparon por tipo de litología o mineralización, posteriormente se buscaron los valores máximos y mínimos en cada una de ellas, se determinó el resto de los parámetros estadísticos básicos y se agruparon en diferentes tablas (tablas 38 - 42). Además, se generaron diagramas de cajas y bigotes (sin cercas interiores), lo cual permite apreciar de manera visual las diferencias en las concentraciones.

En estos los bigotes representan el valor mínimo (bigote izquierdo) y máximo (bigote derecho) de la serie de datos, en algunos casos la caja no es apreciable, esto se debe a que el valor mínimo coincide con Q₁, Q₂ (mediana) y Q₃, pero el bigote derecho nos indicara su valor máximo, en cambio, cuando solo se aprecia una línea vertical, significa que todas las mediciones de la concentración de ese elemento están por debajo del LOD, así que se asigna esta línea simbólica

que representa la mitad del límite de detección del equipo para ese elemento, estos diagramas se encuentran en los anexos (anexo 10).

5.2.3.1 - Litologías

En las tablas de litología si todas las muestras presentaban concentraciones por debajo del LOD en un elemento, se le asignó <LOD para todas las columnas de este, por el contrario, si al menos una tenía la medición por encima del LOD, los valores por debajo del LOD eran remplazados por a mitad de este para realizar los cálculos de los parámetros estadísticos básicos.

Calizas grises

En esta litología podemos observar que todas las mediciones de Pb, Ti, y V, están por debajo del LOD. Además, concentraciones muy bajas de As, Cu, Fe y K. Por el contrario, elevadas concentraciones de Ca, algo muy común de las rocas carbonatadas. Las muestras de roca de esta litología son: FR-07, FR-08, R-10, R-11, R-21, R-22 y R-39 (tabla 38).

Calizas grises							
Elemento	LOD [mg/kg]	Rango [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	11	<LOD - 19	7	6	5	2	68
Ba	100	107 - 217	162	153	39	31	24
Ca	500	236,714 - 416,966	380,025	401,498	64,114	31,348	17
Cr	85	<LOD - 92	69	86	24	20	36
Cu	35	<LOD - 37	26	18	10	8	40
Fe	100	308 - 665	477	436	140	109	29
Mn	85	97 - 246	144	122	50	32	35
Pb	13	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Ti	160	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
V	70	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Zn	25	<LOD - 68	22	13	21	10	93
Propiedad fisicoquímica	LOD	Rango	Promedio	Mediana	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	9.66 - 9.96	9.77	9.74	0.11	0.08	1.11
CE [μS/cm]	-	41 - 67	50	48	9	6	18

Tabla 38. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de calizas grises (n=7).

Caliza-Lutita

En esta secuencia de alternancia de rocas podemos observar que todas las mediciones de As, Cr, y Pb, están por debajo del LOD, el contenido de Ca es menor que en las calizas grises y los de K y Fe aumentan. En algunas muestras que corresponden a las lutitas, la concentración de Ti es muy elevado, algo similar se refleja en la CE. Las muestras de esta secuencia litológica son: FR-13, R-01, R-04, R-17, R-28 y R-29 (tabla 39).

Caliza-Lutita							
Elemento	LOD [mg/kg]	Rango [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	11	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Ba	100	125 - 243	191	196	40	29	21
Ca	500	102,296 - 288,918	222,593	273,645	89,152	62,293	40
Cr	85	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Cu	35	<LOD - 65	36	36	18	13	49
Fe	100	3,948 - 13,760	8,080	7,414	3,983	3,182	49
Mn	85	178 - 486	269	210	119	73	44
Pb	13	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Ti	160	<LOD - 915	414	251	394	297	95
V	70	<LOD - 75	42	35	17	7	40
Zn	25	27 - 50	42	43	9	7	20
Propiedad físicoquímica	LOD	Rango	Promedio	Mediana	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	8.43 - 9.93	9.31	9.36	0.50	0.32	5
CE [μS/cm]	-	50 - 987	336	85	422	277	126

Tabla 39. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros físicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de caliza-lutita (n=6).

Conglomerado polimíctico

Esta litología al estar formada por clastos de todas las rocas que se encuentran en el cerro “El Fraile”, presentan una amplia variabilidad en sus concentraciones de la mayoría de sus elementos y en su CE, podemos destacar que a diferencia de las otras litologías esta presenta un contenido de As moderadamente alto, lo cual seguramente se debe a que contiene clastos de la zona mineralizada. Las muestras de roca de esta litológica son: R-13, R-15, R-18, R-20, R-23, R-27 y R-40 (tabla 40).

Lutita-Arenisca

De esta litología solo se tiene una muestra por lo que solo se expondrán los resultados obtenidos de ella, en esta muestra se integraron ambas rocas, para ser lo más representativa posible. Para observar de manera gráfica estas concentraciones se usó una gráfica de barras la cual se encuentra en los anexos (anexo 10). La muestra es la FR-03 (tabla 41).

5.2.3.2 - Mineralización

Se tomaron muestras de la mineralización de la zona del skarn y de las vetas, cuyas asociaciones son Cu-Au y Pb-Zn-Ag respectivamente, la R-02 corresponde a la mineralización del skarn, por otro lado, la R-06 se asocia a la mineralización de las vetas. Sus concentraciones se agruparon en una tabla para compararlas (tabla 42) y se representaron mediante grafico de barras en los anexos (anexo 10).

Conglomerado polimíctico							
Elemento	LOD [mg/kg]	Rango [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	11	<LOD - 181	68	69	62	46	92
Ba	100	<LOD - 228	177	196	59	33	33
Ca	500	252,626 - 361,602	295,451	282,316	37,081	26,064	13
Cr	85	<LOD - 103	66	43	30	24	45
Cu	35	<LOD - 440	117	71	148	84	126
Fe	100	753 - 5,107	2,939	2,690	1,659	1,300	56
Mn	85	<LOD - 217	140	143	55	38	39
Pb	13	<LOD - 42	13	7	13	10	104
Ti	160	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
V	70	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Zn	25	<LOD - 115	46	42	35	24	76
Propiedad fisicoquímica	LOD	Rango	Promedio	Mediana	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	8.98 - 9.43	9.19	9.14	0.18	0.13	2
CE [µS/cm]	-	57 - 825	213	79	280	142	131

Tabla 40. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de conglomerados polimícticos (n=7).

Lutita-Arenisca							
Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
FR-03	16	355	113,579	101	69	14,311	9.37
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [µS/cm]	
FR-03	411	22	1,335	89	176	59	

Tabla 41. Tabla de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de la muestra de Lutita-Arenisca (n=1).

Mineralización							
Analito	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	pH
Skarn	971	411	93,273	120	22,885	41,925	8.86
Veta	1,675	693	334,797	93	186	29,987	8.95
Analito	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	CE [µS/cm]	
Skarn	449	7	1,106	98	691	187	
Veta	11,292	996	80	35	3,664	97	

Tabla 42. Tabla de parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de la zona mineralizada (n=2).

6. - Área de influencia

6.1 - Metodología

Para la caracterización del área de influencia se diseñó un plan de muestreo y análisis de muestras suelo, las cuales fueron distribuidas de manera sistemática en toda el área. Una vez obtenidos los datos se utilizó estadística básica (promedio, mediana, desviación estándar (SDEV), desviación absoluta con respecto a la mediana (MAD), máximos, mínimos y coeficiente de variación (CV)) y diagramas ternarios para observar su comportamiento con respecto a las fuentes de contaminación.

6.1.1 - Muestreo

El muestreo del área de influencia consistió en la toma de cincuenta (50) muestras superficiales simples (figura 70), de aproximadamente 1 [kg] cada una, tomadas con una cuchara (pala) de acero inoxidable para evitar su contaminación.

La relación de muestras de la caracterización del área de influencia, su ubicación en coordenadas UTM, una breve descripción y una pequeña memoria fotográfica se encuentran en los anexos (anexo 11), estos puntos se seleccionaron considerando una distribución sistemática que abarcara toda la extensión del área de influencia, asegurando de esta manera la mayor representatividad posible.

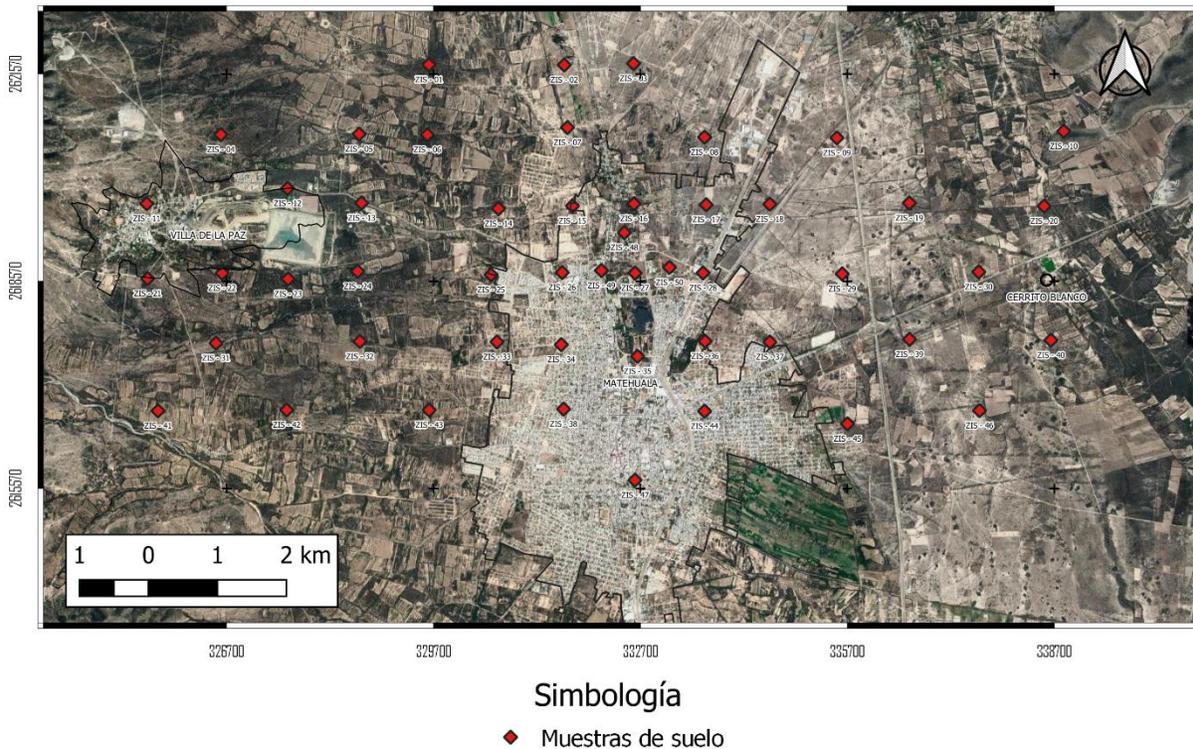


Figura 70. Mapa de ubicación geográfica de las muestras de suelo para la caracterización la zona de influencia.

6.1.2 - Preparación de muestras

Las muestras de suelo de la zona de influencia obtenidas fueron cuarteadas, tamizadas a un tamaño de partícula <2 [mm] (malla 10) y envasadas en bolsas de polietileno para los análisis de pH y CE. Para realizar los análisis de la concentración de elementos totales por FRX, las muestras fueron cuarteadas hasta un tamaño de 50[g], y pulverizadas en un molino pulverizador de anillos concéntricos marca Herzog con recipiente de carburo de tungsteno, finalmente se procedió a un nuevo tamizado de un tamaño de partícula de 250 [μm] (malla 60).

6.2 - Resultados

La lista completa de análisis de pH, CE y concentraciones totales de elementos de las muestras de suelo de la zona de influencia se encuentra en los anexos (anexo 12). Los resultados obtenidos de las muestras arrojaron valores que se encuentran por debajo del límite de detección (LOD) del equipo, por lo que, para el uso estadístico de los datos estos fueron reemplazados por la mitad del valor del límite de detección del equipo. Para realizar los análisis geoestadísticos de las muestras, se utilizó el software Excel y PAST.

Con los datos, se procedió al cálculo de los parámetros estadísticos básicos que fueron compilados en una tabla (tabla 43) en la cual se destacan las concentraciones y coeficientes de variación del As, Pb y Zn los cuales están por encima del 150 [%], lo cual en primera instancia puede deberse a que estos elementos son los que presentan mayor variabilidad en las distintas fuentes de contaminación.

Las muestras fueron graficadas en un diagrama ternario (figura 71) de As, Pb, Zn para observar su comportamiento y posteriormente se añadieron las distintas fuentes de contaminación (figura 72) para apreciar su comportamiento con respecto a estos.

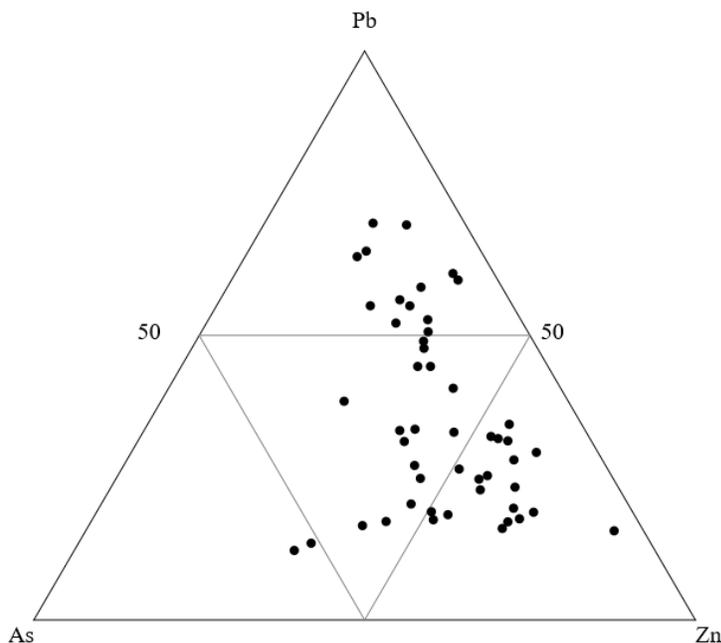
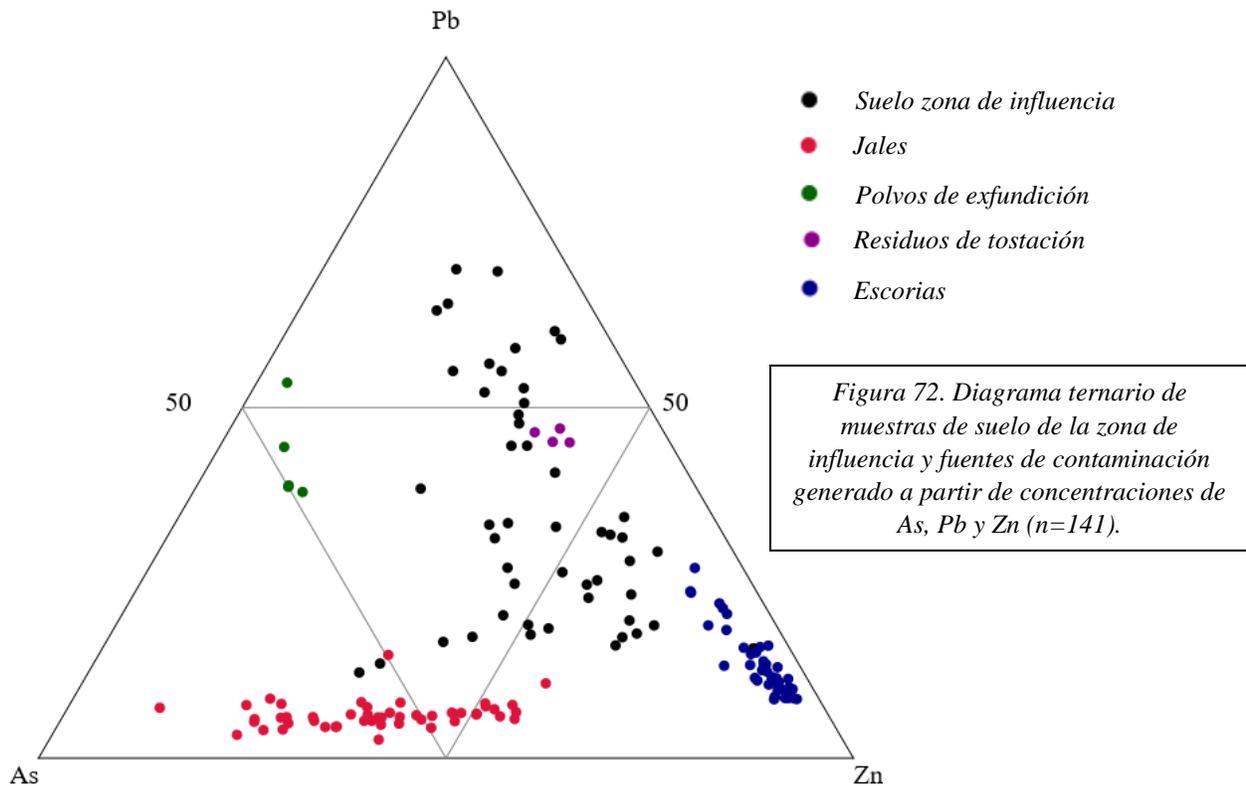


Figura 71. Diagrama ternario de muestras de suelo de la zona de influencia generado a partir de concentraciones de As, Pb y Zn (n=50).

Elemento	LOD [mg/kg]	Rango [mg/kg]	Promedio [mg/kg]	Mediana [mg/kg]	SDEV [mg/kg]	MAD [mg/kg]	CV [%]
As	11	< LOD - 3,289	307	88	628	336	204
Ba	100	< LOD - 2,662	364	311	372	170	102
Ca	500	91,580 - 423,068	191,008	189,934	53,492	37,759	28
Cr	85	< LOD - 99	44	43	8	2	18
Cu	35	< LOD - 1,962	249	148	328	196	131
Fe	100	209 - 101,753	16,258	14,351	15,311	8,261	94
Mn	85	< LOD - 4,488	600	418	694	386	116
Pb	13	< LOD - 16,557	633	150	2,331	766	368
Ti	160	< LOD - 2,198	1,182	1,392	595	486	50
V	70	< LOD - 99	55	35	24	23	44
Zn	25	< LOD - 3,892	477	243	720	429	151
Propiedad fisicoquímica	LOD	Rango	Promedio	Mediana	SDEV	MAD	CV [%]
pH	-	7.01 - 9.12	7.83	7.85	0.45	0.36	6
CE [μS/cm]	-	62.8 - 2,450	950	374	908	867	96

Tabla 43. Tabla de parámetros estadísticos básicos de los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos de las muestras de la zona de influencia (n=50).



En el diagrama podemos observar que la mayoría de las muestras pertenecientes al área de influencia se encuentran ubicadas en una zona intermedia entre los jales, escorias y residuos de tostación, lo cual también corresponde con su ubicación geográfica. Además, existen algunas que tienen una mayor cantidad de Pb y en el diagrama ternario se encuentran por encima de los residuos de tostación, estas muestras generalmente se encuentran asociadas a los suelos generados por yeso.

En lo concerniente al As su concentración promedio en la zona de influencia es 307 [mg/kg], sus concentraciones van desde < LOD hasta 3,289 [mg/kg] que representa casi 11 veces la concentración promedio. Sin embargo, si comparamos esta concentración con la concentración de referencia de NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (22 [mg/kg]) o la de valor de fondo (TIF – 47 [mg/kg]), esta representará 164 veces o 70 veces la concentración de referencia respectivamente. En las siguientes figuras (figura 73, 74 y 75) podemos apreciar el comportamiento de las concentraciones con respecto al promedio, la NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004 y el valor de fondo de TIF.

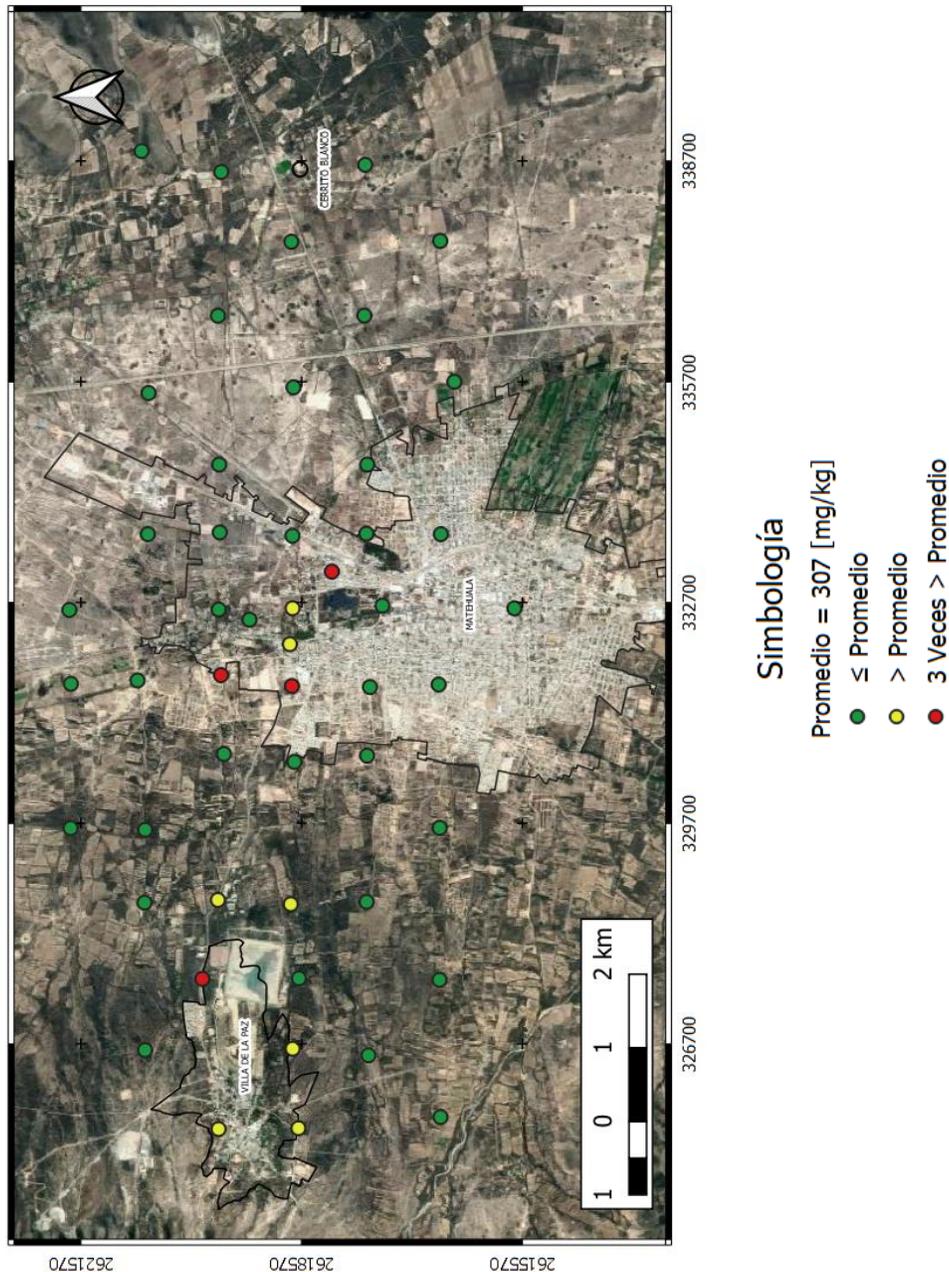


Figura 73. Mapa de concentración de As en suelos de la zona de influencia con respecto al promedio

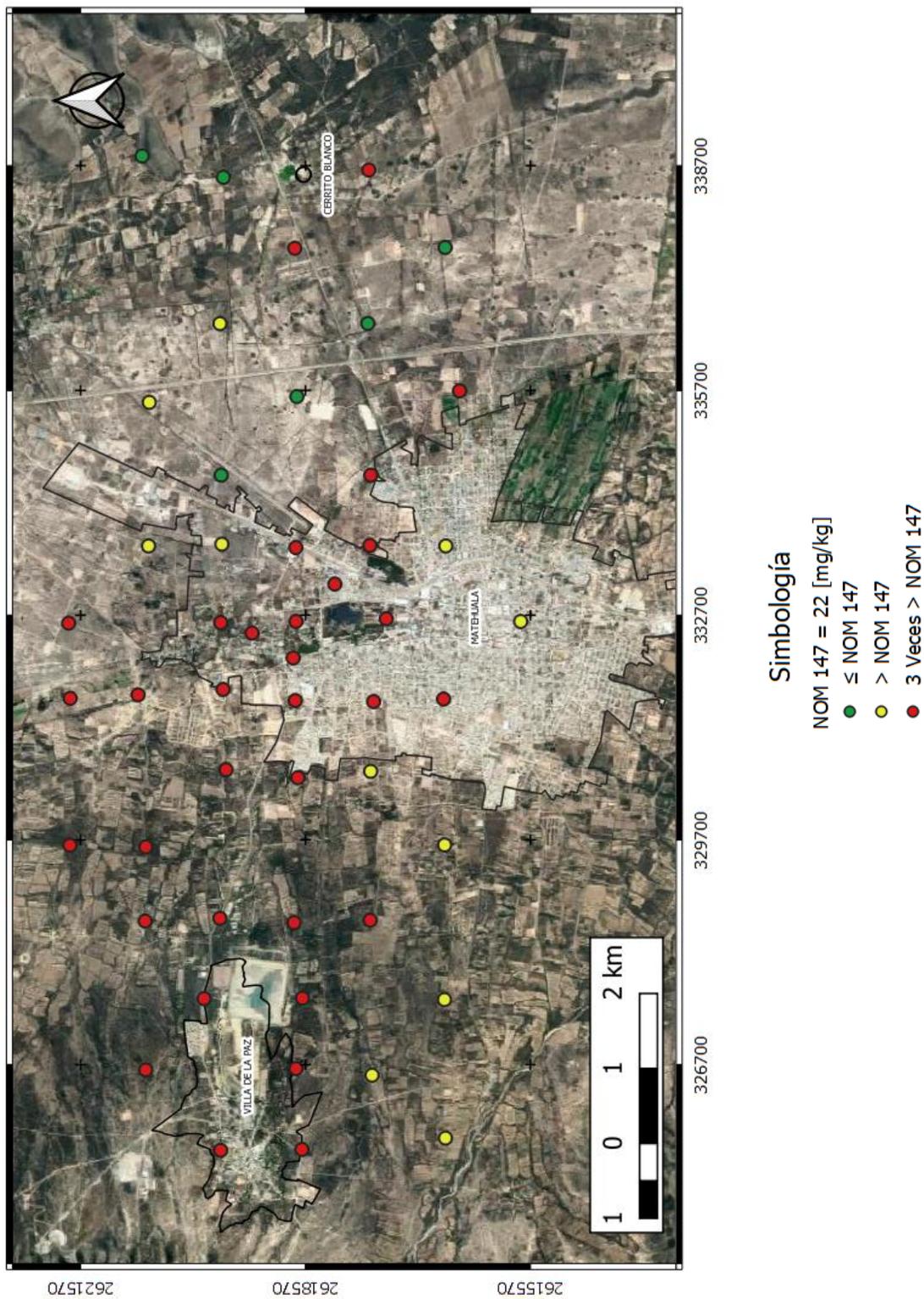
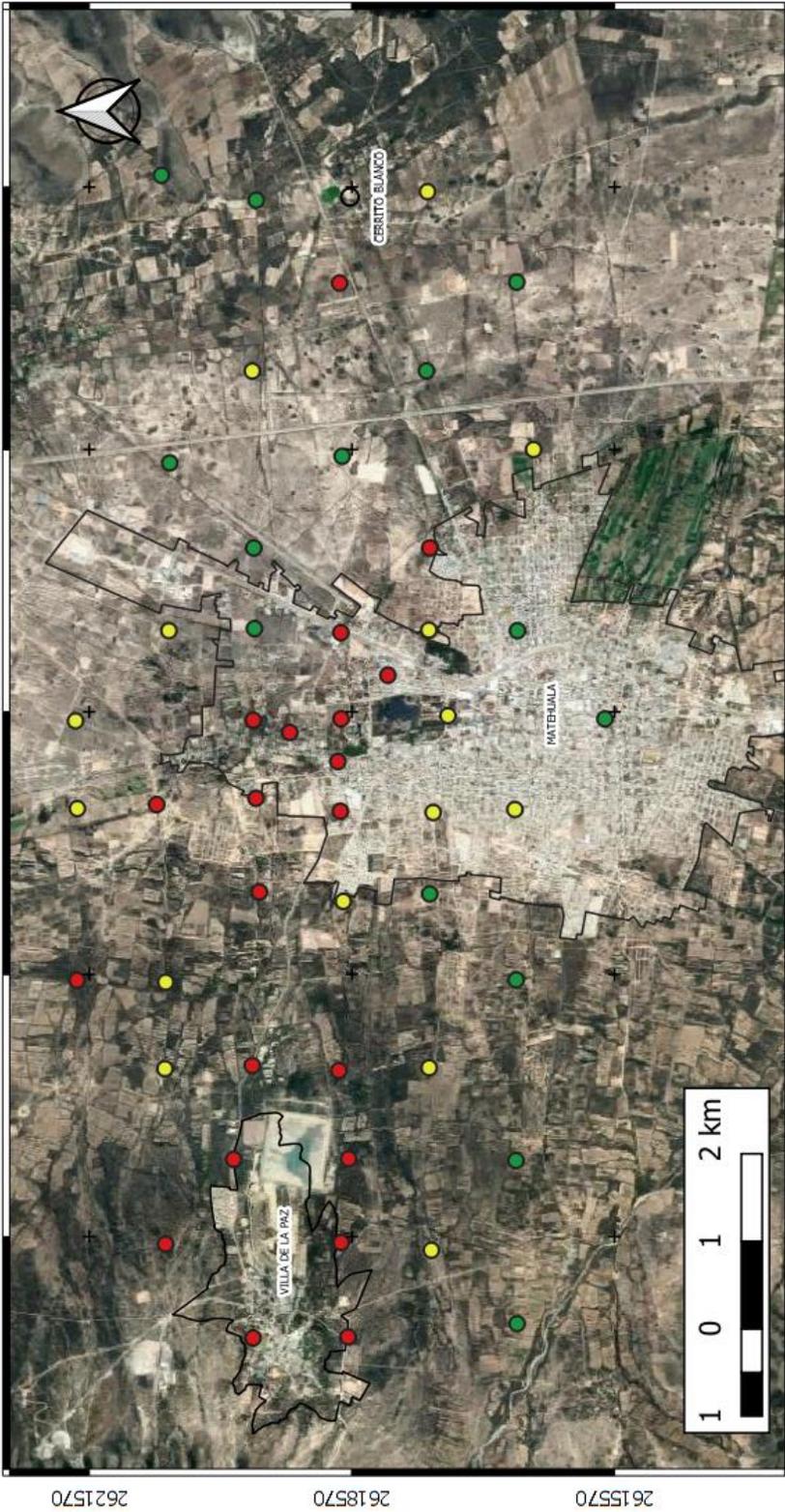


Figura 74. Mapa de concentración de As en suelos de la zona de influencia con respecto a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004



Simbología

Valor de Fondo (TIF) = 47 [mg/kg]

● ≤ VF

● > VF

● 3 Veces > VF

Figura 75. Mapa de concentración de As en suelos de la zona de influencia con respecto al valor de fondo (TIF)

En lo referente al Pb su concentración promedio en la zona de influencia es 633 [mg/kg], sus concentraciones van desde < LOD hasta 16,557 [mg/kg] que representa 26 veces la concentración promedio. Si comparamos esta concentración con la concentración de referencia de NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (400 [mg/kg]) o la de valor de fondo (TIF – 59 [mg/kg]), esta representará 41 veces o 280 veces la concentración de referencia respectivamente. En las siguientes figuras (figura 76, 77 y 78) podemos apreciar el comportamiento de las concentraciones con respecto al promedio, la NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004 y el valor de fondo de TIF.

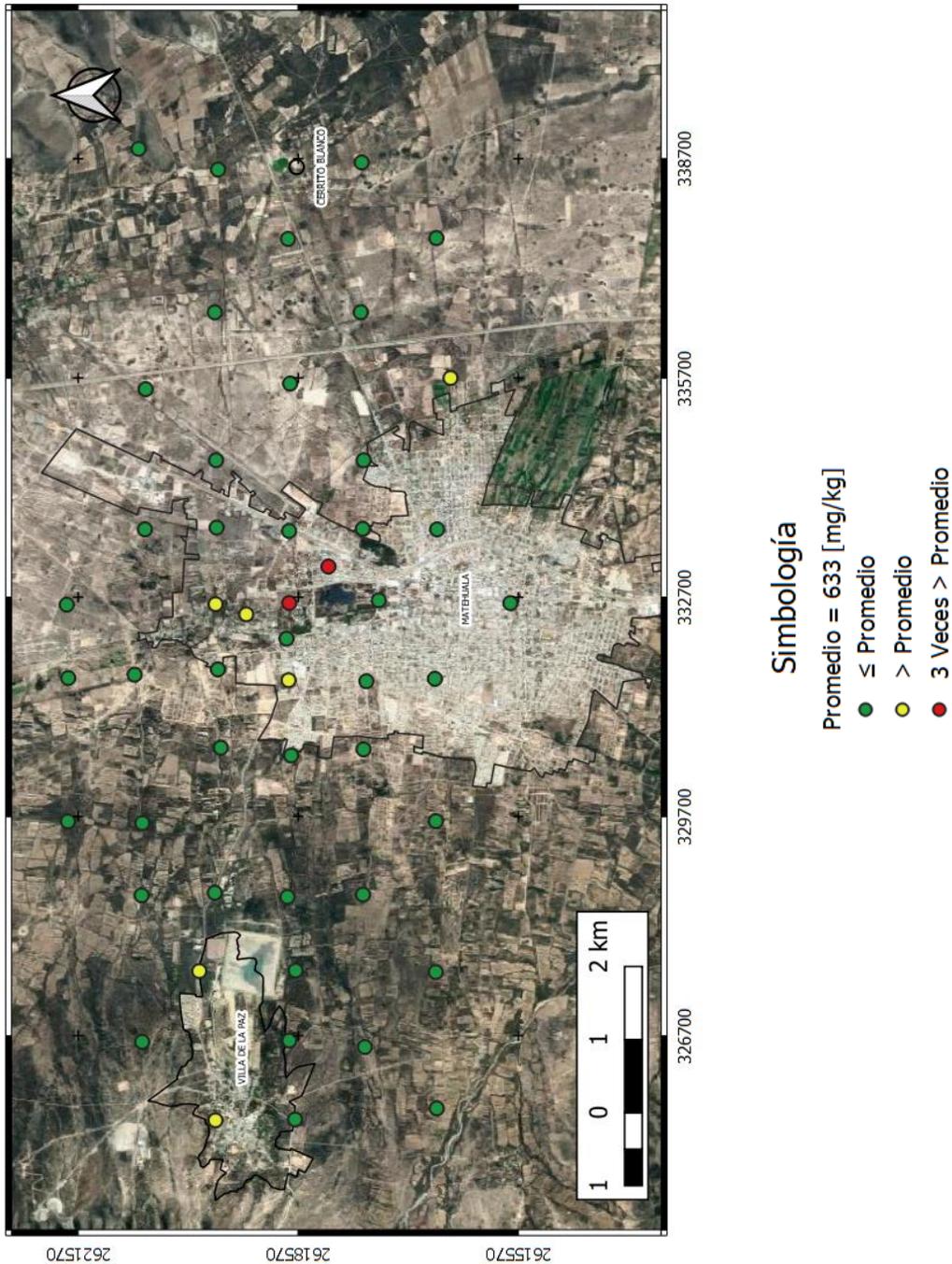


Figura 76. Mapa de concentración de Pb en suelos de la zona de influencia con respecto al promedio

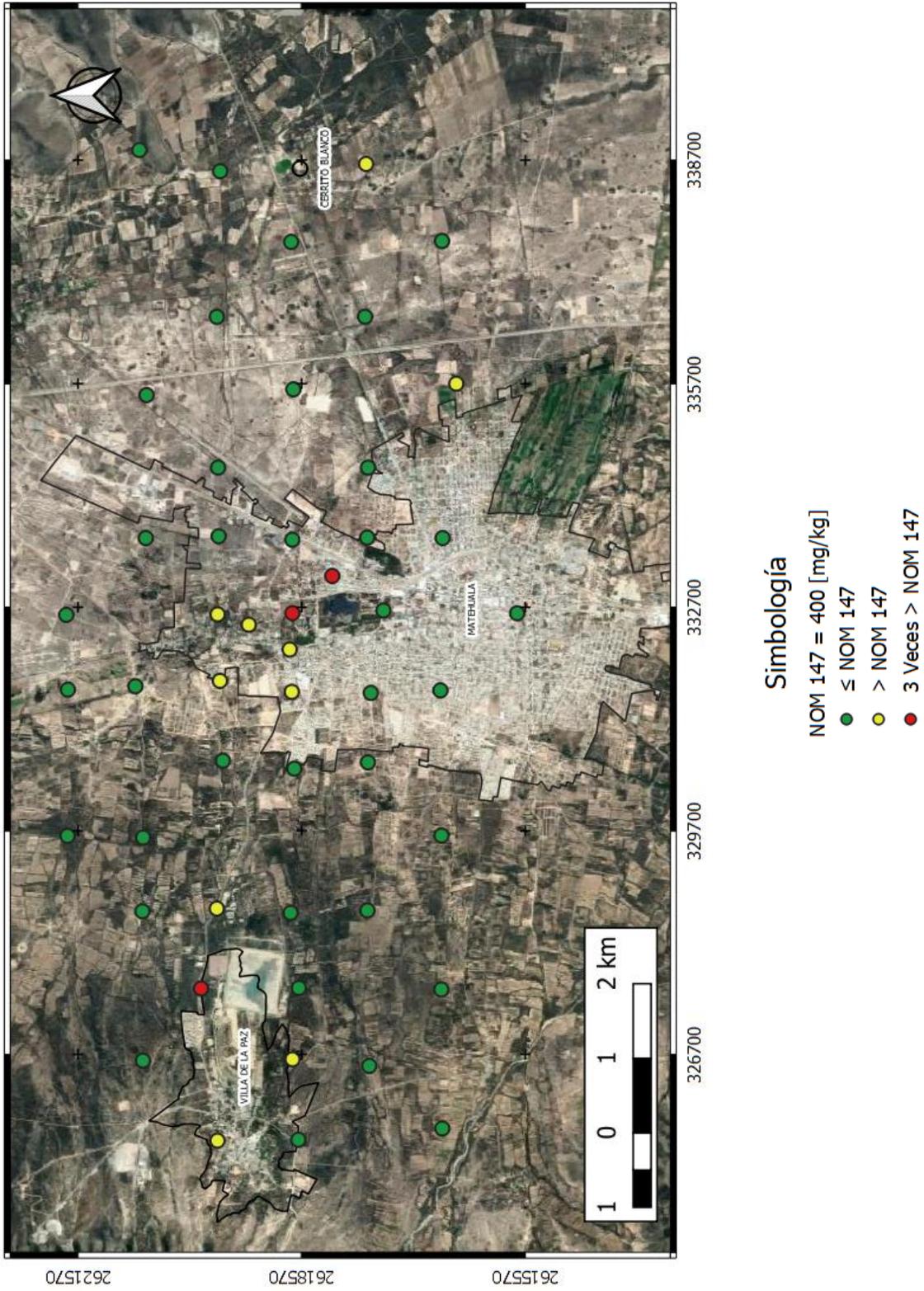


Figura 77. Mapa de concentración de Pb en suelos de la zona de influencia con respecto a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

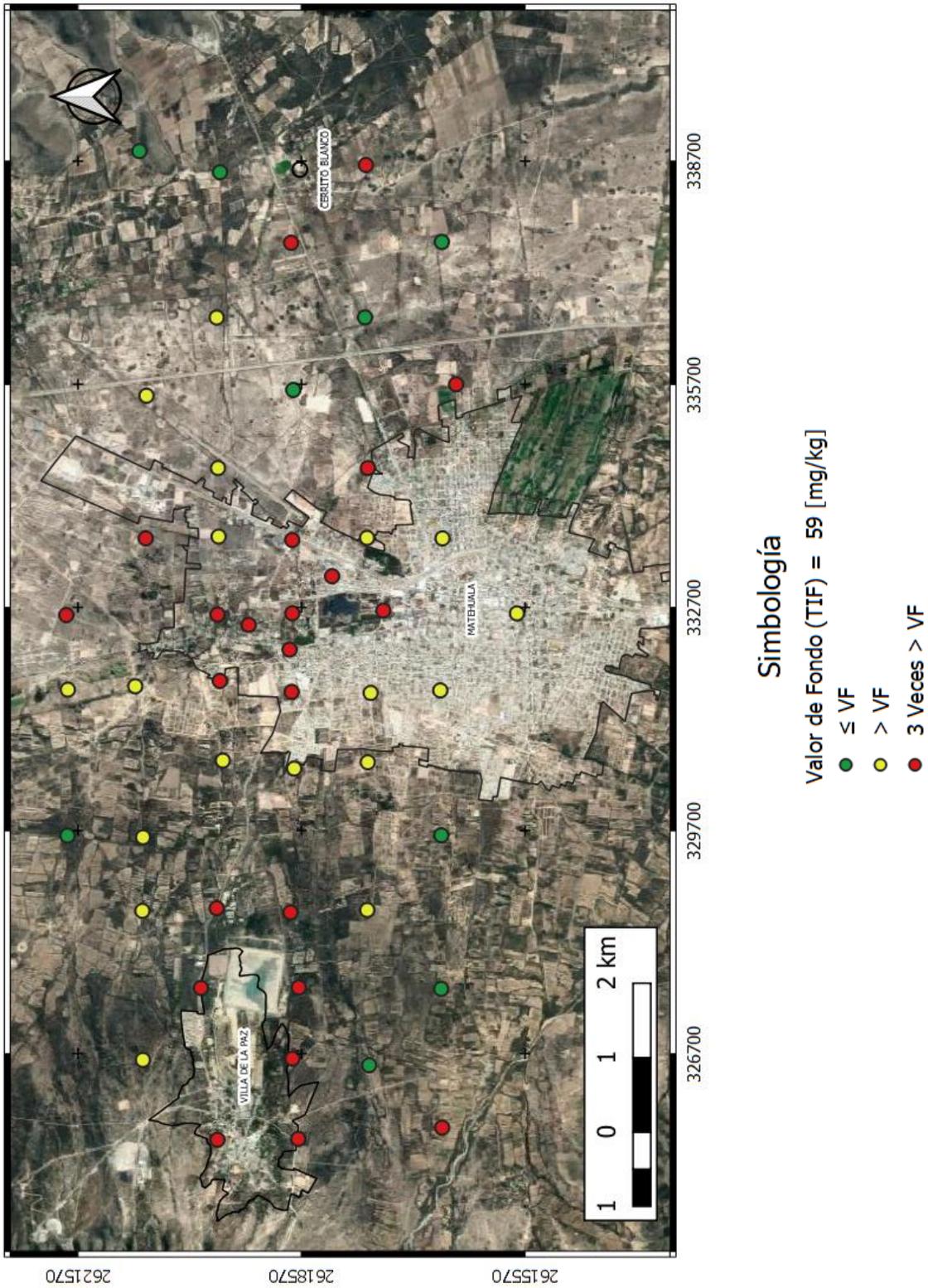


Figura 78. Mapa de concentración de Pb en suelos de la zona de influencia con respecto al valor de fondo (TIF)

Finalmente, en lo referente al Zn su concentración promedio en la zona de influencia es 477 [mg/kg], sus concentraciones van desde < LOD hasta 3,892 [mg/kg] que representa 8 veces la concentración promedio. La NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 no cuenta con un valor de referencia de Zn, comparado con el valor de fondo (TIF – 147 [mg/kg]), el valor máximo representará 26 veces la concentración de este. En las siguientes figuras (figura 79, 80) podemos apreciar el comportamiento de las concentraciones con respecto al promedio y al valor de fondo de TIF.

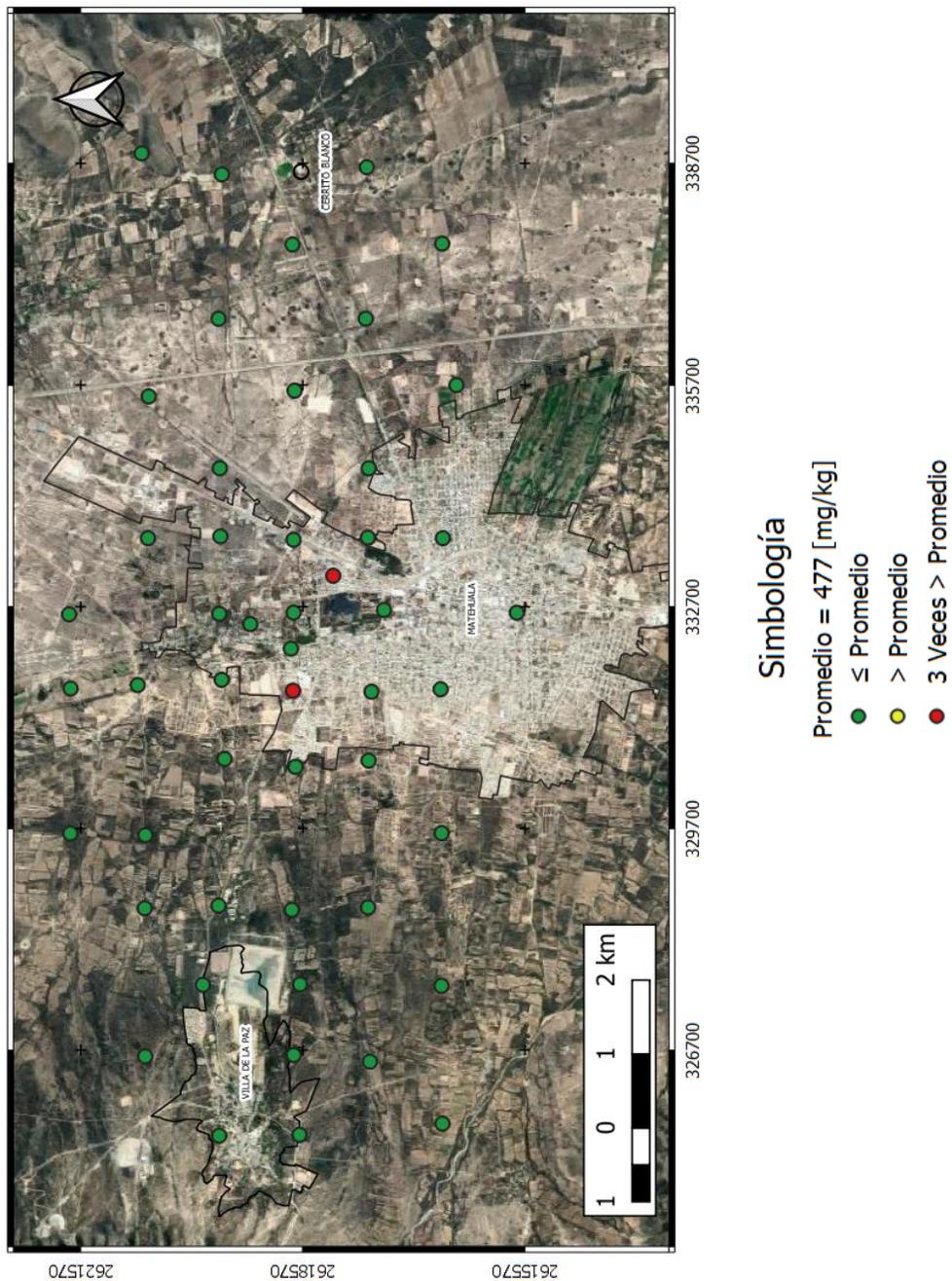


Figura 79. Mapa de concentración de Zn en suelos de la zona de influencia con respecto al promedio

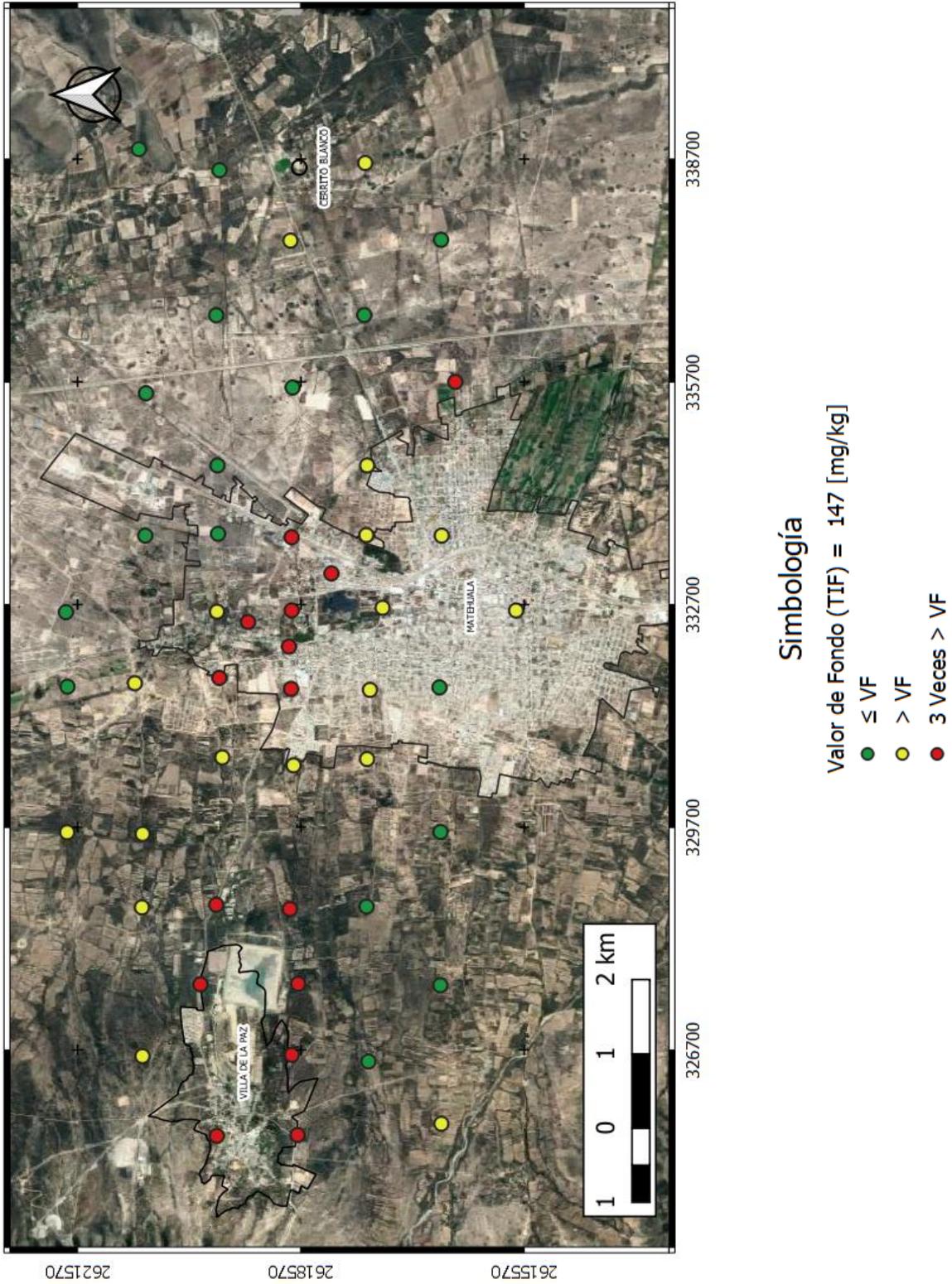


Figura 80. Mapa de concentración de Zn en suelos de la zona de influencia con respecto al valor de fondo (TIF)

6.3 - Evaluación de la contaminación antropogénica

Se realizó la valoración de la contaminación antropogénica mediante la aplicación de distintos indicadores de contaminación (índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento) a los suelos muestreados para valores de fondo y zona de influencia, estos indicadores se calcularon a partir de los valores para uso de suelo residencial de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, valores de fondo de los métodos TIF, M + 2 MAD, y concentraciones promedio de elementos en suelos de la corteza terrestre de Alekseenko & Alekseenko (2014).

La NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 se evaluó ya que es la normatividad aplicable en México, por otro lado, TIF fue seleccionado debido a que tiene un buen ajuste en la mayoría de los elementos y nos permite determinar valores atípicos, M + 2 MAD se empleó ya que es el método más conservador de todos los que permiten el cálculo de valores de fondo y los valores Alekseenko & Alekseenko (2014), debido a que presentan un promedio de la abundancia global de los elementos en el suelo de la corteza terrestre. Se evaluó el As y Pb, ya que, de los elementos de interés, son los únicos normados por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

6.3.1 - Índice de geoacumulación

Los resultados del índice de geoacumulación se compilaron en una tabla que se encuentra en los anexos (anexo 13), además, se generaron mapas de verificación para observar la distribución espacial de estos y los cambios en que se presentan al utilizar cada valor de referencia con respecto a los demás (figuras 81 - 88).

Podemos apreciar en el caso del As que si se utiliza la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 como el valor para el cálculo del índice de geoacumulación, los suelos entre Villa de la Paz y la zona norte de Matehuala tienen índices de 1 a 6 y la afectación se extiende hasta la zona N/NE de Villa de la Paz donde se encuentran los terreros. Al calcular el I_{geo} con TIF disminuye los rangos en la zona de Matehuala y limita la mayor afectación a las zonas de presas de jales de Villa de la Paz, los terreros y la zona de escorias de Matehuala, con M + 2 MAD se tiene una afectación similar a la mostrada por TIF, sin embargo, los rangos suben en una unidad. Finalmente, al usar los valores de Alekseenko & Alekseenko para el cálculo del I_{geo} prácticamente toda el área de estudio se encuentra afectada con valores de 6-3 en la zona de Villa de la Paz - Matehuala.

Para el Pb la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 tiene un valor de referencia bastante alto, por lo que al calcular el I_{geo} tenemos una afectación prácticamente nula, con valor de 2 en la zona mineralizada y 1 a 5 cerca de las escorias. TIF y M + 2 MAD tiene un valor similar por lo que presentan un valor de 5 en el área mineralizada, rangos de 6-1 y 6-2 respectivamente en la zona de las escorias y de 4-1 y 5-2 en la zona de presas de jales de Villa de la Paz. Posteriormente, al igual que con el As al calcular el I_{geo} con valores de Alekseenko & Alekseenko casi toda el área de estudio se encuentra afectada, con presencia de valores de 6-2 en la zona de Villa de la Paz - Matehuala.

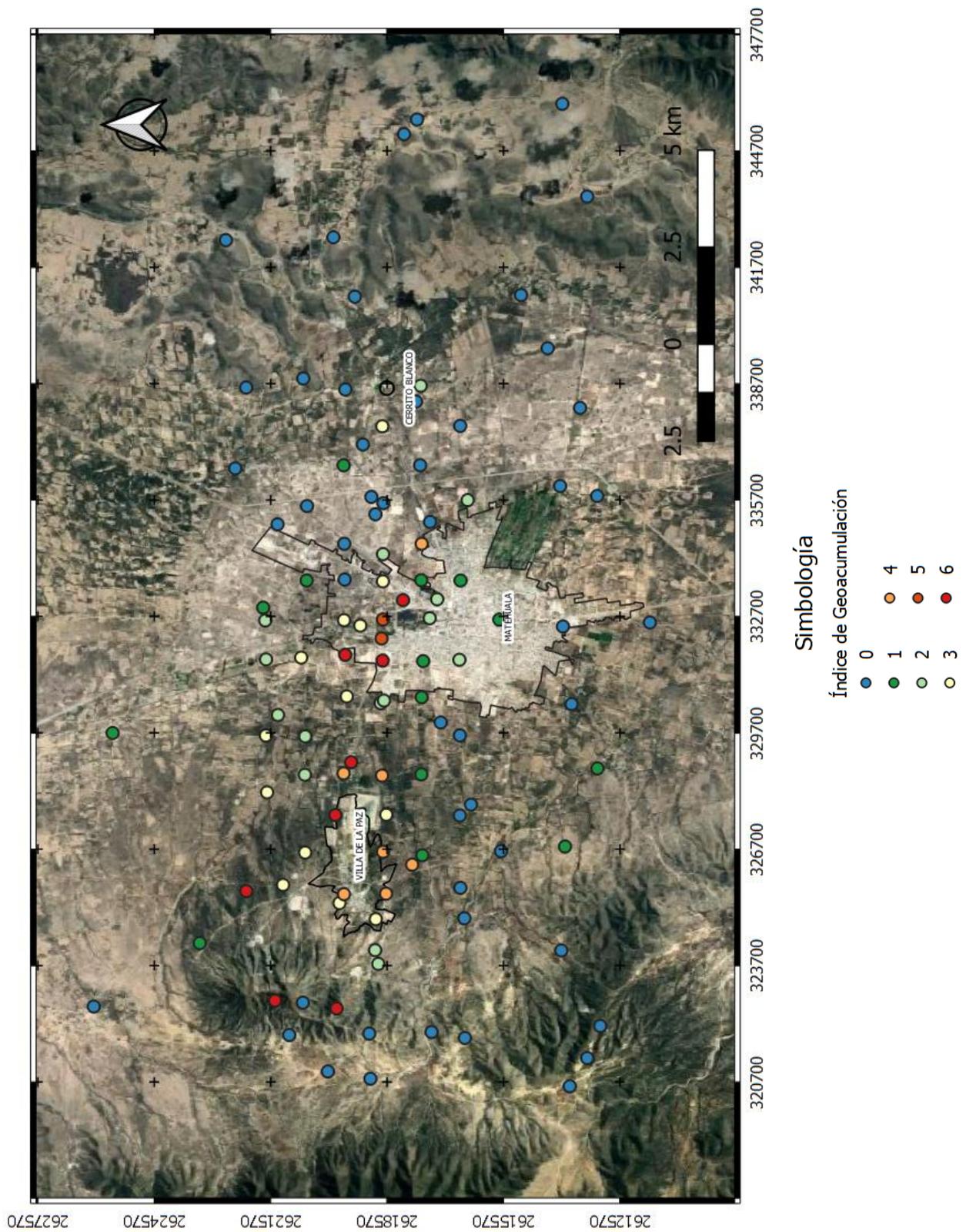


Figura 81. Mapa de índice de geoacumulación de As en suelos a partir de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

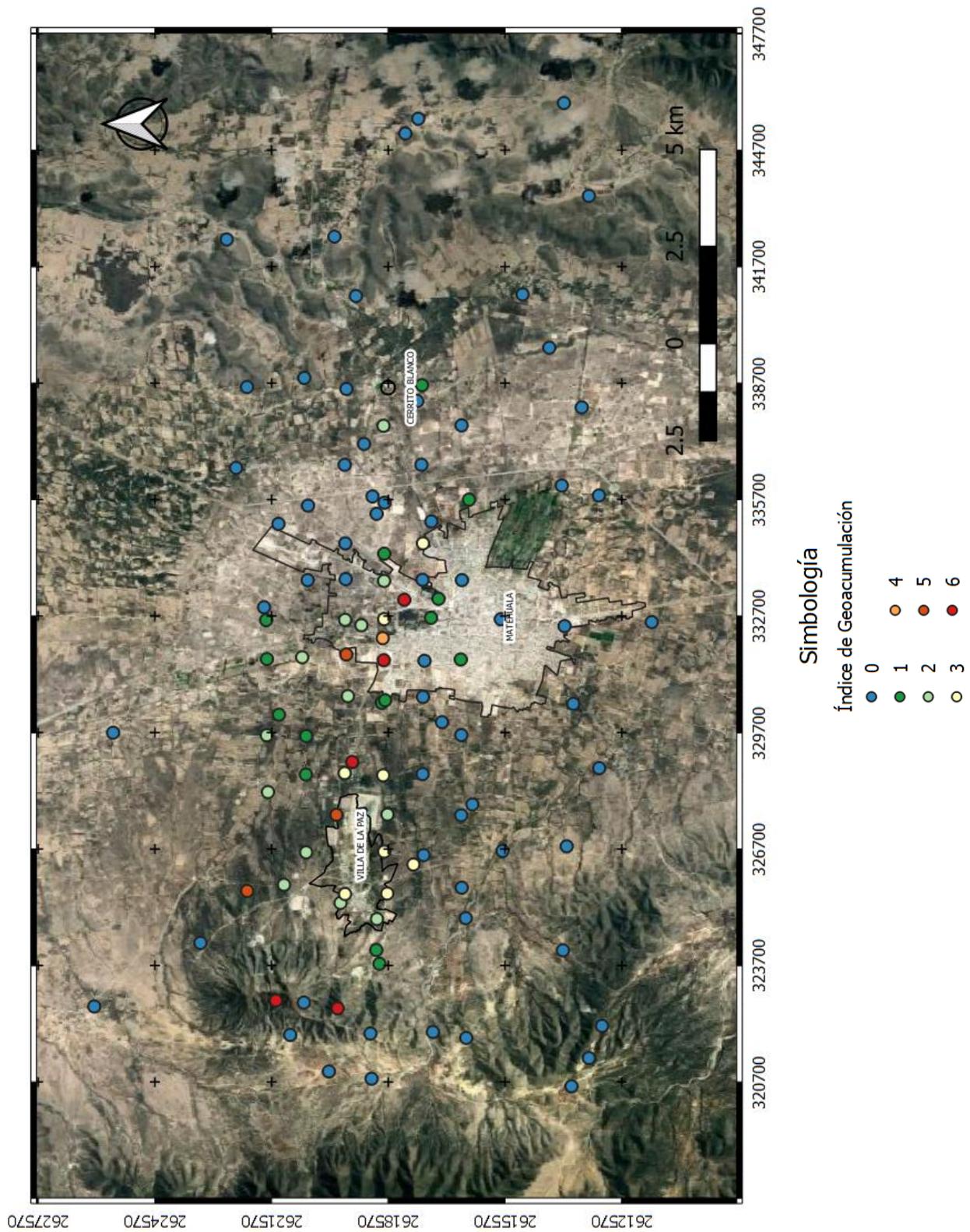


Figura 82. Mapa de índice de geoacumulación de As en suelos a partir del valor de fondo de TIF de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

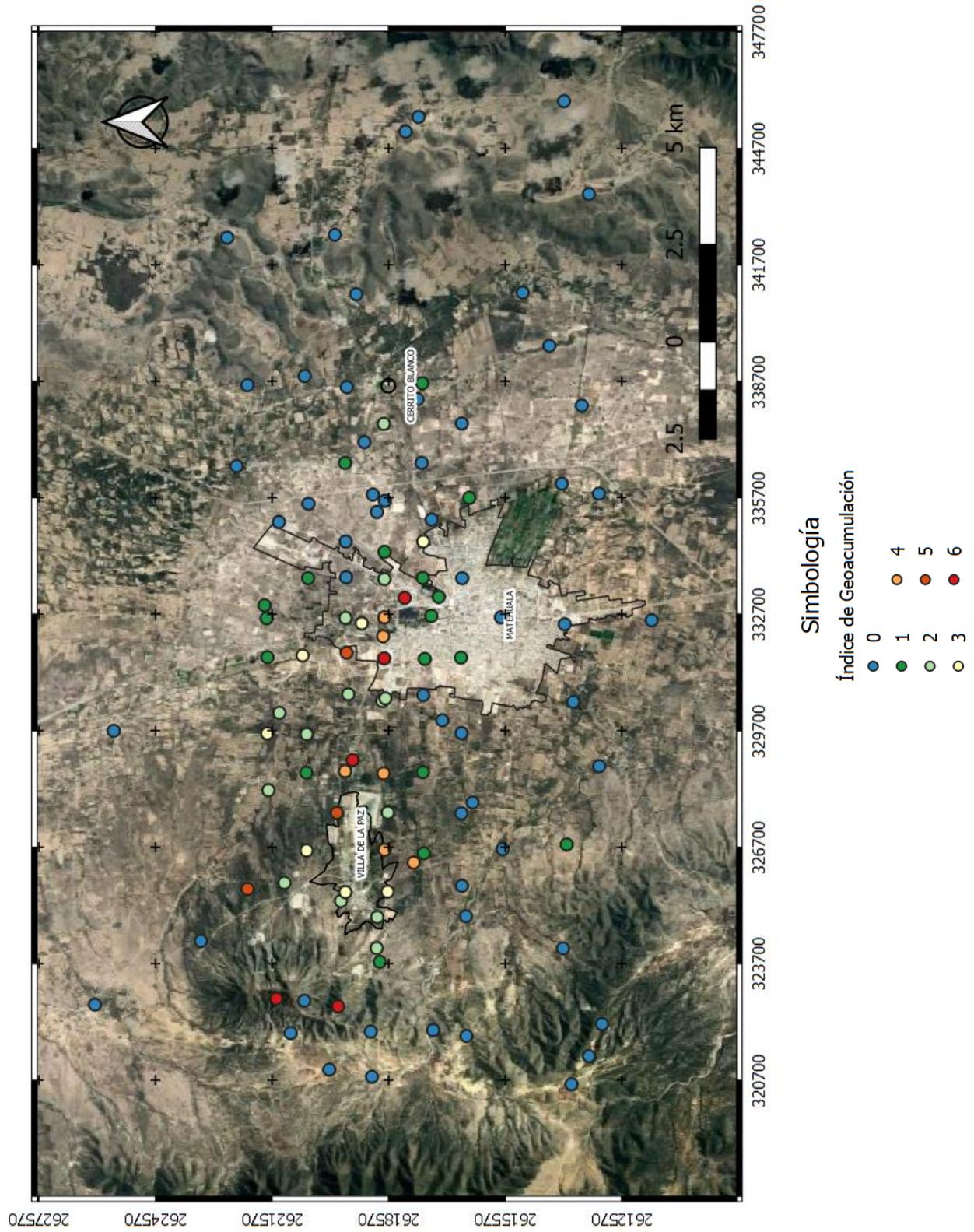


Figura 83. Mapa de índice de geoacumulación de As en suelos a partir del valor de fondo de $M + 2 MAD$ de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

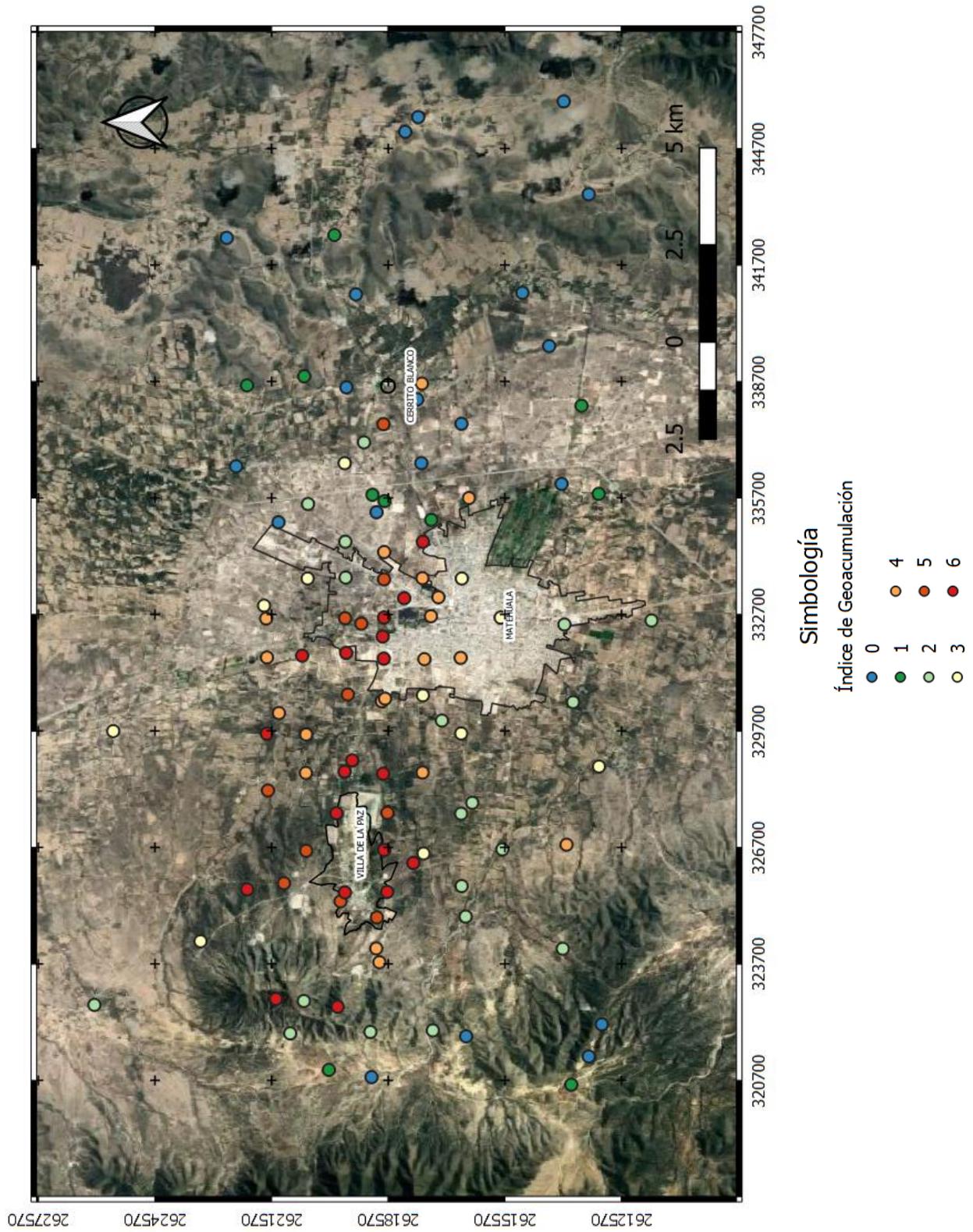


Figura 84. Mapa de índice de geoacumulación de As en suelos a partir del valor promedio de elementos en suelos de Alekseenko & Alekseenko (2014) de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

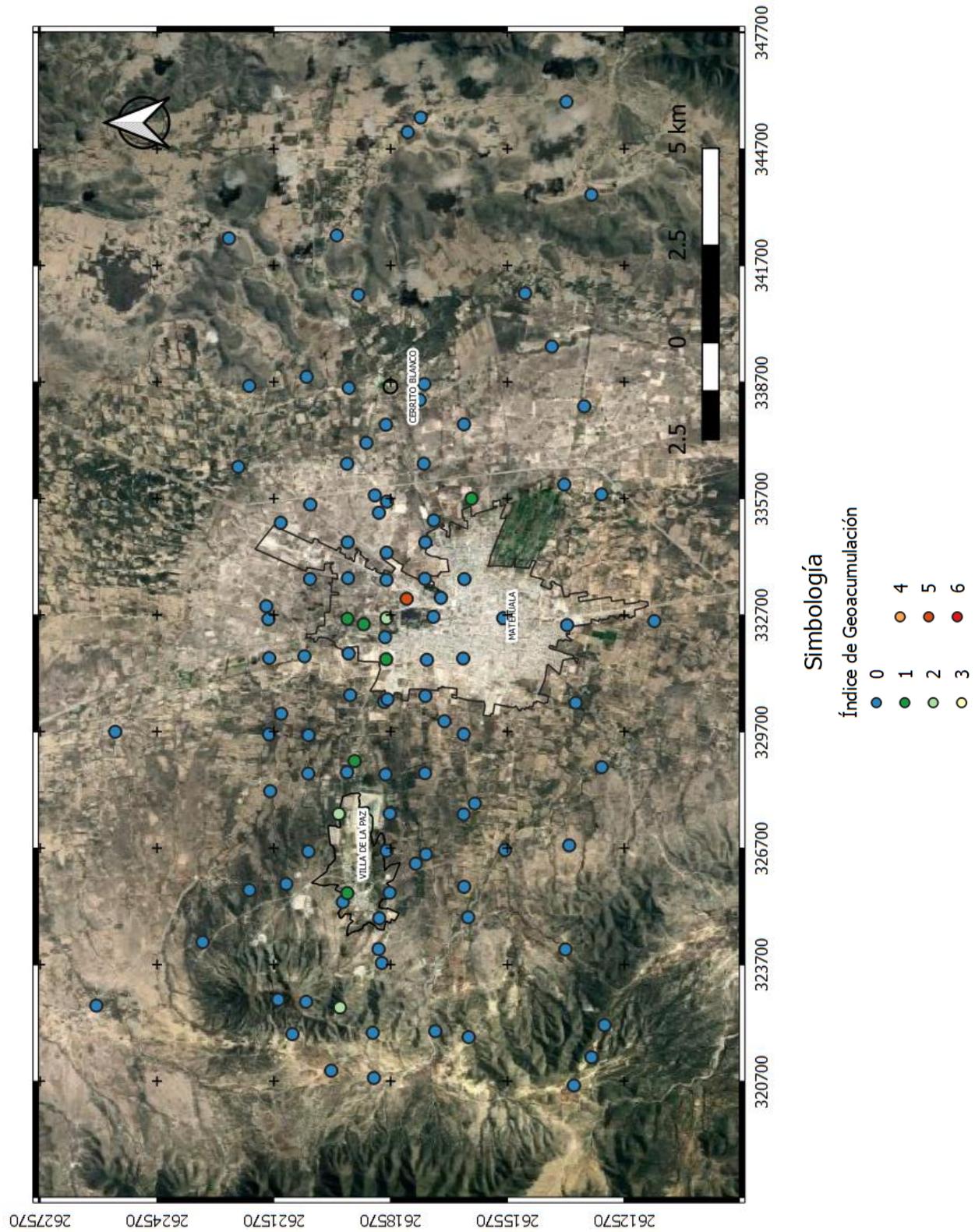


Figura 85. Mapa de índice de geoacumulación de Pb en suelos a partir de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

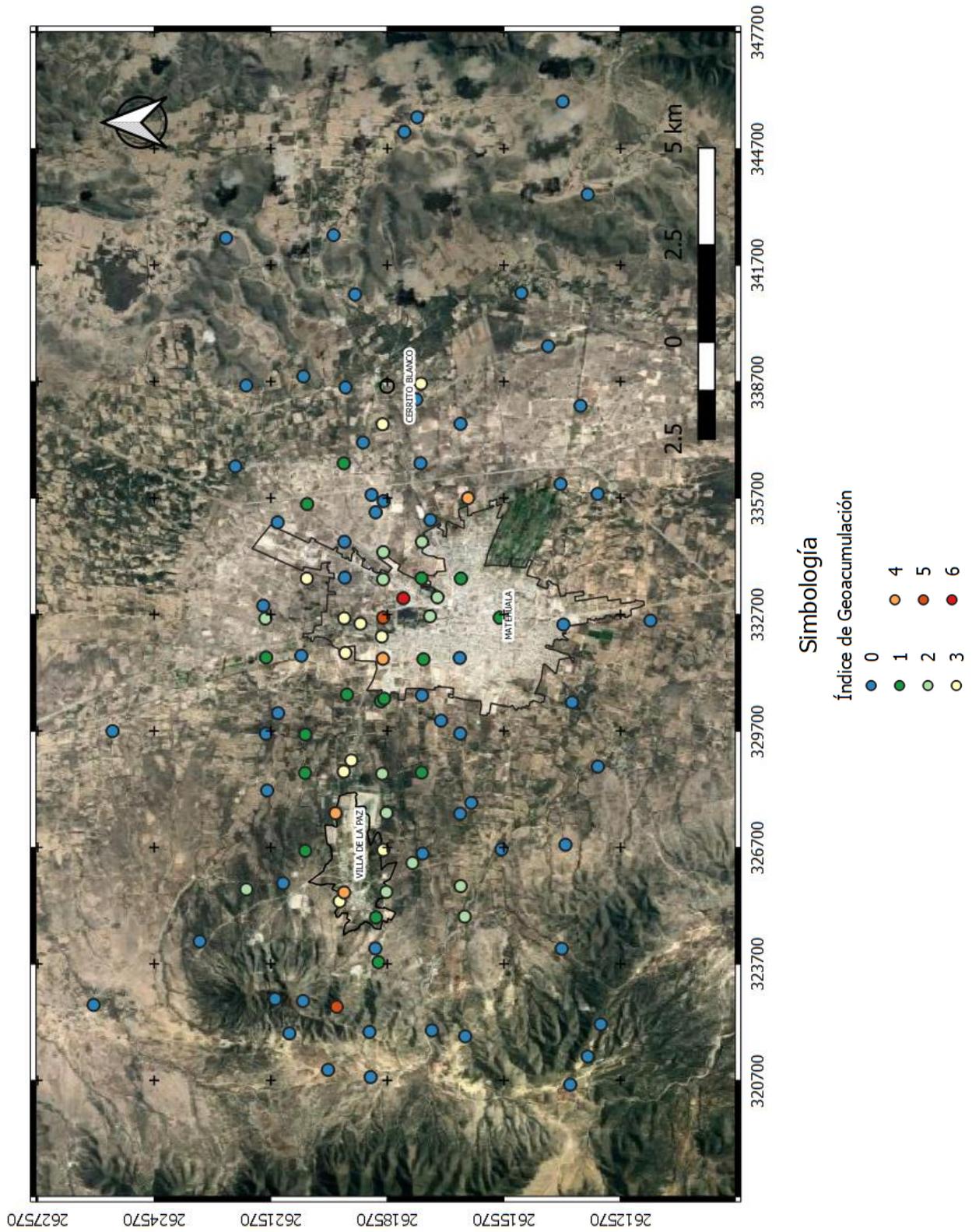


Figura 86. Mapa de índice de geoacumulación de Pb en suelos a partir del valor de fondo de TIF de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

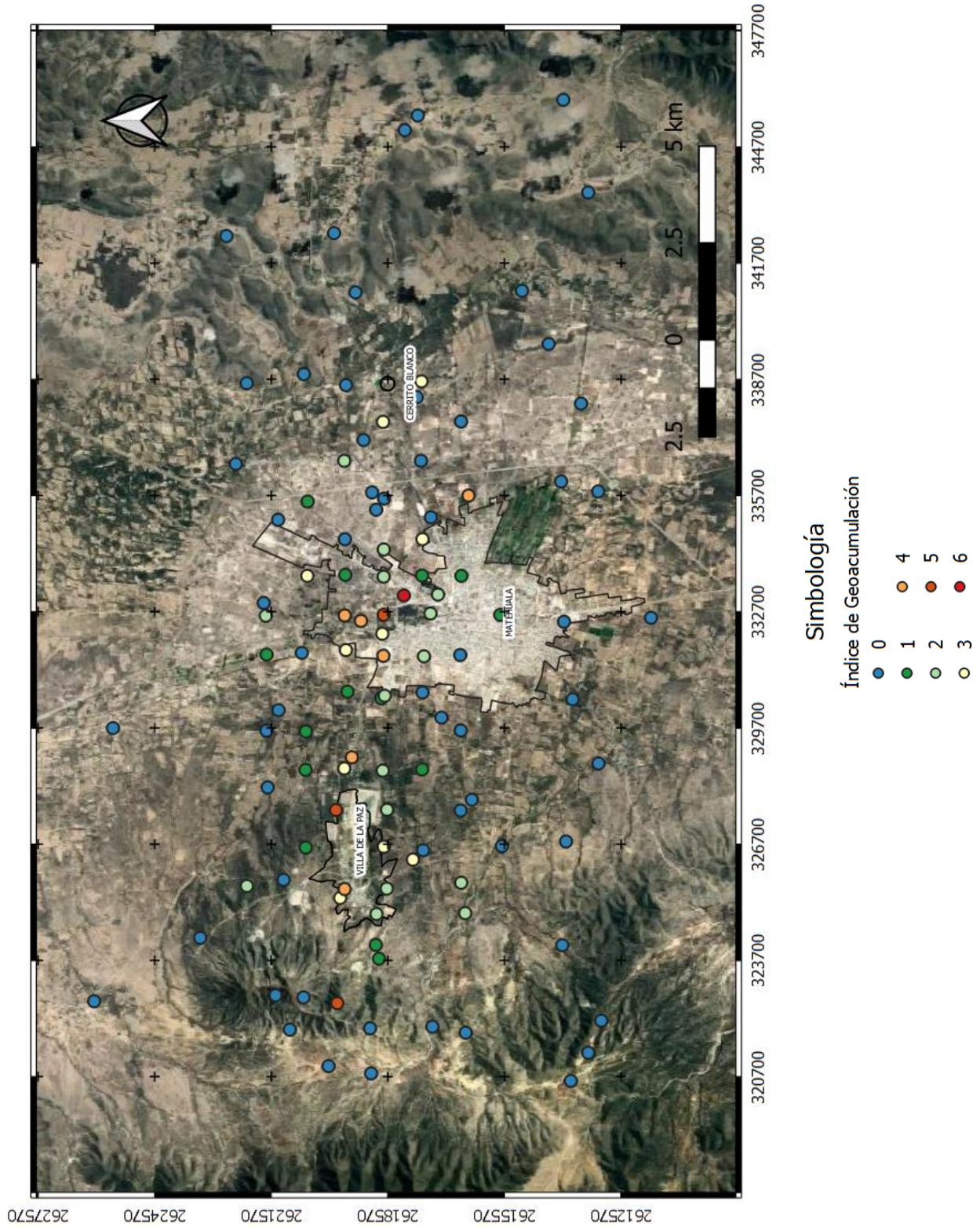


Figura 87. Mapa de índice de geoacumulación de Pb en suelos a partir del valor de fondo de $M + 2 MAD$ de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

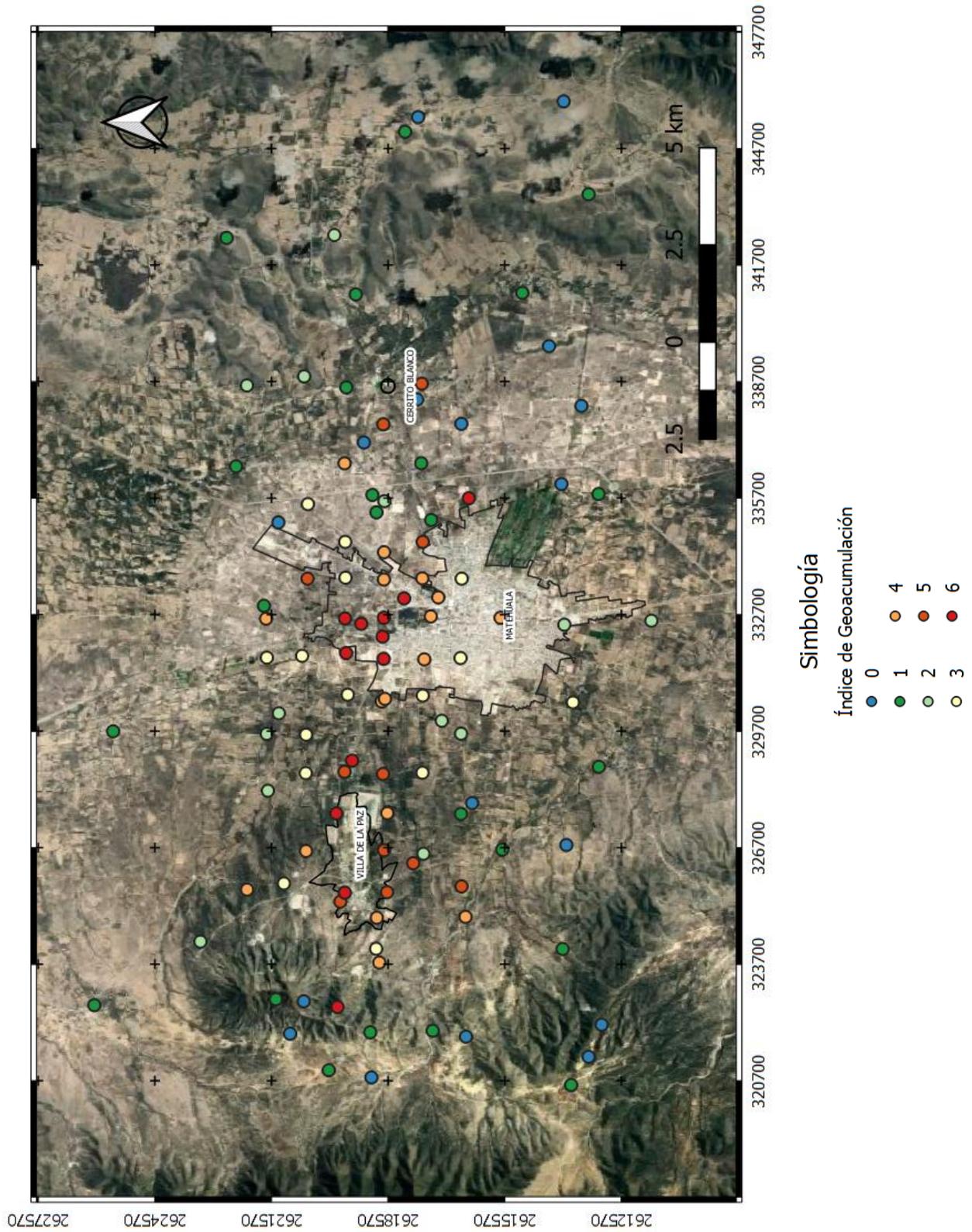


Figura 88. Mapa de índice de geoacumulación de Pb en suelos a partir del valor promedio de elementos en suelos de Alekseenko & Alekseenko (2014) de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

6.3.2 - Factor de enriquecimiento

Para el cálculo del factor de enriquecimiento se utilizó como proxy la concentración de Fe, la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 carece de un valor de Fe que pueda ser utilizado como proxy, por lo que se utilizó el valor de Fe promedio para suelos urbanos propuesto por Alekseenko & Alekseenko (2014).

Los resultados del índice de geoacumulación se compilaron en una tabla que se encuentra en los anexos (anexo 13), además, se generaron mapas de verificación para observar la distribución espacial de estos y los cambios en que se presentan al utilizar cada valor de referencia con respecto a los demás (figuras 89 - 96).

En factor de enriquecimiento en el caso del As, la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, muestra enriquecimientos de extremadamente altos a enriquecimientos significativos en la zona cercana a los terreros y la zona entre Villa de la Paz y Matehuala, un patrón similar se puede observar con el análisis de $M + 2 \text{ MAD}$, sin embargo, en la mayoría de los enriquecimientos disminuyen una categoría. Con TIF, ya no existen enriquecimientos extremadamente altos y pasan a estar en rangos que van desde enriquecimientos muy altos a enriquecimientos moderados. Los valores promedio de Alekseenko & Alekseenko (2014) muestran enriquecimientos extremadamente altos en prácticamente toda el área de influencia.

En el caso de Pb, de manera similar a lo obtenido por el índice de geoacumulación, el análisis llevado a cabo a partir de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 limita el área de influencia a la zona cercana a las escorias con enriquecimientos que van desde significativos a moderados. Con TIF y $M + 2 \text{ MAD}$, podemos encontrar enriquecimientos desde extremadamente altos hasta moderados en el área de influencia, los sitios más afectados se concentran en la zona cercana a las escorias, y se observa una zona de afectación similar a la obtenida con el análisis de As, a diferencia de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Finalmente, del mismo modo que con el As los valores promedio de Alekseenko & Alekseenko (2014) muestran enriquecimientos de extremadamente altos a muy altos en prácticamente toda el área de influencia.

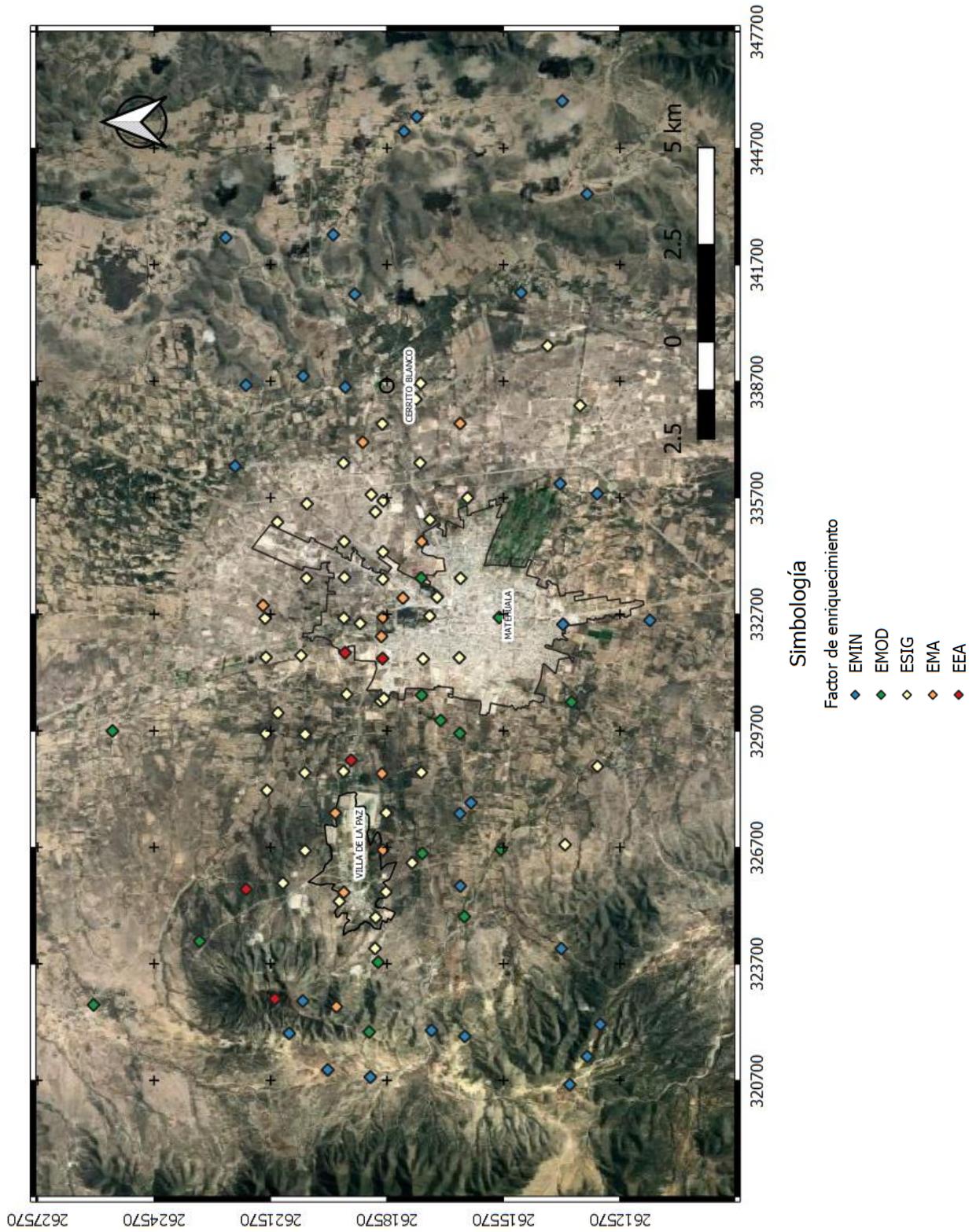


Figura 89. Mapa de factor de enriquecimiento de As en suelos a partir de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

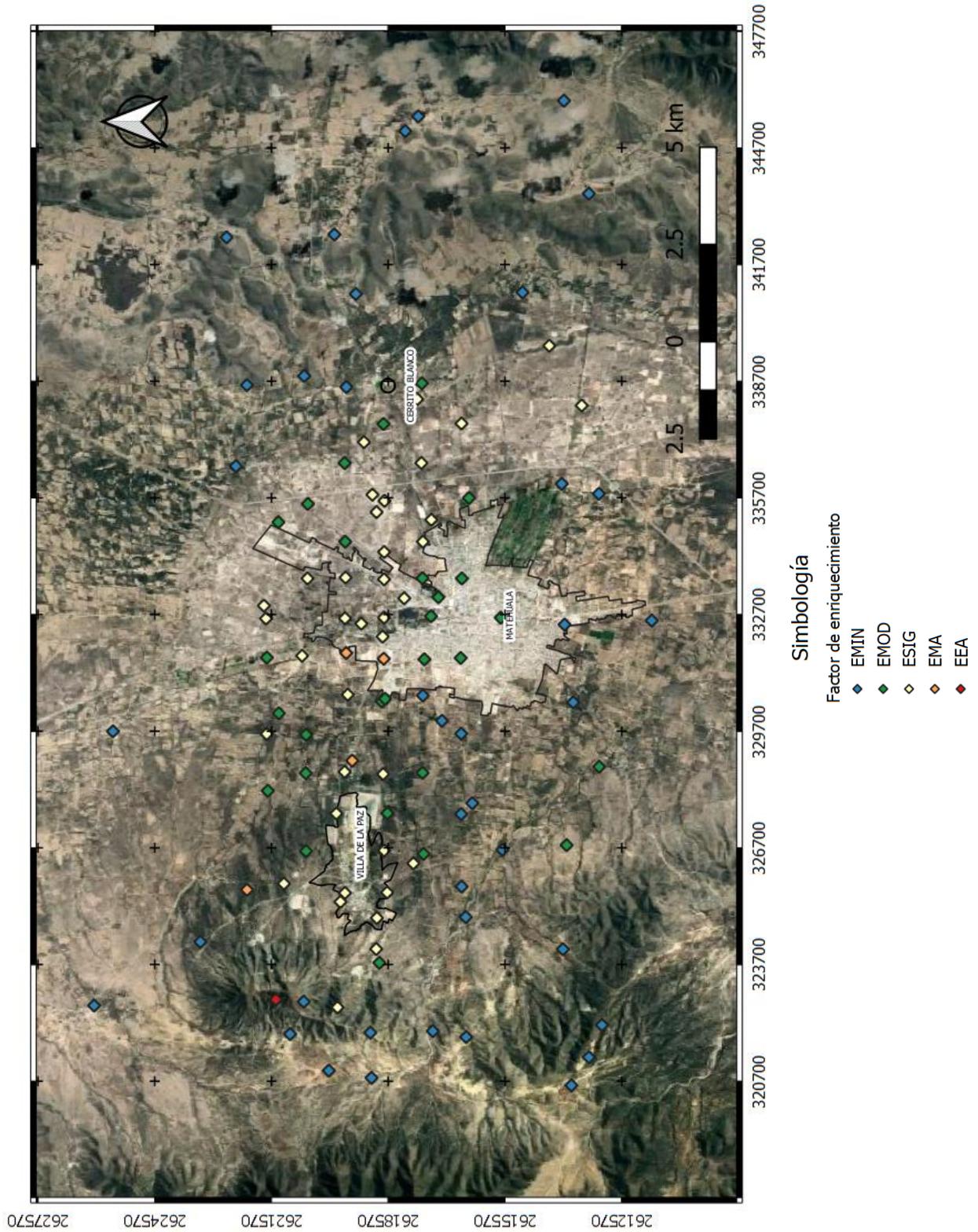


Figura 90. Mapa de factor de enriquecimiento de As en suelos a partir del valor de fondo de TIF de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

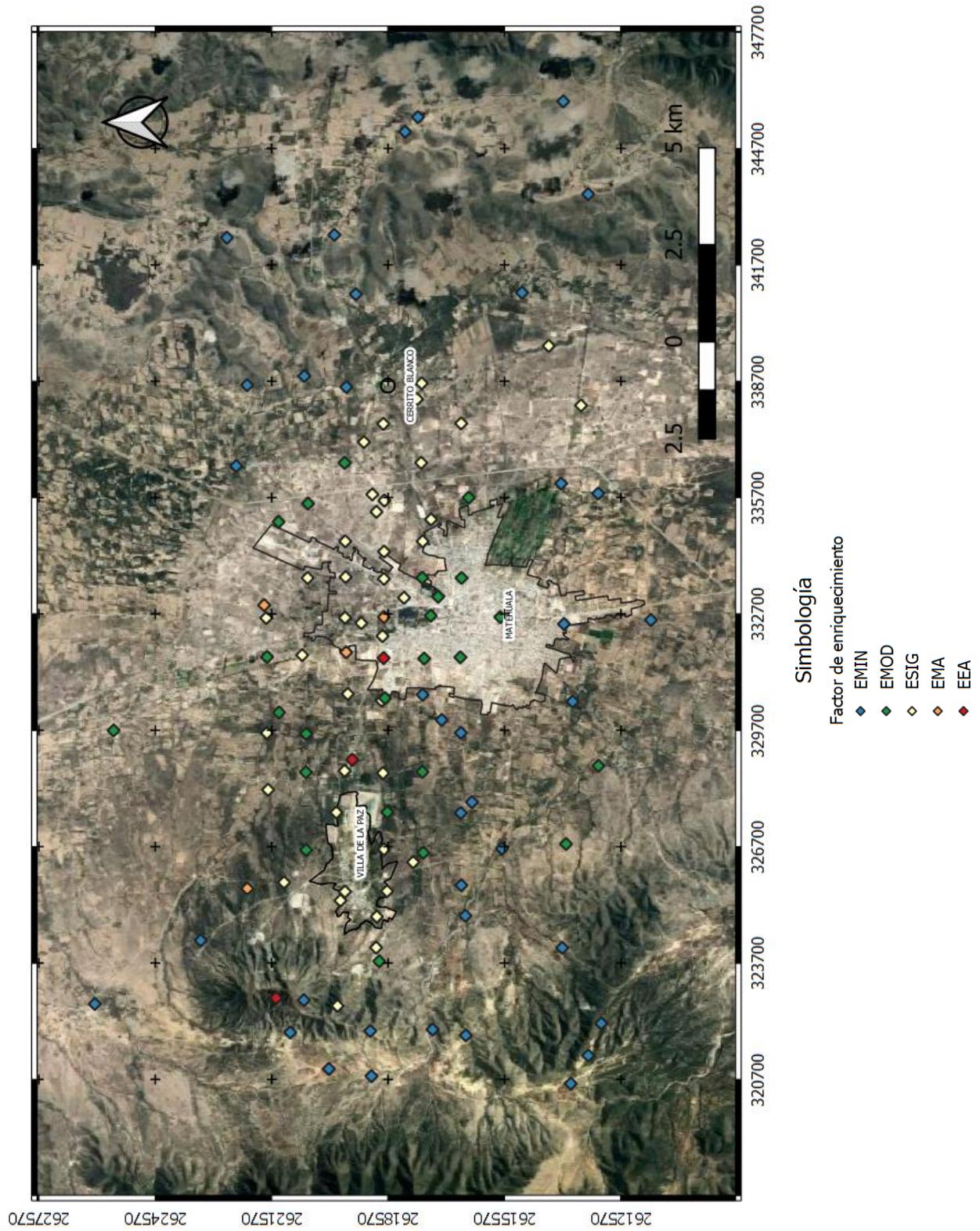


Figura 91. Mapa de factor de enriquecimiento de As en suelos a partir del valor de fondo de $M + 2 MAD$ de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

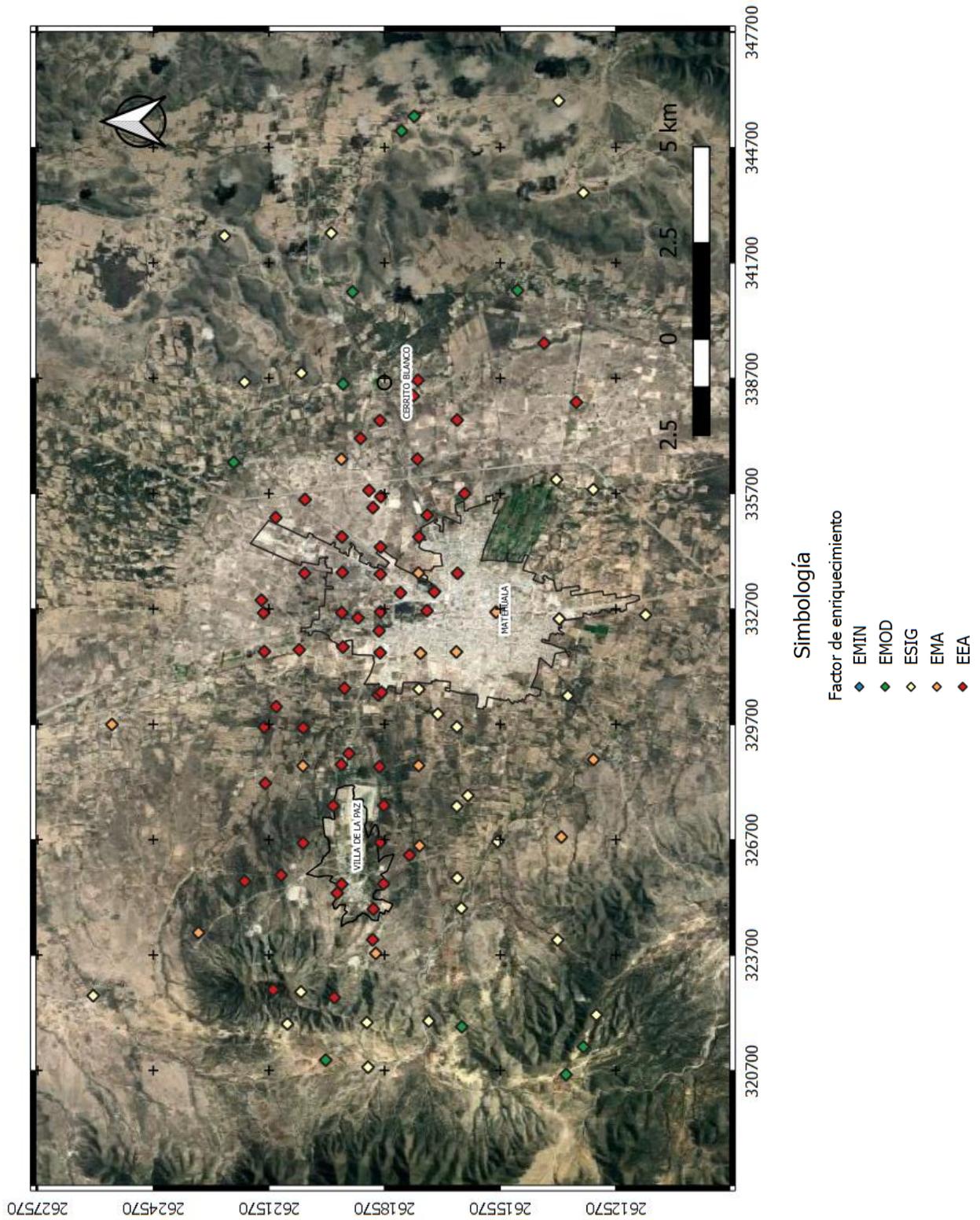


Figura 92. Mapa de factor de enriquecimiento de As en suelos a partir del valor promedio de elementos en suelos de Alekseenko & Alekseenko (2014) de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

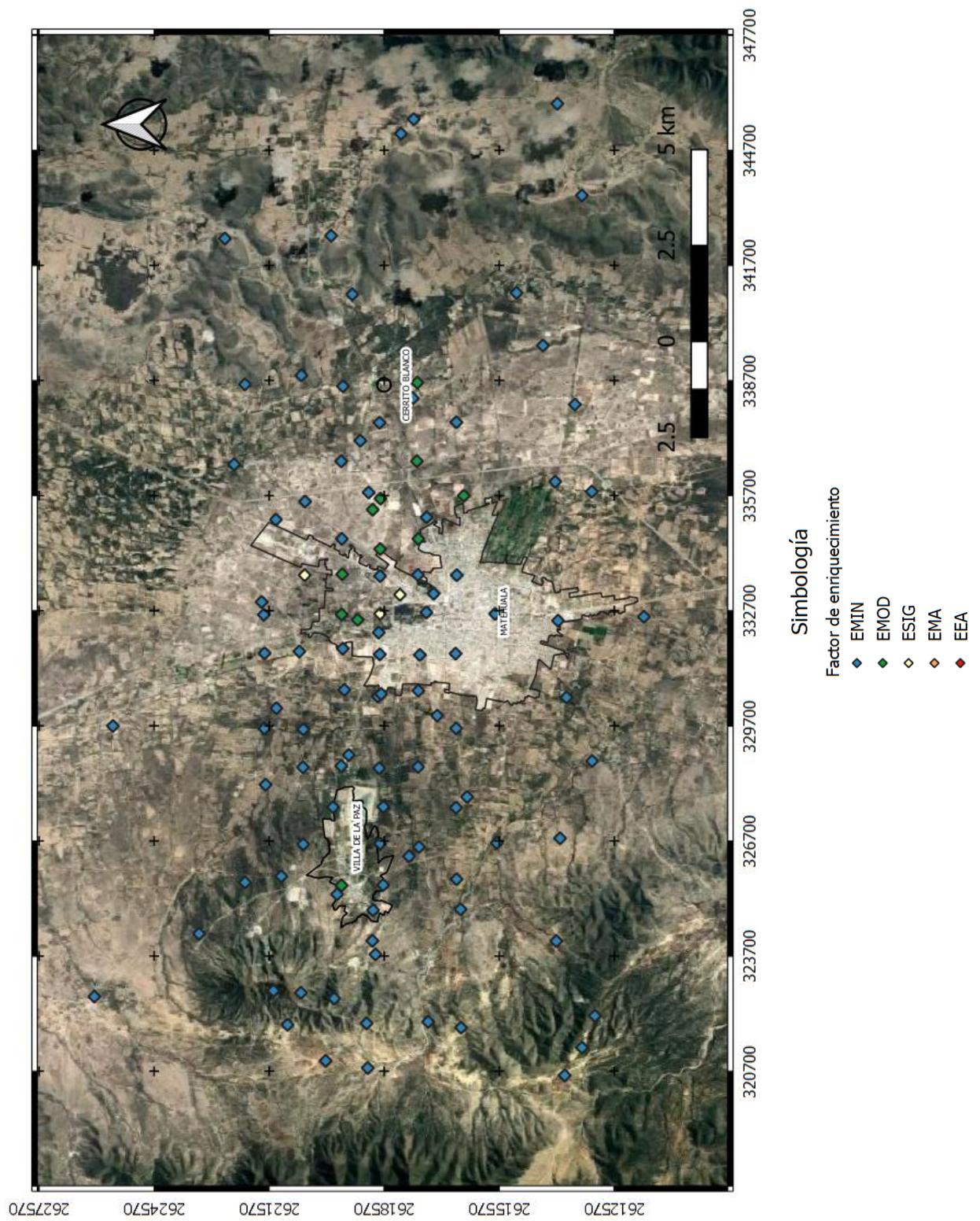


Figura 93. Mapa de factor de enriquecimiento de Pb en suelos a partir de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

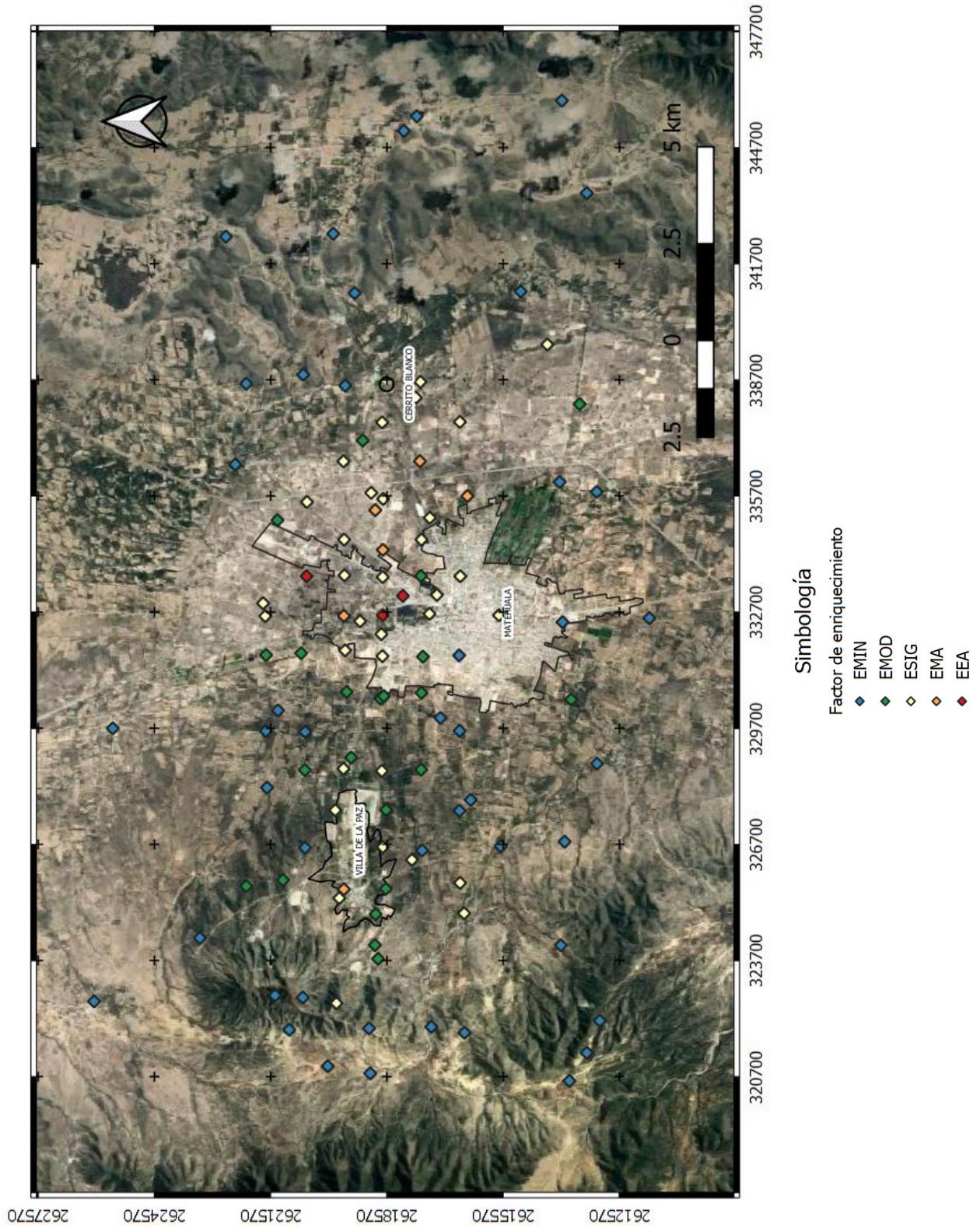


Figura 94. Mapa de factor de enriquecimiento de Pb en suelos a partir del valor de fondo de TIF de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

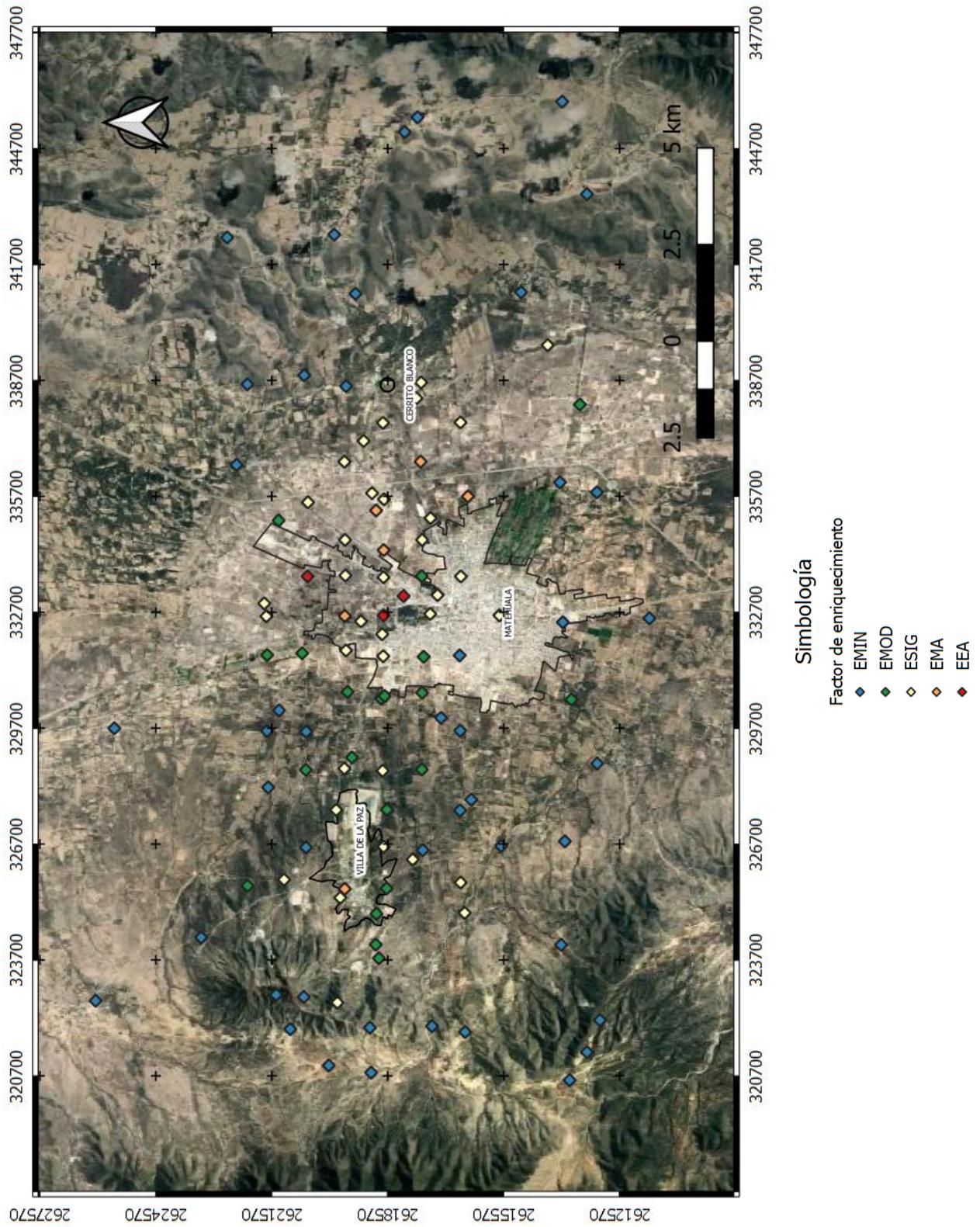


Figura 95. Mapa de factor de enriquecimiento de Pb en suelos a partir del valor de fondo de $M + 2 MAD$ de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

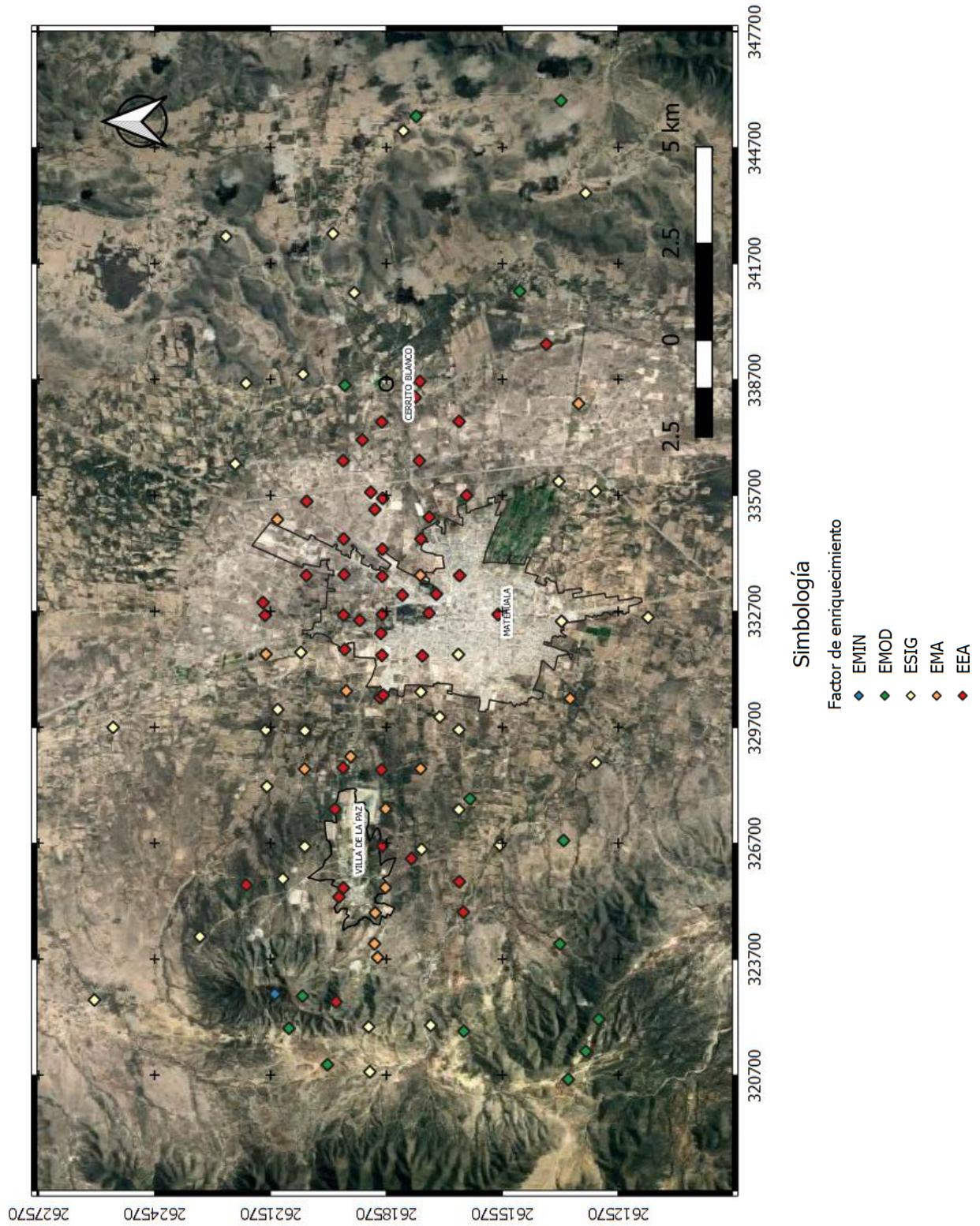


Figura 96. Mapa de factor de enriquecimiento de Pb en suelos a partir del valor promedio de elementos en suelos de Alekseenko & Alekseenko (2014) de la zona de Matehuala, San Luis Potosí, México.

7. - Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos de los distintos métodos de evaluación de contaminación antropogénica, podemos observar que los valores de fondo son herramientas muy útiles que nos permiten aproximar el impacto real que las actividades antropogénicas han generado una zona en particular, ya que a diferencia de las normas, estándares internacionales o concentraciones promedio de elementos en suelos, estos reflejan el comportamiento natural de esta, y con ellos se puede evitar la subestimación o sobrestimación de los impactos antropogénicos.

Para poder obtener valores de fondo adecuados, es necesario realizar una amplia recopilación de información previa (geográfica, geológica, climatológica, hidrográfica, hidrológica, entre otros), que, en conjunto con la identificación y caracterización de las fuentes de contaminación, sumado a datos geoquímicos históricos, o en su defecto, un muestreo exploratorio, nos permitirán delimitar la zona de influencia y sitios de muestreo adecuados para tomar valores de fondo.

La identificación y caracterización de las fuentes de contaminación es proceso de suma importancia ya que con esto podemos determinar los EPT asociadas a cada una de estas e inferir su dispersión. Los diagramas ternarios funcionan como una herramienta que nos permite observar de manera gráfica como la concentración de estos EPT varían dependiendo de cada fuente.

En los sitios seleccionados para el cálculo de valores de fondo, se debe buscar obtener la mayor cantidad de matrices ambientales (suelos, sedimentos y rocas), ya que esto permitirá la correlación de estas y en algunos casos como suelo-roca nos permitirá distinguir anomalías geoquímicas naturales o suelo-sedimento nos ayudará a inferir patrones de dispersión hídrica de contaminantes.

Una vez obtenidos los datos de valores de fondo, es necesario realizar una depuración o selección de los datos, mediante métodos de análisis estadísticos como TIF u otros métodos que nos permitan determinar posibles outlayers o anomalías geoquímicas en conjunto al análisis espacial, ya que estos datos pueden afectar de manera significativa los valores de fondo obtenidos.

El análisis de valores de fondo realizado asociando las muestras de suelo con la litología que le da origen arrojó resultados satisfactorios, sin embargo, se necesita una suite de datos adecuada (de 20-30 muestras de suelo por litología) por lo que, si se realiza de esta forma, los costos pueden ser muy elevados y se necesitaría mucho trabajo de campo y laboratorio por lo que es recomendable realizar un promedio de la zona.

Los métodos TIF y M + 2 MAD fueron los más adecuados para ser aplicados como valores de fondo, el primero permite diferenciar los outlayer o posibles outlayers de un conjunto de datos, sin embargo, no puede ser aplicado si no se tiene una suite de datos adecuada (más de 30 muestras) ya que se basa en la distribución de los datos, el segundo es el método más conservador por lo que resulta adecuado ya que al usar la mediana como

medida de tendencia central, mitiga los impactos de algún dato extremo que pueda ser pasado por alto durante el proceso de depuración, además, puede ser aplicado sin importar el tamaño de la suite de datos.

El método $A+2\sigma$ es un método en desuso debido a que al usar el promedio como medida de tendencia central se ve muy afectado por los valores extremos de la suite de datos, sin embargo, si se realiza una buena depuración de datos y la suite es muy pequeña podría ser utilizada como alternativa al $M + 2 \text{ MAD}$. Los métodos de percentiles tanto P_{95} como P_{98} del mismo modo que TIF se basan en la distribución de los datos, pero estas requieren suites de datos de mayor tamaño, por lo que su uso y precisión dependerán de la cantidad y calidad de los datos.

La caracterización de la zona de influencia mostró buenos resultados al utilizar un muestreo sistemático a lo largo de toda el área de estudio, ya que este tipo de muestreo nos permite correlacionar las muestras con la hidrografía o modelos de dispersión eólicos para aproximar cuál de estos es el que tiene mayor inferencia en la dispersión de los contaminantes. En el área de estudio la dispersión hídrica tiene una mayor inferencia en la dispersión de contaminantes, ya que esta parece seguir la hidrografía en la zona de terreros y presa de jales, por el contrario, pese a que se ha reportado dispersión eólica, esta no se acumula con forme a lo previsto en el modelo.

Los métodos de evaluación de la contaminación, tanto índice de geoacumulación como factor de enriquecimiento son buenas herramientas para realizar la valoración ambiental de un sitio, sin embargo, al depender de un valor de referencia o dos en el caso del factor de enriquecimiento, el resultado puede derivar en la sobrestimación o subestimación del impacto antropogénico.

En el caso del As ambos métodos con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y los valores promedio de suelos de Alekseenko & Alekseenko (2014), al tener valores de referencia muy bajos (22 [mg/kg] y 5 [mg/kg] respectivamente) sobreestiman la contaminación antropogénica y generan mayores áreas de influencia a las obtenidas con los valores de fondo (TIF – 47 [mg/kg] y $M + 2 \text{ MAD}$ – 33 [mg/kg]). Por el contrario, en el caso del Pb la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 al tener como valor de referencia un valor elevado (400 [mg/kg]), se subestima la contaminación antropogénica y solo se ve una influencia cerca de las escorias y la presa de jales, con el valor promedio de Alekseenko & Alekseenko (2014) al utilizar un valor muy bajo (10 [mg/kg] prácticamente toda el área de estudio se ve impactada, con los valores de fondo, tanto TIF como $M + 2 \text{ MAD}$ muestran un patrón similar al del As, delimitando de mejor manera el área de influencia y reflejando el comportamiento real del enriquecimiento de estos EPT en la zona de estudio. Además, la utilización de estos métodos en conjunto con los valores de fondo nos permite valorar elementos no normados de una mejor manera que si se utilizara un estándar internacional.

Bibliografía

- Abraham, G. M. S., & Parker, R. J. (2008). Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental monitoring and assessment*, 136(1-3), 227-238.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) - Consultado 28/08/2020
- Toxicological profile for zinc (2005)
<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp60.pdf>
- Albanese, S., De Vivo, B., Lima, A., & Cicchella, D. (2007). Geochemical background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 93(1), 21-34.
- Alekseenko, V., & Alekseenko, A. (2014). The abundances of chemical elements in urban soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 147, 245-249.
- Barbieri, M. (2016). The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination. *J Geol Geophys*, 5(237), 1-4.
- Bárceñas, F. L., & Galicia, M. M. E. (2011). *El mineral o la vida: La legislación minera en México*. Centro de Orientación y Asesoría a Pueblos Indígenas.
- Bhat, U. N., & Khan, A. B. (2011). Heavy metals: An ambiguous category of inorganic contaminants, nutrients and toxins. *Research Journal of Environmental Sciences*, 5(8), 682-690.
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New phytologist*, 173(4), 677-702.
- Caicedo, J. (2020). *Evaluación de la estabilidad geoquímica de las escorias metalúrgicas de Matehuala, San Luis Potosí*. Tesis de Maestría. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Calmus, T., Valencia-Moreno, M., Del Río-Salas, R., Ochoa-Landín, L., & Mendivil-Quijada, H. (2018). A multi-elemental study to establish the natural background and geochemical anomalies in rocks from the Sonora river upper basin, NW Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(2), 158-167.
- Chávez, C., Castro, J., Barriga, F. D., & Monroy, M. (2011). *Modelo conceptual de riesgo ambiental por Arsénico y Plomo en el distrito minero de Santa María de la Paz, San Luis Potosí, México*. e-Gnosis, 9.
- Chiprés, J. A., Castro-Larragoitia, J., & Monroy, M. G. (2009). Exploratory and spatial data analysis (EDA-SDA) for determining regional background levels and anomalies of potentially toxic elements in soils from Catorce-Matehuala, Mexico. *Applied Geochemistry*, 24(8), 1579-1589.

-
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2018). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cedral-Matehuala (2407), Estado de San Luis Potosí. Diario Oficial de la Federación.
- Consejo nacional de Población (CONAPO) (2018). Proyecciones de la población de México y de las entidades federativas 2016-2050, México, CONAPO.
- Dung, T. T. T., Cappuyns, V., Swennen, R., & Phung, N. K. (2013). From geochemical background determination to pollution assessment of heavy metals in sediments and soils. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12(4), 335-353.
- Emsley, J. (2011). *Nature's building blocks: an AZ guide to the elements*. Oxford University Press.
- Evanko, C. R., & Dzombak, D. A. (1997). *Remediation of metals-contaminated soils and groundwater*. Pittsburgh, PA: Ground-water remediation technologies analysis center.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) – Consultado 03/07/2019
- Base referencial mundial del recurso suelo (2008)
<http://www.fao.org/3/a-a0510s.pdf>
- Galán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 10, 48-60.
- Gałuszka, A., & Migaszewski, Z. (2011). Geochemical background-an environmental perspective. *Mineralogia*, 42(1), 7-17.
- Gómez-Hernández, A., Rodríguez, R., Del Río, A. L., Ruiz-Huerta, E. A., Armienta, M. A., Dávila-Harris, P., ... & Martínez-Villegas, N. (2020). Alluvial and gypsum karst geological transition favors spreading arsenic contamination in Matehuala, Mexico. *Science of the Total Environment*, 707, 135340.
- Gope, M., Masto, R. E., George, J., Hoque, R. R., & Balachandran, S. (2017). Bioavailability and health risk of some potentially toxic elements (Cd, Cu, Pb and Zn) in street dust of Asansol, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 138, 231-241.
- Goyal, P., & Krishna, T. R. (2002). Dispersion of pollutants in convective low wind: a case study of Delhi. *Atmospheric Environment*, 36(12), 2071-2079
- Hammer, Ø. (2019). *PAST PAleontological STatistics Version 3.25 Reference Manual*. Natural History Museum, University of Oslo, 275.
- Heath, A. G. (1995). *Water pollution and fish physiology*. CRC press.
- Hermann, R., & Neumann-Mahlkau, P. (1985). The mobility of zinc, cadmium, copper, lead, iron and arsenic in ground water as a function of redox potential and pH. *Science of the total environment*, 43(1-2), 1-12.

-
- Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristobal-Acevedo, D., Rubiños-Panta, J. E., & Robledo-Santoyo, E. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 15(2), 109-114.
- Hernández-Cruz, B., de Luna-Cruz, F., Sánchez-Cruz, J. A., & Martín Romero, F. (2015). Dispersión hídrica de arsénico en el distrito minero de San Antonio-El Triunfo, Baja California Sur, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(5), 113-122.
- Hewlett, P., & Liska, M. (Eds.). (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Butterworth-Heinemann.
- Hitzman, M. W., Reynolds, N. A., Sangster, D. F., Allen, C. R., & Carman, C. E. (2003). Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits. *Economic Geology*, 98(4), 685-714.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) - Consultado 11/05/2021
- Conjunto de datos vectoriales cartas escala 1:50,000 claves F14A24 y F14A25 (2015)
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825202811>
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825270674>
 - Conjunto de datos edafológicos cartas escala 1:250,000 clave F14-1 (2007)
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235611>
 - México - Censo de población y vivienda (2020)
<https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/632>
- Jiménez, M. F. S., & Olvera-Balderas, D. (2019). Elementos potencialmente tóxicos (Cd, Hg, Pb Y Zn) en suelos impactados por planta recicladora de plomo (Zacatecas, México), a una década de parar operaciones. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(3), 651-669.
- Koller, M., & Saleh, H. M. (2018). Introductory Chapter: Introducing Heavy Metals. In *Heavy Metals*. IntechOpen.
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A., & Maurice, C. (2007). Stabilization of Pb-and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat. *Environmental pollution*, 145(1), 365-373.
- Lara-del Río, J. (2015). Determinación de arsénico en cabello de poblaciones expuestas en Matehuala, San Luis Potosí, México (Master's thesis).
- Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T. J., Yuan, Z., & Huang, L. (2014). A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. *Science of the total environment*, 468, 843-853.
- López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 121-137.

-
- López-Sánchez, L. (2013). "Residuos mineros y la generación de drenaje ácido : pruebas de laboratorio y su aplicación en el diseño, construcción y operación de depósitos". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- López de Romaña, D., Castillo, C., & Diazgranados, D. (2010). El zinc en la salud humana-II. *Revista chilena de nutrición*, 37(2), 240-247.
- Martínez-Jardines, L. G. (2018). "Barreras geoquímicas y estabilización fisico-química para el manejo ambientalmente seguro de residuos metalúrgicos y suelos contaminados con arsénico y metales pesados en San Luis Potosí". (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Martínez-Villegas, N., Briones-Gallardo, R., Ramos-Leal, J. A., Avalos-Borja, M., Castañón-Sandoval, A. D., Razo-Flores, E., & Villalobos, M. (2013). Arsenic mobility controlled by solid calcium arsenates: A case study in Mexico showcasing a potentially widespread environmental problem. *Environmental Pollution*, 176, 114-122.
- Masindi, V., & Muedi, K. L. (2018). Environmental Contamination by Heavy Metals. In *Heavy Metals*. IntechOpen.
- Matschullat, J., Ottenstein, R., & Reimann, C. (2000). Geochemical background—can we calculate it?. *Environmental geology*, 39(9), 990-1000.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11), 2636-2651.
- Melo, R. (2012). Evaluación de un pasivo ambiental metalúrgico. Tesis de maestría. Programa Multidisciplinarios de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Meteoblue - Consultado 02/06/2019 y 05/09/20
- Rosa de los vientos - Matehuala (02/06/2019)
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/pronostico/modelclimate/matehuala_méxico_3996387
 - Archivo meteorológico – Matehuala (05/09/20)
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/matehuala_méxico_3996387?fcstlength=1y&year=2019&month=9
- Monroy, M., Díaz-Barriga, F., Razo, Q., & Carrizales, L. (2002). Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados (Pb, Cu, Zn) y análisis de riesgo en salud en Villa de la Paz-Matehuala, SLP. San Luis Potosí: Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Moreno, R., Téllez, J., & Monroy, M. G. (2012). Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(3), 203-218.

Müller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.

National Center for Biotechnology Information (NCBI) – Consultado 28/08/2020

- Copper Toxicity
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557456/>

Otero, I., Varela, E., Mancebo, S., & Ezquerro, A. (2009). El análisis de visibilidad en la evaluación de impacto ambiental de nuevas construcciones. *Informes de la Construcción*, 61(515), 67-75.

Özsin, G., Kılıç, M., Apaydın-Varol, E., & Pütün, A. E. (2019). Chemically activated carbon production from agricultural waste of chickpea and its application for heavy metal adsorption: equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Applied Water Science*, 9(3), 56.

Razo I. (2002). Evaluación de la contaminación por metales pesados y del riesgo en salud en un sitio minero de sulfuros polimetálicos: Caso de Villa de la Paz–Matehuala, S.L.P. (México), Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., & Monroy, M. (2004). Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 152(1-4), 129-152.

Razo, I. (2006). Identificación de áreas prioritarias de restauración de suelos contaminados por arsénico y metales pesados en el sitio minero y metalúrgico de Villa de La Paz-Matehuala, SLP (México). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R.G., Dutter, R., 2008. *Statistical Data Analysis Explained. Applied Environmental Statistics with R*. Wiley, Chichester 343 pp.

Reimann, C., & de Caritat, P. (2017). Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. *Science of The Total Environment*, 578, 633–648.

Reimann, C., & Garrett, R. G. (2005). Geochemical background—concept and reality. *Science of the total environment*, 350(1-3), 12-27.

Restrepo, L. F., & González, J. (2007). From pearson to Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192.

Rodríguez-Rodríguez, R. M. (2016). Obtención de un modelo conceptual hidrogeológico de concentraciones de arsénico variables en agua superficial y subterránea en Matehuala, San Luis Potosí. (Tesis de licenciatura). Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora.

Santos-Francés, F., Martínez-Graña, A., Alonso Rojo, P., & García Sánchez, A. (2017). Geochemical background and baseline values determination and spatial distribution of

heavy metal pollution in soils of the Andes Mountain Range (Cajamarca-Huancavelica, Peru). *International journal of environmental research and public health*, 14(8), 859.

Schwertman, N. C., Owens, M. A., & Adnan, R. (2004). A simple more general boxplot method for identifying outliers. *Computational statistics & data analysis*, 47(1), 165-174.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) - Consultado 07/08/2019

- NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 - Criterios para determinar concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio, Publicada en el Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Economía. Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas, México, el 2 de marzo de (2007).
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PP03/DO950.pdf>
- NMX-AA-025-1984 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos - Determinación del PH - Método potenciométrico.
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-025-1984.pdf>

Secretaria de Salud (SSA) (2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación.

Servicio Geológico Mexicano (SGM) - Consultado 02/06/2019

- Cartas Geológico-Mineras escala 1:50,000 claves F14A24 y F14A25 (1999)
http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1455_F14-A24_GM.pdf
http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1504_F14-A25_GM.pdf
- Cartas Geoquímicas escala 1:50,000 claves F14A24 y F14A25

Sierra-Salamanca, J. (2020). Immobilization of lead in contaminated soils in Matehuala, San Luis Potosi, Mexico, to reduce the environmental risk. Master Thesis. Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

Sparks, D. L. (1996). *Methods of soil analysis Series 5 Part 3: Chemical Methods*. Soil Science Society of America. American Society of Agronomy, Madison, WI.

Tiwari, P. (2017). Accident Analysis by using Data Mining Techniques. 10.13140/RG.2.2.20091.41766/1.

Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., & Jeffrey, D. W. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer meeresuntersuchungen*, 33(1-4), 566-575.

Torres, M. V. (2010). Las áreas de protección del artículo 33 de la Ley Forestal, Universidad de Costa Rica, Montes de Oca, Costa Rica.

United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) - Consultado 27/08/2020

- Method 6200 - Field portable x-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment (2007)
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/6200.pdf>
- Copper Facts (2008)
https://archive.epa.gov/pesticides/reregistration/web/pdf/copper_red_fs.pdf

United States Geological Survey (USGS) – Consultado 27/08/2020

- Lead—Soft and Easy to Cast (2011)
<https://pubs.usgs.gov/fs/2011/3045/pdf/fs2011-3045.pdf>

Villatoro, M., Henríquez Henríquez, C. R., & Sancho, F. (2007). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense* Vol. 32 Núm. 1 2007.

Watling, H. R. (2006). The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides—a review. *Hydrometallurgy*, 84(1-2), 81-108.

Weltje, G. J. (2002). Quantitative analysis of detrital modes: statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology. *Earth-Science Reviews*, 57(3-4), 211-253.

Wong, M. H. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50(6), 775-780.

Yaroshevsky, A. A. (2006). Abundances of chemical elements in the Earth's crust. *Geochemistry International*, 44(1), 48-55.

Zhang, H. K., Roy, D. P., Yan, L., Li, Z., Huang, H., Vermote, E., Skakun, S & Roger, J. C. (2018). Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. *Remote sensing of environment*, 215, 482-494.

Anexos

Anexo 1 - Coordenadas del muestreo de jales superficiales y zanjas.

ID-Campo	X	Y	Tipo de residuo	ID-Campo	X	Y	Tipo de residuo
19-SLPVP-J-01	327406	2619451	Jales	19-SLPVP-J-28	326610	2619277	Jales
19-SLPVP-J-02	327549	2619425	Jales	19-SLPVP-J-29	326689	2619401	Jales
19-SLPVP-J-03	327702	2619399	Jales	19-SLPVP-J-30	326820	2619451	Jales
19-SLPVP-J-04	327856	2619359	Jales	19-SLPVP-J-31	326372	2619450	Jales
19-SLPVP-J-05	327370	2619280	Jales	19-SLPVP-J-32-A	326616	2619641	Jales
19-SLPVP-J-06	328000	2619142	Jales	19-SLPVP-J-32-B	326616	2619641	Jales
19-SLPVP-J-07	327346	2619002	Jales	19-SLPVP-J-33	326906	2619502	Jales
19-SLPVP-J-08	327506	2618976	Jales	19-SLPVP-J-34	327100	2619506	Jales
19-SLPVP-J-09	327661	2618975	Jales	19-SLPVP-J-35	327008	2619461	Jales
19-SLPVP-J-10	327945	2618925	Jales	19-SLPVP-J-36	326997	2619654	Jales
19-SLPVP-J-11	327251	2619070	Jales	19-SLPVP-J-37	326805	2619668	Jales
19-SLPVP-J-12	327299	2619305	Jales	19-SLPVP-J-38	326672	2619506	Jales
19-SLPVP-J-13	327328	2619500	Jales	19-SLPVP-J-39	326777	2619358	Jales
19-SLPVP-J-14	328090	2619410	Jales	19-SLPVP-J-40	326727	2619611	Jales
19-SLPVP-J-15	328067	2619183	Jales	19-SLPVP-J-41	326599	2619584	Jales
19-SLPVP-J-16	328030	2618930	Jales	19-SLPVP-J-42	326608	2619339	Jales
19-SLPVP-J-17	327904	2618830	Jales	19-SLPVP-J-43	326502	2619501	Jales
19-SLPVP-J-18	327645	2618864	Jales	19-SLPVP-J-44	326471	2619401	Jales
19-SLPVP-J-19	327394	2618898	Jales	19-SLPVP-J-45	326453	2619614	Jales
19-SLPVP-J-20	327699	2619560	Jales	19-SLPVP-J-46	326488	2619313	Jales
19-SLPVP-J-21	327491	2619595	Jales	19-SLPVP-J-47	326690	2619331	Jales
19-SLPVP-J-22	327941	2619505	Jales	19-SLPVP-J-48	326798	2619256	Jales
19-SLPVP-J-23	327882	2619160	Jales	19-SLPVP-J-49	326374	2619350	Jales
19-SLPVP-J-24	327992	2619332	Jales	19-SLPVP-J-50	327800	2619748	R. de tostación
19-SLPVP-J-25	327810	2618945	Jales	19-SLPVP-J-51	327954	2619753	R. de tostación
19-SLPVP-J-26	327095	2619583	Jales	19-SLPVP-J-52	327953	2619598	R. de tostación
19-SLPVP-J-27	326795	2619541	Jales	19-SLPVP-J-53	327800	2619602	R. de tostación
19-SLPVP-ZJ-01	327878	2619677	R. de tostación	19-SLPVP-ZJ-02	327489	2619502	Jales
19-SLPVP-ZJ-03	327925	2619410	Jales	19-SLPVP-ZJ-04	327935	2618956	Jales
19-SLPVP-ZJ-05	327301	2619013	Jales	19-SLPVP-ZJ-06	327008	2619541	Jales
19-SLPVP-ZJ-07	326690	2619447	Jales	19-SLPVP-ZJ-08	326590	2619455	Jales

Anexo 2 - Tabla de datos de análisis de FRX y parámetros fisicoquímicos de muestras de jales, residuos de tostación y zanjas.

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
LD [mg/kg]			11	100	500	85	35	100	85	13	160	70	25
19-SLPVP-J-01	8.41	329	139.51	247.47	161,597.90	101.33	198.18	79,092.34	1,345.73	<LOD	311.24	73.23	99.05
19-SLPVP-J-02	8.27	386	477.17	230.58	163,592.32	102.48	306.11	77,209.98	1,322.89	34.90	291.65	80.46	160.62
19-SLPVP-J-03	8.27	360	1,022.55	246.14	151,062.88	99.32	528.83	84,068.49	1,375.75	75.44	316.81	76.93	574.50
19-SLPVP-J-04	8.38	178	536.98	245.95	157,897.88	101.00	480.16	87,947.30	1,375.18	24.17	371.69	74.40	164.67
19-SLPVP-J-05	8.16	432	156.03	189.88	153,342.39	102.56	229.10	89,786.64	1,341.26	14.50	344.63	71.51	101.42
19-SLPVP-J-06	8.08	265	1,570.53	302.39	129,585.00	97.02	837.90	67,392.81	1,146.48	137.12	569.74	77.50	1,456.03
19-SLPVP-J-07	7.92	505	954.32	253.34	157,931.64	94.90	905.11	78,126.82	1,350.05	88.24	316.03	71.34	462.76
19-SLPVP-J-08	7.81	590	791.67	253.16	149,863.84	93.57	1,139.03	98,960.36	1,642.26	86.86	299.68	75.55	696.34
19-SLPVP-J-09	7.95	341	1,612.18	299.85	144,134.95	94.86	1,456.35	68,200.16	1,232.23	114.65	479.58	75.35	848.88
19-SLPVP-J-10	7.88	286	1,618.15	281.65	140,612.81	100.02	1,437.88	67,534.24	1,171.89	117.66	483.95	73.98	903.63
19-SLPVP-J-11	7.86	151	729.50	248.30	141,961.60	87.91	2,545.05	97,276.03	1,415.50	94.89	325.94	73.27	477.74
19-SLPVP-J-12	7.68	186.9	701.85	226.50	147,267.23	100.69	3,325.24	92,880.89	1,445.93	107.79	334.66	70.56	549.93
19-SLPVP-J-13	7.44	458	1,070.11	237.65	154,766.87	98.30	889.99	70,783.47	1,273.95	89.81	299.66	71.51	525.10
19-SLPVP-J-14	7.38	239	618.87	259.55	134,442.93	110.13	2,952.66	79,069.10	1,323.39	88.87	360.91	73.00	670.19
19-SLPVP-J-15	7.2	243	1,346.41	246.81	133,605.36	102.40	4,639.19	97,310.38	1,432.75	231.93	342.09	<LOD	1,740.66
19-SLPVP-J-16	6.82	241	837.04	246.27	131,873.98	99.61	2,143.31	93,529.34	1,302.67	103.72	319.62	82.16	778.67
19-SLPVP-J-17	8.21	109	477.44	227.20	146,452.45	104.23	3,520.53	89,616.05	1,286.91	70.40	328.67	78.01	634.24
19-SLPVP-J-18	8.35	63.1	339.29	248.58	152,089.55	98.66	2,125.36	80,956.55	1,295.81	35.62	444.45	76.46	237.33
19-SLPVP-J-19	8.08	131.2	642.72	234.38	144,379.67	104.27	4,390.89	94,964.12	1,367.95	77.94	323.33	86.50	550.29

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
19-SLPVP-J-20	8.25	109	599.06	244.53	149,160.18	94.16	2,208.84	93,250.82	1,404.29	51.39	344.17	79.70	427.15
19-SLPVP-J-21	8.84	109.3	354.49	239.51	145,479.23	105.62	2,103.68	97,412.76	1,395.19	38.87	304.32	83.68	234.10
19-SLPVP-J-22	8.83	98.8	194.92	243.06	146,884.65	106.91	2,533.13	89,186.62	1,313.29	28.72	377.56	81.06	229.01
19-SLPVP-J-23	8.86	454	530.00	261.90	154,728.33	97.01	340.74	76,865.72	1,299.45	41.71	413.36	78.85	177.91
19-SLPVP-J-24	8.99	352	478.82	238.27	150,489.90	104.75	1,437.15	83,778.60	1,337.83	28.84	450.89	84.41	196.75
19-SLPVP-J-25	8.72	597	1,705.66	291.53	142,260.55	89.93	509.79	67,462.29	1,222.40	96.95	465.04	<LOD	620.20
19-SLPVP-J-26	9.13	80.7	274.33	266.53	134,194.14	95.41	3,172.74	94,413.58	1,455.79	47.29	380.61	<LOD	398.37
19-SLPVP-J-27	8.8	80.9	939.20	312.72	131,613.71	104.08	995.06	41,314.24	1,434.35	278.29	888.24	92.49	671.77
19-SLPVP-J-28	8.3	413	831.58	231.24	131,273.35	97.39	5,679.83	116,961.55	1,599.77	117.75	281.30	78.24	525.37
19-SLPVP-J-29	7.88	824	289.03	189.26	133,083.49	97.45	3,025.25	106,832.97	1,606.36	40.79	234.39	78.47	298.07
19-SLPVP-J-30	7.39	1,635	5,308.99	391.10	118,207.18	100.39	1,903.89	70,577.59	2,053.69	619.72	758.31	<LOD	2,075.89
19-SLPVP-J-31	7.03	345	714.18	222.39	137,806.41	85.15	4,095.26	123,856.49	1,597.20	61.22	272.06	101.26	284.60
19-SLPVP-J-32-A	2.83	2,910	2,213.16	186.94	86,761.45	90.09	3,893.96	163,682.95	1,140.71	195.13	297.30	<LOD	306.55
19-SLPVP-J-32-B	8.15	1,399	908.09	255.63	108,916.46	87.15	4,959.42	106,829.06	1,479.49	84.07	375.47	<LOD	711.70
19-SLPVP-J-33	8.53	718	221.71	253.62	157,152.27	94.39	2,528.23	92,941.92	1,258.35	26.74	271.02	89.50	164.74
19-SLPVP-J-34	8.54	546	342.71	283.89	122,911.89	93.13	3,789.49	95,640.78	1,496.08	68.39	338.02	<LOD	489.70
19-SLPVP-J-35	8.48	782	259.40	240.90	135,036.24	105.61	3,247.81	93,364.39	1,719.71	85.42	206.48	<LOD	455.54
19-SLPVP-J-36	9.36	68.6	222.48	248.65	159,426.24	100.61	2,382.13	107,538.65	1,250.43	24.77	<LOD	96.50	174.64
19-SLPVP-J-37	9.27	61.1	236.77	237.13	142,350.49	105.03	3,677.29	128,038.28	1,627.80	34.16	321.12	76.70	339.65
19-SLPVP-J-38	8.77	285	271.53	248.81	122,594.76	100.22	3,349.38	102,874.90	1,598.50	48.48	226.49	77.94	335.60
19-SLPVP-J-39	8.18	1,051	5,439.26	463.52	127,516.16	107.39	1,593.39	59,030.47	2,220.24	581.97	891.23	73.17	1,671.44

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
19-SLPVP-J-40	8.3	1,307	347.47	270.23	135,845.12	91.70	3,205.02	88,992.13	1,478.44	65.75	349.53	79.55	428.55
19-SLPVP-J-41	9.18	85.6	263.98	255.55	141,895.44	93.96	3,696.86	107,702.78	1,690.19	38.02	293.01	73.14	309.65
19-SLPVP-J-42	9.25	53.3	459.83	273.43	135,330.45	92.06	2,987.92	115,387.04	1,621.32	48.53	391.11	85.92	327.70
19-SLPVP-J-43	9.42	30.8	482.75	234.96	136,765.88	104.37	3,274.60	113,779.40	1,696.87	45.52	306.10	84.80	326.84
19-SLPVP-J-44	9.47	313.3	667.25	230.90	139,700.40	104.30	3,916.26	126,383.46	1,735.82	49.76	311.07	95.11	281.09
19-SLPVP-J-45	9.16	81.9	640.51	264.43	127,206.26	88.30	4,400.07	113,053.53	1,585.54	68.25	306.98	71.38	385.31
19-SLPVP-J-46	8.66	472	309.71	246.40	136,149.55	92.21	2,960.20	97,461.54	1,525.48	42.67	326.11	<LOD	323.09
19-SLPVP-J-47	9.05	117.1	969.74	228.24	135,759.49	97.48	5,345.98	130,552.18	1,695.56	85.11	315.23	79.49	400.47
19-SLPVP-J-48	8.12	1,602	1,896.12	354.79	116,151.83	103.71	914.97	74,897.38	1,913.36	239.05	503.82	<LOD	680.93
19-SLPVP-J-49	8.55	1,201	173.96	249.97	157,968.42	100.50	997.66	100,770.51	1,311.80	19.79	340.29	104.77	182.10
19-SLPVP-J-50	9.62	151.7	841.83	1,416.87	48,647.88	95.33	323.85	40,405.23	27,917.34	3,167.16	459.98	82.15	2,726.14
19-SLPVP-J-51	9.75	1,080	1,019.04	1,440.58	46,466.89	115.23	355.71	52,946.98	29,265.51	3,205.87	478.31	81.22	2,879.85
19-SLPVP-J-52	10	310	742.56	1,233.76	41,038.01	106.21	310.91	40,669.32	27,916.55	2,716.75	648.50	91.81	2,573.59
19-SLPVP-J-53	9.85	278	793.24	1,199.61	27,325.67	105.92	249.98	40,681.01	18,686.46	2,324.59	435.13	78.29	1,882.70

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
LD [mg/kg]			11	100	500	85	35	100	85	13	160	70	25
19-SLPVP-ZJ-01 (0-5)	9.04	1,346	1,003.92	1,535.59	38,617.18	118.17	337.96	47,140.89	27,229.48	2,538.66	514.30	88.28	2,732.52
19-SLPVP-ZJ-01 (50)	9.52	1,516	929.53	1,229.42	47,831.04	92.02	335.66	43,216.96	30,439.61	2,955.85	637.07	84.44	2,827.89
19-SLPVP-ZJ-01 (100)	9.33	1,219	888.17	1,165.35	37,412.28	107.47	301.93	42,365.00	25,977.62	2,657.12	475.29	76.94	2,543.08

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
19-SLPVP-ZJ-02 (0-5)	8.43	255	209.04	225.53	153,873.38	98.48	907.74	97,269.29	1,570.21	21.93	334.83	72.72	143.60
19-SLPVP-ZJ-02 (50)	8.51	135.5	645.84	251.90	162,553.14	100.61	2,179.62	92,547.09	1,416.94	39.22	333.60	84.10	262.80
19-SLPVP-ZJ-02 (100)	8.25	355	432.82	263.57	162,363.39	97.88	963.29	100,589.03	1,559.95	42.24	290.87	<LOD	169.23
19-SLPVP-ZJ-02 (150)	8.13	260	781.20	251.70	158,851.66	108.61	1,580.25	89,604.44	1,403.37	107.37	311.83	71.27	580.27
19-SLPVP-ZJ-02 (200)	8.23	369	1,479.89	277.02	155,844.42	94.80	2,514.11	74,941.40	1,450.62	115.67	402.56	<LOD	911.08
19-SLPVP-ZJ-03 (0-5)	8.17	408	1,905.51	255.02	151,886.93	91.47	2,544.10	107,475.54	1,416.79	236.46	377.67	80.50	2,400.41
19-SLPVP-ZJ-03 (50)	8.27	202	1,255.51	254.30	139,086.59	104.91	2,958.74	99,009.58	1,463.21	201.04	379.33	72.73	3,006.91
19-SLPVP-ZJ-03 (100)	8.2	248	674.90	241.20	161,232.55	100.66	2,150.35	97,835.19	1,382.30	84.60	249.69	82.39	553.15
19-SLPVP-ZJ-03 (150)	8.13	246	285.68	259.93	163,187.46	92.90	825.99	93,050.79	1,355.27	31.43	249.62	71.41	237.17
19-SLPVP-ZJ-03 (200)	8.31	144.3	293.36	254.60	153,390.41	98.70	868.22	98,774.26	1,456.15	22.76	324.95	83.11	184.06
19-SLPVP-ZJ-04 (0-5)	8.19	235	1,887.21	283.71	148,373.65	101.88	1,806.84	81,422.11	1,313.58	102.47	441.69	70.77	1,034.82
19-SLPVP-ZJ-04 (50)	8.2	201	754.03	238.35	170,950.30	97.44	243.18	63,249.39	1,132.28	35.31	430.63	76.37	181.81
19-SLPVP-ZJ-04 (100)	8.03	395	404.32	232.73	171,051.95	99.98	267.37	75,446.11	1,274.24	22.66	341.97	82.52	128.05
19-SLPVP-ZJ-04 (150)	7.97	254	92.40	222.72	170,796.04	103.79	228.06	80,865.71	1,227.48	13.65	444.10	84.85	100.21
19-SLPVP-ZJ-05 (0-5)	7.94	265	775.82	265.64	155,185.20	104.28	1,329.93	84,574.39	1,390.03	101.80	417.70	<LOD	514.96
19-SLPVP-ZJ-05 (50)	7.98	168.9	198.54	259.76	150,059.34	100.89	572.00	96,535.21	1,494.68	25.92	351.62	75.86	176.07
19-SLPVP-ZJ-05 (100)	7.93	99.3	709.34	273.33	153,634.33	100.23	1,416.18	76,724.19	1,479.12	66.88	291.83	<LOD	416.27
19-SLPVP-ZJ-05 (150)	7.72	243	1,088.02	254.64	152,699.84	95.33	805.05	71,639.20	1,314.34	53.98	365.65	<LOD	639.69
19-SLPVP-ZJ-05 (180)	7.71	202	203.32	266.41	151,221.37	93.97	592.37	94,468.42	1,402.77	15.75	411.45	82.72	172.91
19-SLPVP-ZJ-06 (0-150)	7.34	716	385.26	288.05	139,739.21	105.40	382.98	17,470.47	1,216.64	246.80	994.28	91.07	621.47

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
19-SLPVP-ZJ-06 (150)	7.4	541	224.88	238.38	146,055.18	98.80	1,202.10	80,003.96	1,441.36	25.34	431.10	83.33	200.00
19-SLPVP-ZJ-06 (200)	7.17	1,158	376.73	217.32	137,876.11	105.35	851.04	74,184.35	1,454.73	31.23	429.75	70.85	280.13
19-SLPVP-ZJ-07 (0-5)	7.14	382	441.52	253.12	144,754.27	85.99	3,226.79	106,773.29	1,645.00	50.19	448.87	88.95	324.06
19-SLPVP-ZJ-07 (50)	7.61	683	328.12	243.44	129,587.13	99.52	2,667.77	96,533.73	1,590.14	41.19	347.89	79.99	304.74
19-SLPVP-ZJ-07 (100)	7.68	766	312.35	249.38	136,469.98	92.32	3,317.06	102,622.56	1,634.78	51.94	257.91	82.11	326.40
19-SLPVP-ZJ-07 (150)	7.67	1,080	400.64	259.18	141,086.97	<LOD	3,492.13	114,279.48	1,640.80	45.31	288.82	72.61	295.52
19-SLPVP-ZJ-07 (200)	7.98	310	130.03	227.43	128,847.69	95.45	228.11	14,780.95	348.90	123.80	1,086.44	82.60	294.78
19-SLPVP-ZJ-08 (0-5)	8.58	278	214.46	259.60	142,201.84	95.09	893.14	83,755.79	1,738.41	30.48	306.92	<LOD	276.61
19-SLPVP-ZJ-08 (100)	8.03	613	216.68	281.51	143,138.95	92.44	879.82	82,086.39	1,742.20	28.30	316.92	<LOD	296.08
19-SLPVP-ZJ-08 (150)	7.88	1,002	297.38	194.39	137,458.04	99.54	822.96	75,440.74	1,540.38	25.35	352.49	<LOD	246.33
19-SLPVP-ZJ-08 (200)	7.88	987	246.87	192.88	148,556.42	98.52	804.84	86,121.16	1,399.22	21.77	360.13	81.75	159.92

Anexo 3 - Detalles del muestreo de suelos y memoria fotográfica.

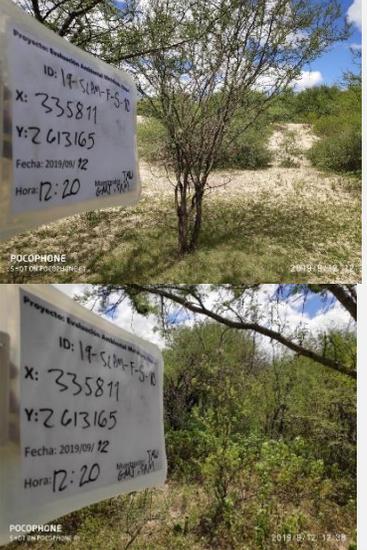
Clave de campo	Matriz	Coordenadas UTM		Descripción de la muestra
		X	Y	
19-SLPM-FS-02	Suelo	320971	2620107	Suelo ligeramente arcilloso, color marrón claro, cerca de estadio de jaripeo.
19-SLPM-FS-03	Suelo	320784	2619010	Suelo arenoso, color pardo oscuro.
19-SLPM-FS-04	Suelo	322644	2626142	Suelo franco arenoso, color café claro a marrón.
19-SLPM-FS-05	Suelo	329698	2625657	Suelo franco arenoso, color café oscuro.
19-SLPM-FS-06	Suelo	338244	2617835	Suelo franco arcilloso, color amarillo pardusco, caolinizado.
19-SLPM-FS-07	Suelo	342407	2622736	Suelo franco de color negro.
19-SLPM-FS-08	Suelo	342481	2619965	Suelo franco arcilloso, color negro.
19-SLPM-FS-09	Suelo	345518	2617810	Suelo franco arenoso, color marrón, con alta actividad biológica.
19-SLPM-FS-10	Suelo	335811	2613165	Suelo franco arenoso, color café oscuro, tomado cerca de una laguna.
19-SLPM-FS-11	Suelo	332548	2611806	Suelo franco arcilloso, color café claro, tomado cerca de residuos sólidos urbanos.
19-SLPM-FS-13	Suelo	321315	2613421	Suelo franco arenoso, color café claro a marrón.
19-SLPM-FS-15	Suelo	324092	2614089	Suelo franco arenoso, color café oscuro.
19-SLPM-FS-20	Suelo	326771	2613993	Suelo franco limoso, color café oscuro, cerca de depósito de residuos.
19-SLPM-S-01	Suelo	330444	2613825	Suelo franco arcilloso, color café oscuro, tomado cerca de la carretera.
19-SLPM-S-02	Suelo	322798	2621470	Suelo franco arenoso, color café oscuro, tomado cerca de respiradero de mina.

Clave de campo	Matriz	X	Y	Descripción de la muestra
19-SLPM-S-03	Suelo	325780	2621263	Suelo franco limoso, color café, tomado cerca de un camino rural.
19-SLPM-S-04	Suelo	324920	2616588	Suelo franco arenoso, color café claro a marrón, con contenido de materia orgánica
19-SLPM-S-05	Suelo	335338	2618881	Suelo franco arcilloso, color amarillo pardusco, caolinizado.
19-SLPM-S-06	Suelo	335786	2618987	Suelo franco limoso, color amarillo pardusco, posiblemente caolinizado.
19-SLPM-S-07	Suelo	337138	2619204	Suelo franco limoso, color amarillo pardusco, posiblemente caolinizado.
19-SLPM-S-08	Suelo	339619	2614440	Suelo franco limoso, color amarillo pardusco, posiblemente caolinizado.
19-SLPM-S-09	Suelo	327850	2616419	Suelo franco arenoso, color pardo claro, tomado cerca de la carretera.
19-SLPM-S-10	Suelo	326651	2615644	Suelo franco limoso, color café oscuro, con mucha materia orgánica
19-SLPM-S-11	Suelo	328945	2619507	Suelo franco limoso, color café, cerca de la presa de jales de Villa de la Paz
19-SLPM-S-12	Suelo	324897	2618872	Suelo franco limoso, color café claro, tomado cerca de depósito de residuos sólidos urbanos.
19-SLPM-S-13	Suelo	323744	2618808	Suelo franco arenoso, color café oscuro, tomado cerca de residuos de mina.
19-SLPM-S-14	Suelo	338081	2613606	Suelo franco limoso, color café claro, tomado cerca de zona ganadera agrícola.
19-SLPM-S-15	Suelo	329970	2617200	Suelo franco arenoso, color café claro, cerca de zona habitacional.
19-SLPM-S-16	Suelo	332445	2614047	Suelo franco limoso, color café claro, cerca de residuos sólidos urbanos.
19-SLPM-S-17	Suelo	336067	2614120	Suelo franco limoso, color café claro, cerca de residuos sólidos urbanos.
19-SLPM-S-18	Suelo	324283	2623411	Suelo franco, color café.

Clave de campo	Matriz	X	Y	Descripción de la muestra
19-SLPM-S-19	Suelo	340991	2615128	Suelo franco limoso, color oscuro, con presencia de musgo.
19-SLPM-S-20	Suelo	335141	2617473	Suelo franco limoso, color café claro, con abundante materia orgánica.
19-SLPM-S-21	Suelo	345140	2618143	Suelo ligeramente arcilloso, color negro.
19-SLPM-S-22	Suelo	338606	2622214	Suelo franco, color café oscuro.
19-SLPM-S-23	Suelo	322143	2613085	Suelo franco limoso, color café claro.
19-SLPM-S-24	Suelo	336521	2622495	Suelo franco limoso, color café claro, cerca de tanque de agua fuera de uso.
19-SLPM-S-25	Suelo	330163	2621393	Suelo franco arenoso, color marrón claro.
19-SLPM-S-26	Suelo	321947	2619040	Suelo arenoso, color café claro, en lo alto del cerro.
19-SLPM-S-27	Suelo	324099	2618889	Suelo arenoso, color café, cerca de posible terreros.
19-SLPM-S-28	Suelo	321986	2617434	Suelo arenoso, color café oscuro.
19-SLPM-S-29	Suelo	321834	2616576	Suelo franco arenoso, color café claro, cerca de orilla del río.
19-SLPM-S-30	Suelo	322597	2619883	Suelo franco limoso, color café oscuro, cerca de respiradero de mina.
19-SLPM-S-31	Suelo	328168	2621675	Suelo franco arcilloso, color café claro.
19-SLPM-S-32	Suelo	325312	2619809	Suelo franco, color café oscuro, con abundante materia orgánica.
19-SLPM-S-33	Suelo	334312	2618685	Suelo franco limoso, color amarillo pardusco, posiblemente caolinizado.
19-SLPM-S-34	Suelo	343531	2613422	Suelo franco, color marrón.

Clave de campo	Matriz	X	Y	Descripción de la muestra
19-SLPM-S-35	Suelo	330468	2618746	Suelo franco limoso, color café claro, al oeste de la colonia Florida II.
19-SLPM-S-36	Suelo	322744	2620752	Suelo franco limoso, color café, tomado en lo alto del cerro.
19-SLPM-S-37	Suelo	320590	2613871	Suelo franco arenoso, color café oscuro.
19-SLPM-S-38	Suelo	328786	2613158	Suelo franco arenoso, color café claro, a unos metros de un área de cultivo.
19-SLPM-S-39	Suelo	326302	2617935	Suelo franco arenoso, color café chocolate, a pocos metros de un arroyo.
19-SLPM-S-40	Suelo	335079	2621405	Suelo franco arenoso, color blanco, formado a partir de yeso.
19-SLPM-S-41	Suelo	332932	2621776	Suelo ligeramente arcilloso, color gris claro.
19-SLPM-S-42	Suelo	345924	2614064	Suelo franco limoso, color negro.
19-SLPM-S-43	Suelo	321911	2621104	Suelo franco, color café claro.
19-SLPM-S-44	Suelo	340950	2619413	Suelo franco arenoso, color negro.
19-SLPM-S-45	Suelo	325622	2622210	Suelo franco, color café.
19-SLPM-S-46	Suelo	333147	2617290	Suelo franco limoso, color café oscuro, en el patio de un hotel.

Clave de la muestra	Sitio	Panorámicas	Panorámicas
19-SLPM-FS-02		 	 
19-SLPM-FS-03		 	 
19-SLPM-FS-04		 	 

Clave de la muestra	Sitio	Panorámicas	Panorámicas
19-SLPM-FS-10			
19-SLPM-S-02			
19-SLPM-S-05			

Clave de la muestra

Sitio

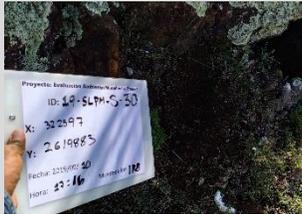
Panorámicas

Panorámicas

19-SLPM-S-06



19-SLPM-S-30



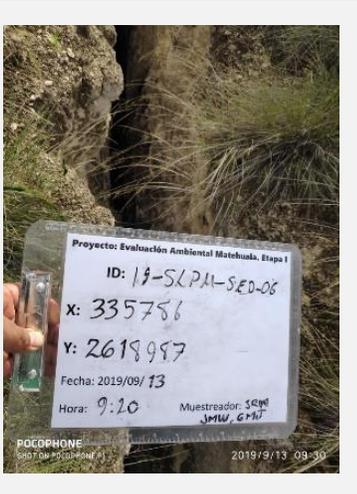
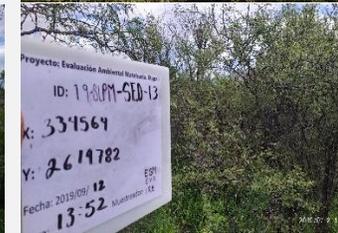
Anexo 4 - Detalles del muestreo de sedimentos y memoria fotográfica.

Clave de campo	Matriz	Coordenadas UTM		Descripción de la muestra
		X	Y	
19-SLPM-FSed-02	Sedimento	320954	2620067	Sedimento ligeramente arcilloso, color marrón claro, tomado de una represa de pastoreo.
19-SLPM-FSed-03	Sedimento	320784	2619010	Sedimento arenoso, color pardo claro, de un arroyo seco.
19-SLPM-FSed-04	Sedimento	322693	2626186	Sedimento franco, color café grisáceo tomado de una represa.
19-SLPM-FSed-05	Sedimento	329758	2625630	Sedimento ligeramente arcilloso, color café claro, tomado de una represa.
19-SLPM-FSed-07	Sedimento	342574	2622499	Sedimento arcilloso, de color café oscuro, tomado de represo de pastoreo.
19-SLPM-FSed-09	Sedimento	345518	2617886	Sedimento arcilloso, color marrón oscuro, tomado en laguna con presencia de algas.
19-SLPM-FSed-10	Sedimento	335769	2613178	Sedimento franco arcilloso, color café grisáceo oscuro, tomado a orilla de ojo de agua.
19-SLPM-FSed-11	Sedimento	332486	2611822	Sedimento franco arenoso, color café oscuro, tomado a orillas de una lagunilla.
19-SLPM-FSed-13	Sedimento	321315	2613421	Sedimento franco arenoso, color café claro, con fuerte actividad antropogénica.
19-SLPM-FSed-15	Sedimento	324054	2614102	Sedimento arenoso, color café oscuro, de un arroyo seco.
19-SLPM-FSed-20	Sedimento	326771	2613993	Sedimento franco arenoso, color café grisáceo, en zona de actividad agrícola.
19-SLPM-Sed-01	Sedimento	325797	2621265	Sedimento arenoso, color café, de un arroyo cerca de tepetatera.
19-SLPM-Sed-02	Sedimento	325622	2622210	Sedimento arenoso, color marrón grisáceo, tomado de arroyo seco.
19-SLPM-Sed-03	Sedimento	326302	2617835	Sedimento arenoso, color café claro, tomado de arroyo seco.

Clave de campo	Matriz	X	Y	Descripción de la muestra
19-SLPM-Sed-04	Sedimento	344960	2616582	Sedimento arenoso, color café claro, tomado de arroyo seco.
19-SLPM-Sed-05	Sedimento	335338	2618891	Sedimento franco arcilloso, color café oscuro, tomado de canal a 10[m] de profundidad
19-SLPM-Sed-06	Sedimento	335786	2618987	Sedimento franco arcilloso, color gris oscuro, tomado de canal con presencia de algas.
19-SLPM-Sed-07	Sedimento	337138	2619204	Sedimento franco limoso, color gris-negro, tomado de río con presencia de algas.
19-SLPM-Sed-08	Sedimento	339589	2614411	Sedimento franco arenoso, color café grisáceo, tomado de arroyo seco.
19-SLPM-Sed-09	Sedimento	325312	2619791	Sedimento arenoso, color café grisáceo, aguas arriba de tiradero de residuos sólidos.
19-SLPM-Sed-10	Sedimento	326628	2615640	Sedimento franco arenoso, color café claro, tomado de río seco.
19-SLPM-Sed-12	Sedimento	338626	2618807	Sedimento franco limoso, color café oscuro, tomado de laguna recreativa.
19-SLPM-Sed-13	Sedimento	334564	2619782	Sedimento franco arenoso, color café blanquecino, tomado cerca de pista aérea.
19-SLPM-Sed-14	Sedimento	336376	2622389	Sedimento franco limoso, color café oscuro, tomado de canal superficial.
19-SLPM-Sed-15	Sedimento	338565	2618880	Sedimento franco arcilloso, color café oscuro, tomado de laguna recreativa a 40[cm].
19-SLPM-Sed-16	Sedimento	330895	2621417	Sedimento franco limoso, color café oscuro, tomado de represa.
19-SLPM-Sed-17	Sedimento	321892	2621184	Sedimento arenoso, color gris, tomado de una presa al pie de cañada.
19-SLPM-Sed-18	Sedimento	328164	2621717	Sedimento arenoso, color café claro, tomado de un arroyo intermitente.
19-SLPM-Sed-19	Sedimento	323668	2624194	Sedimento arenoso, color café grisáceo, tomado de un arroyo estrecho.

Clave de campo	Matriz	X	Y	Descripción de la muestra
19-SLPM-Sed-28	Sedimento	321755	2617415	Sedimento arenoso, color café claro, tomado cerca de carretera.
19-SLPM-Sed-29	Sedimento	321834	2616576	Sedimento arenoso, color café claro, tomado de río intermitente.

Clave de la muestra	Sitio	Panorámicas	Panorámicas
19-SLPM-FSED-02		 	 
19-SLPM-FSED-03		 	 
19-SLPM-FSED-09			

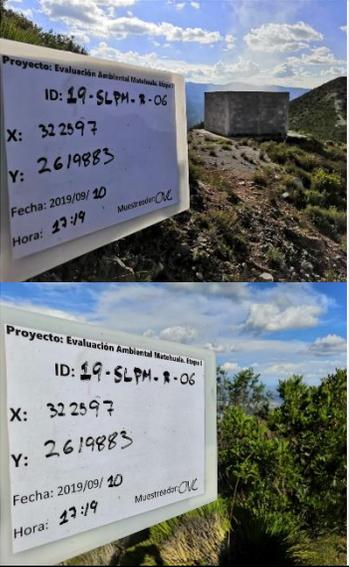
Clave de la muestra	Sitio	Panorámicas	Panorámicas
			
19-SLPM-SED-05			
19-SLPM-SED-06			
19-SLPM-SED-13			

Clave de la muestra	Sitio	Panorámicas	Panorámicas
			
19-SLPM-SED-16			
19-SLPM-SED-28			

Anexo 5 - Detalles del muestreo de rocas y memoria fotográfica.

Clave de campo	Matriz	Coordenadas UTM		Descripción de la muestra
		X	Y	
19-SLPM-FR-03	Roca	320784	2619010	Lutita de color gris-pardo, altamente fracturada, con vetas y vetillas de calcita.
19-SLPM-FR-07	Roca	342407	2622736	Caliza gris fosilífera, con presencia de disolución.
19-SLPM-FR-08	Roca	342481	2619965	Caliza gris fosilífera, con presencia de disolución.
19-SLPM-FR-13	Roca	321315	2613421	Intercalación de caliza negra -lutita de color gris.
19-SLPM-R-01	Roca	322744	2620752	Caliza masiva, altamente fracturada y rellena con vetillas de calcita.
19-SLPM-R-02	Roca	322798	2621470	Caliza de color negro, con alteración de color verde.
19-SLPM-R-04	Roca	321928	2619054	Caliza negra intercalada con lutita gris.
19-SLPM-R-06	Roca	322597	2619883	Caliza negra, con una gran costra de alteración, muy mineralizada.
19-SLPM-R-10	Roca	345929	2614064	Caliza gris fosilífera, con presencia de disolución.
19-SLPM-R-11	Roca	340950	2619413	Caliza gris fosilífera, con presencia de disolución.
19-SLPM-R-13	Roca	323944	2618808	Conglomerado polimíctico de color blancuzco.
19-SLPM-R-15	Roca	324020	2614074	Conglomerado polimíctico de color café rojizo.
19-SLPM-R-17	Roca	321897	2621103	Caliza negra con vetillas de calcita.

Clave de campo	Matriz	X	Y	Descripción de la muestra
19-SLPM-R-18	Roca	324307	2623414	Yeso o caolín.
19-SLPM-R-20	Roca	326771	2613993	Conglomerado polimíctico color blanco-amarillento.
19-SLPM-R-21	Roca	345140	2618143	Caliza gris fosilífera, con presencia de disolución y recristalización.
19-SLPM-R-22	Roca	338606	2622214	Caliza gris fosilífera, con presencia de disolución y recristalización.
19-SLPM-R-23	Roca	322143	2613085	Conglomerado polimíctico de color gris rojizo.
19-SLPM-R-27	Roca	324099	2618889	Conglomerado polimíctico color blanco-amarillento.
19-SLPM-R-28	Roca	321966	2617438	Caliza-Lutita de color negro-gris con vetillas de calcita.
19-SLPM-R-29	Roca	321834	2616576	Caliza-Lutita de color gris oscuro (negra) con vetillas de calcita.
19-SLPM-R-39	Roca	343531	2613422	Caliza gris con presencia de disolución.
19-SLPM-R-40	Roca	325765	2621264	Conglomerado polimíctico de color gris blancuzco.

Clave de la muestra	Sitio	Panorámicas	Panorámicas
19-SLPM-FR-03			
19-SLPM-R-02			
19-SLPM-R-06			

Clave de la muestra	Sitio	Panorámicas	Panorámicas
19-SLPM-R-10			
19-SLPM-R-18			

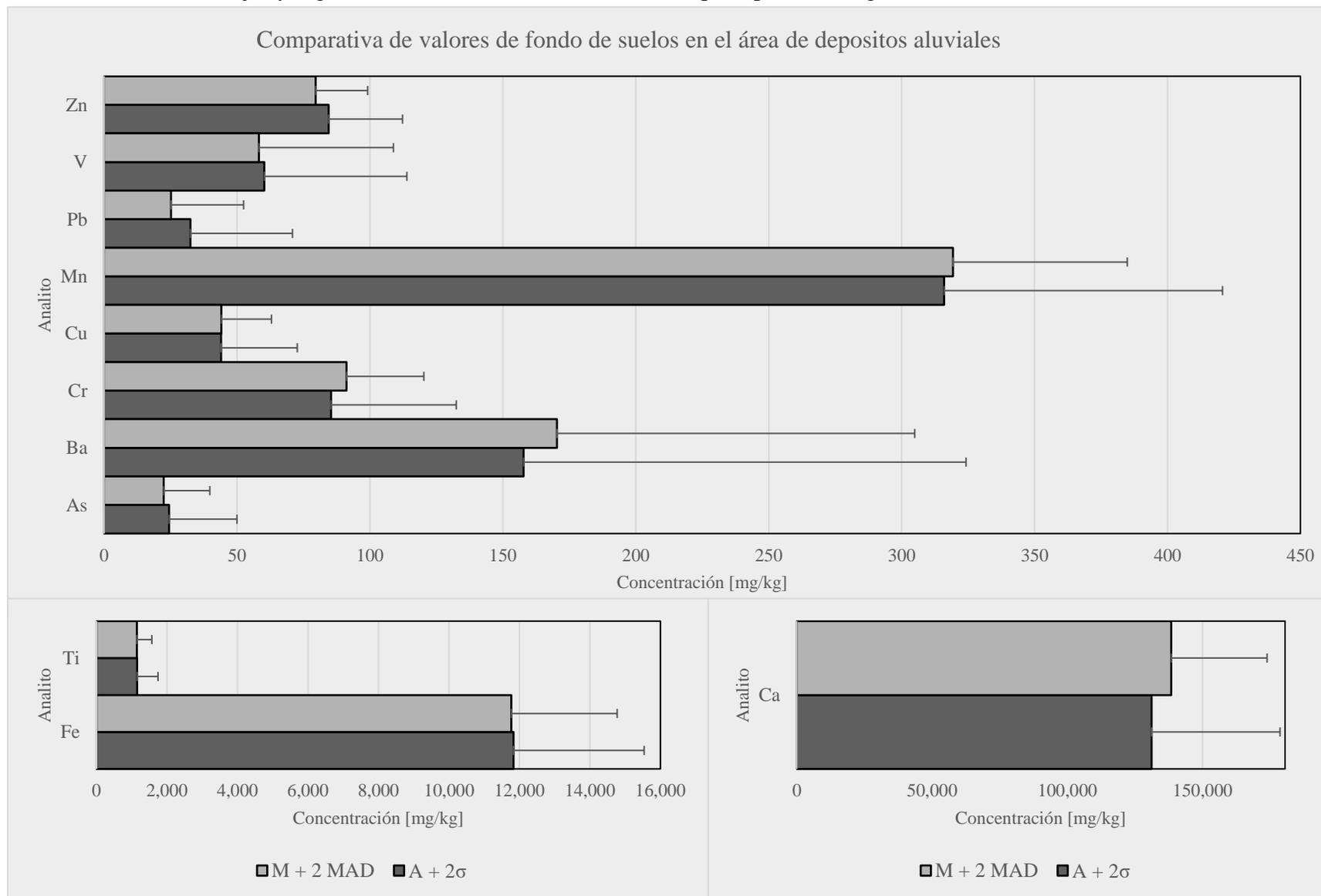
Anexo 6 - Tabla de datos de análisis de FRX y parámetros fisicoquímicos de muestras de suelo.

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
LOD [mg/kg]			11	100	500	85	35	100	85	13	160	70	25
19-SLPM-FS-02	8.62	136.20	12.26	233.24	62,829.18	118.22	42.54	22,835.49	309.35	18.02	2,196.96	137.87	64.99
19-SLPM-FS-03	8.01	257.00	<LOD	<LOD	160,790.15	<LOD	<LOD	7,053.80	145.81	14.98	771.28	74.15	52.21
19-SLPM-FS-04	8.50	148.00	22.61	218.02	140,375.91	89.95	48.37	11,200.51	343.07	16.61	1,149.62	<LOD	79.33
19-SLPM-FS-05	8.41	194.20	41.13	274.53	145,197.68	<LOD	73.90	10,771.10	315.64	21.50	1,002.11	<LOD	106.57
19-SLPM-FS-06	7.87	2,100.00	<LOD	<LOD	168,624.33	<LOD	<LOD	445.51	88.95	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-FS-07	8.17	304.00	<LOD	135.34	164,678.01	89.68	<LOD	7,223.33	219.70	26.51	739.19	<LOD	54.37
19-SLPM-FS-08	8.07	223.00	13.80	<LOD	76,873.07	115.26	<LOD	15,216.25	405.46	36.23	2,013.26	87.05	89.71
19-SLPM-FS-09	8.41	161.82	<LOD	106.10	80,091.58	97.00	<LOD	11,220.90	415.73	<LOD	1,383.41	<LOD	74.21
19-SLPM-FS-10	8.28	163.20	12.11	185.70	119,597.62	95.38	42.98	12,361.19	281.70	28.28	1,275.26	84.45	79.23
19-SLPM-FS-11	9.00	102.20	24.39	241.49	95,106.02	104.99	45.27	14,979.81	386.04	55.73	1,614.42	91.92	99.87
19-SLPM-FS-13	8.92	84.10	<LOD	246.02	209,157.13	103.92	39.21	9,879.90	253.86	<LOD	602.04	84.20	44.62
19-SLPM-FS-15	8.23	157.90	19.95	<LOD	135,661.91	110.36	<LOD	14,328.84	202.70	18.03	1,098.04	109.15	70.68
19-SLPM-FS-20	8.49	112.70	62.08	<LOD	115,976.52	109.89	<LOD	12,153.06	263.35	13.79	1,155.13	77.96	51.84
19-SLPM-S-01	8.16	247.00	22.26	<LOD	127,903.50	88.70	<LOD	10,769.47	315.91	71.35	1,136.82	<LOD	91.14
19-SLPM-S-02	8.30	144.70	5,786.92	252.78	62,317.98	119.85	7,301.22	61,136.06	686.86	24.10	1,685.82	130.18	916.76
19-SLPM-S-03	8.34	207.00	156.76	135.29	150,808.22	106.12	188.78	13,504.26	274.76	69.42	649.15	92.00	216.40
19-SLPM-S-04	8.80	100.10	26.51	<LOD	159,675.51	92.17	64.45	13,137.78	202.90	237.80	1,023.46	92.86	123.08
19-SLPM-S-05	7.86	1,981.00	<LOD	<LOD	160,232.05	<LOD	<LOD	540.68	96.79	28.37	<LOD	<LOD	28.71

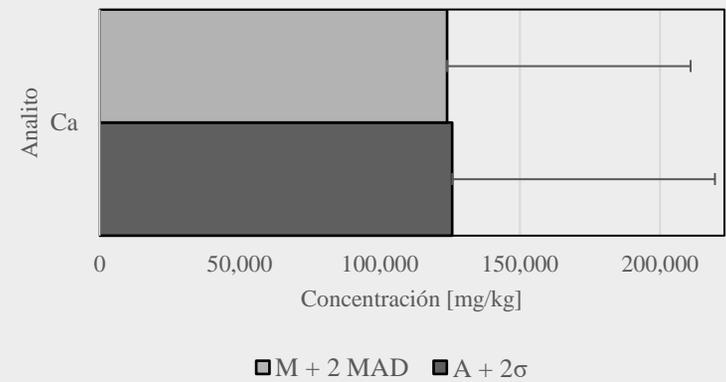
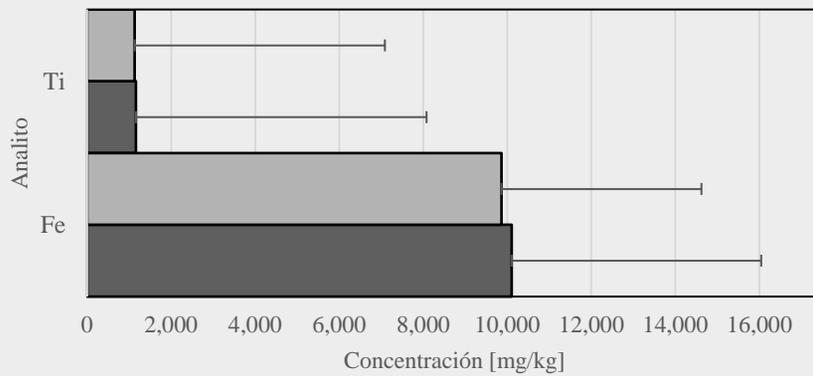
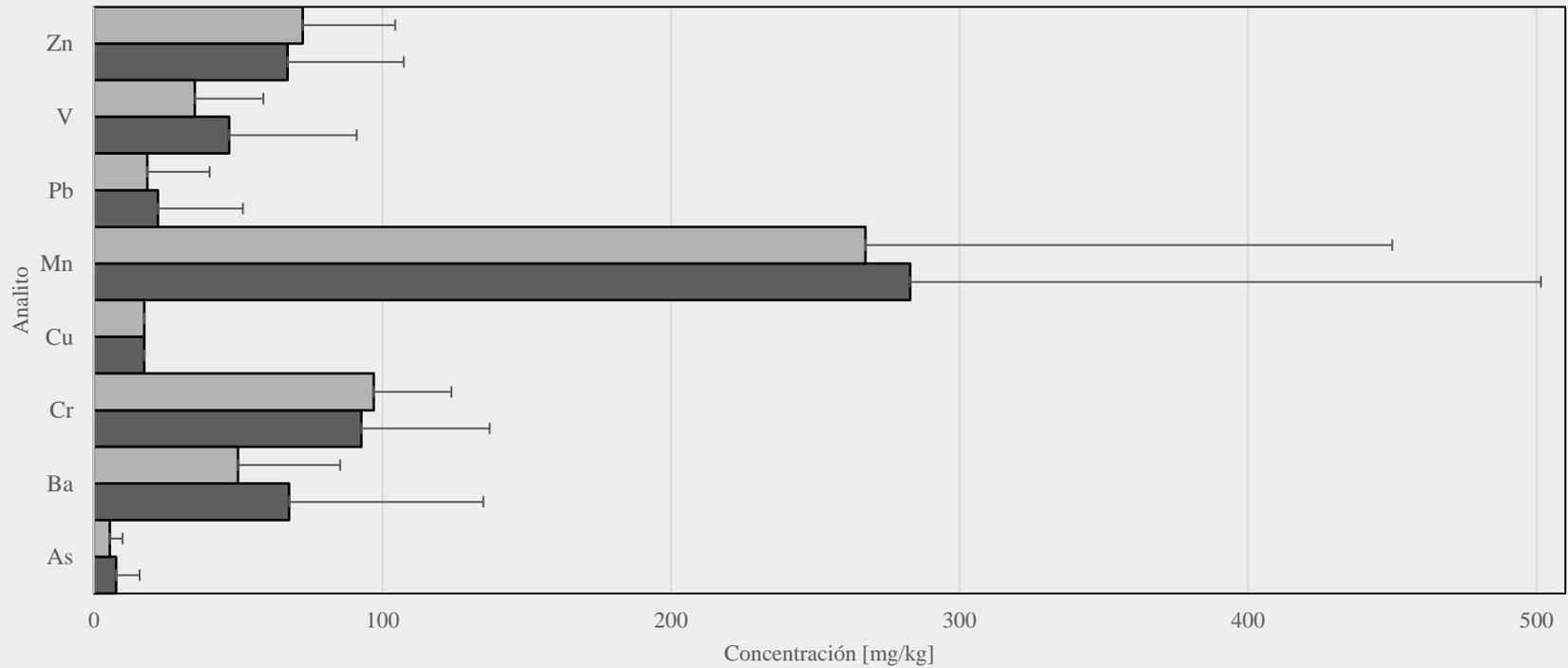
Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
19-SLPM-S-06	7.88	2,060.00	12.88	<LOD	159,292.06	<LOD	<LOD	661.88	<LOD	19.69	<LOD	<LOD	25.06
19-SLPM-S-07	8.11	2,250.00	16.23	<LOD	156,281.44	<LOD	<LOD	530.86	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-S-08	7.93	2,050.00	<LOD	<LOD	158,901.85	<LOD	<LOD	296.51	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-S-09	8.61	104.70	18.24	155.02	147,329.37	90.31	45.37	12,785.35	309.89	13.39	1,228.68	87.01	79.51
19-SLPM-S-10	8.14	214.00	20.58	<LOD	157,493.22	<LOD	38.67	9,215.52	192.96	27.69	695.81	<LOD	79.66
19-SLPM-S-11	8.09	331.00	6,374.20	588.99	126,491.46	102.69	1,696.82	91,248.80	2,676.85	696.76	813.77	<LOD	2,032.74
19-SLPM-S-12	7.88	218.00	172.50	<LOD	165,407.98	89.94	245.00	15,938.58	402.64	154.00	978.34	77.35	352.28
19-SLPM-S-13	8.23	149.10	97.33	214.72	51,776.62	116.75	395.72	21,387.23	394.98	141.79	1,877.18	115.98	415.26
19-SLPM-S-14	8.12	5,780.00	11.59	<LOD	146,211.53	<LOD	<LOD	1,033.33	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-S-15	8.62	157.80	28.14	147.67	136,569.93	109.80	53.98	12,343.41	326.06	47.72	1,108.35	81.47	93.84
19-SLPM-S-16	8.56	159.00	22.56	197.10	129,480.15	105.52	50.77	12,956.57	398.37	35.94	1,237.16	92.44	169.84
19-SLPM-S-17	8.12	3,510.00	<LOD	157.72	155,590.45	<LOD	<LOD	2,976.61	149.74	<LOD	<LOD	<LOD	39.92
19-SLPM-S-18	8.34	170.20	45.71	156.38	105,330.85	100.69	159.38	15,958.73	363.83	46.84	1,443.17	84.99	97.39
19-SLPM-S-19	8.80	108.20	<LOD	<LOD	86,941.91	108.12	<LOD	12,956.85	378.72	15.14	1,411.59	77.93	82.89
19-SLPM-S-20	7.95	2,100.00	11.61	110.57	163,809.33	<LOD	36.57	1,135.21	<LOD	25.12	<LOD	<LOD	35.12
19-SLPM-S-21	8.25	176.70	<LOD	102.91	61,573.73	110.72	<LOD	14,362.62	412.19	23.61	2,051.38	88.29	80.56
19-SLPM-S-22	8.15	181.60	14.80	<LOD	85,858.36	104.08	<LOD	12,937.84	297.13	49.31	1,496.48	<LOD	86.02
19-SLPM-S-23	8.69	90.70	<LOD	<LOD	290,675.48	86.40	<LOD	5,625.47	93.07	<LOD	174.55	<LOD	35.57
19-SLPM-S-24	8.26	305.00	<LOD	<LOD	88,178.01	92.05	36.15	14,177.18	322.67	20.07	1,553.70	83.07	77.87
19-SLPM-S-25	8.64	99.10	100.74	280.92	129,402.06	97.48	258.98	15,575.75	423.30	32.16	1,367.52	74.33	131.79
19-SLPM-S-26	8.20	170.20	15.51	171.93	231,488.48	<LOD	41.92	7,061.83	237.06	19.61	502.66	<LOD	43.70

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
19-SLPM-S-27	8.06	446.00	116.71	<LOD	211,085.92	99.69	329.70	10,485.50	216.78	79.37	345.45	<LOD	114.14
19-SLPM-S-28	9.13	150.10	17.31	<LOD	182,863.71	<LOD	35.37	11,517.30	217.15	26.45	924.75	82.19	68.61
19-SLPM-S-29	8.87	85.80	<LOD	203.37	167,578.83	86.83	39.10	12,287.39	216.12	<LOD	830.15	87.30	64.59
19-SLPM-S-30	8.14	105.30	4,170.82	272.10	33,609.20	173.82	1,143.11	174,194.00	6,100.72	2,276.89	1,971.25	236.54	7,010.32
19-SLPM-S-31	8.60	92.80	142.00	202.54	97,778.91	99.52	394.85	16,975.43	458.89	50.95	1,467.06	83.82	195.65
19-SLPM-S-32	8.45	129.90	180.56	192.85	148,966.87	91.64	191.72	13,060.35	374.42	367.82	886.53	78.19	356.88
19-SLPM-S-33	7.72	2,030.00	76.31	125.69	151,702.52	<LOD	60.07	4,223.47	174.91	231.56	220.70	<LOD	112.12
19-SLPM-S-34	8.31	209.00	<LOD	<LOD	179,779.74	<LOD	<LOD	5,449.10	118.52	19.81	558.56	<LOD	38.42
19-SLPM-S-35	8.77	102.10	101.28	222.79	153,907.06	115.48	336.79	12,236.00	405.98	132.57	903.54	83.15	257.86
19-SLPM-S-36	8.26	155.00	20.01	<LOD	141,703.61	89.50	107.07	18,357.12	213.27	13.07	1,146.86	101.05	120.56
19-SLPM-S-37	8.43	118.50	11.41	210.69	72,314.75	101.85	<LOD	17,950.85	364.70	18.53	1,559.57	106.71	63.84
19-SLPM-S-38	8.49	113.70	49.05	205.73	153,910.73	97.19	37.44	9,686.13	366.21	22.61	751.40	<LOD	57.32
19-SLPM-S-39	8.46	125.00	439.51	235.33	136,318.32	103.47	1,083.69	22,732.64	500.09	313.41	1,024.84	80.16	693.31
19-SLPM-S-40	7.88	2,010.00	<LOD	<LOD	147,670.94	<LOD	<LOD	995.07	95.66	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-S-41	7.92	2,070.00	49.65	<LOD	158,045.05	<LOD	<LOD	1,301.76	<LOD	21.32	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-S-42	8.23	138.30	<LOD	<LOD	171,765.02	87.69	<LOD	7,336.58	237.60	<LOD	799.03	<LOD	41.17
19-SLPM-S-43	8.42	152.30	16.69	<LOD	164,823.84	<LOD	<LOD	12,534.10	196.25	14.04	1,056.75	80.65	64.14
19-SLPM-S-44	8.21	170.70	<LOD	<LOD	161,137.95	97.02	<LOD	8,497.01	190.67	17.14	877.74	<LOD	70.45
19-SLPM-S-45	8.32	190.60	1,190.15	164.49	174,880.02	91.37	1,655.79	21,234.38	452.95	233.82	726.22	75.08	429.37
19-SLPM-S-46	7.96	606.00	89.68	<LOD	148,518.78	85.18	105.05	12,330.20	238.39	202.46	1,014.47	76.03	279.61

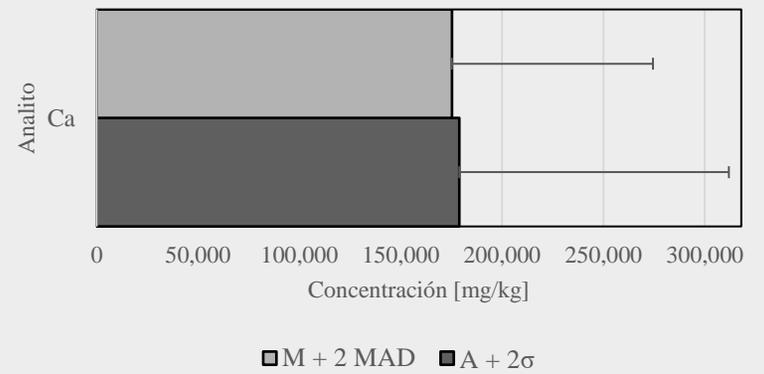
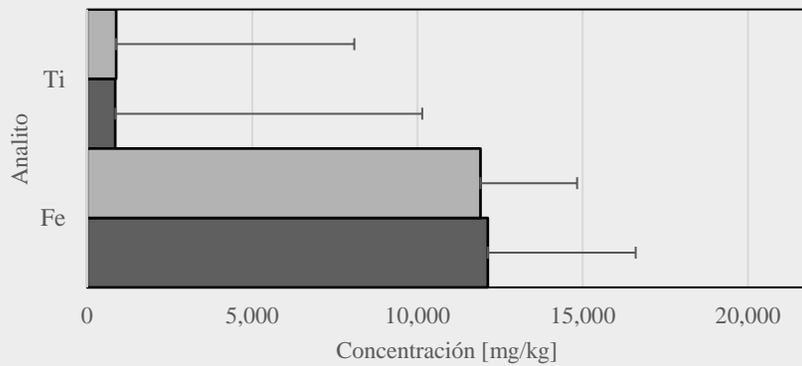
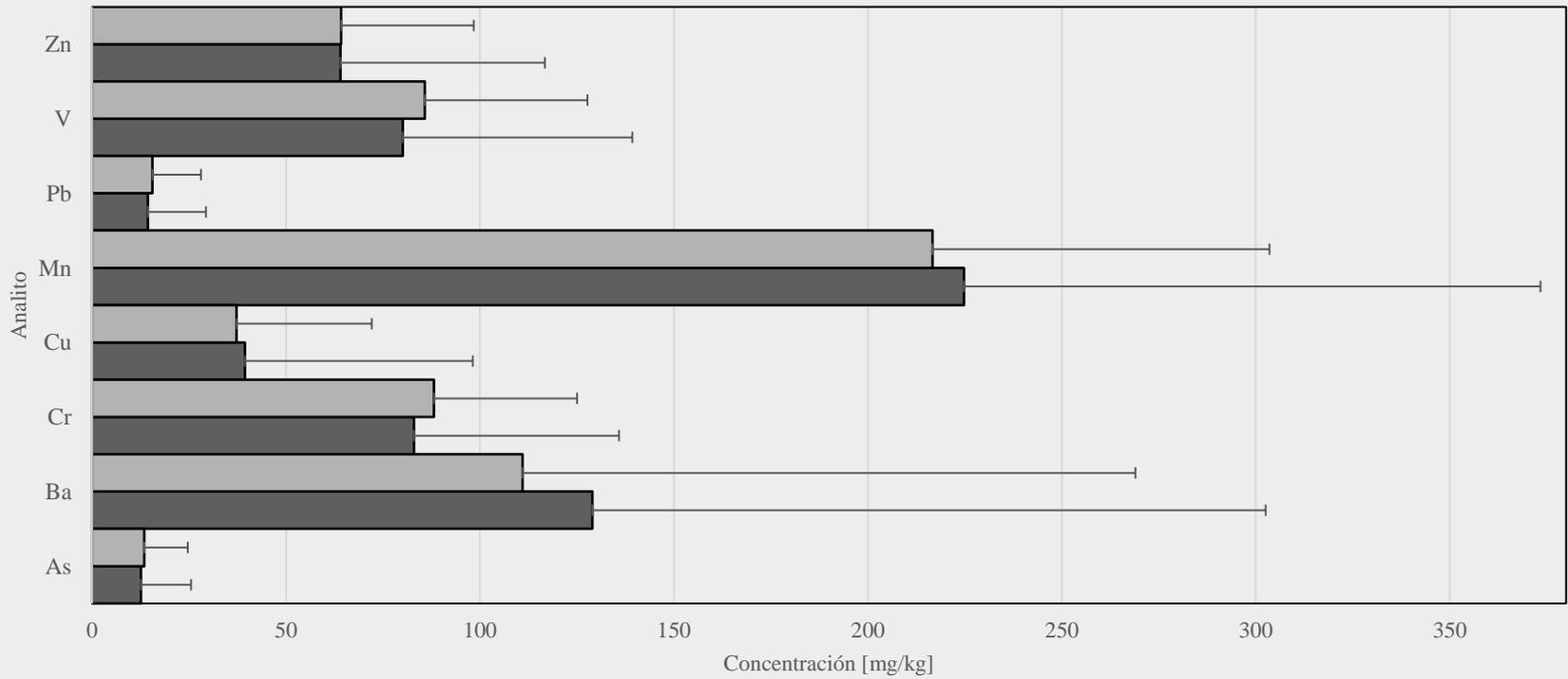
Anexo 7 - Grafico de cajas y bigotes de concentraciones de elementos por tipo de litología.



Comparativa de valores de fondo de suelos en el área de calizas grises

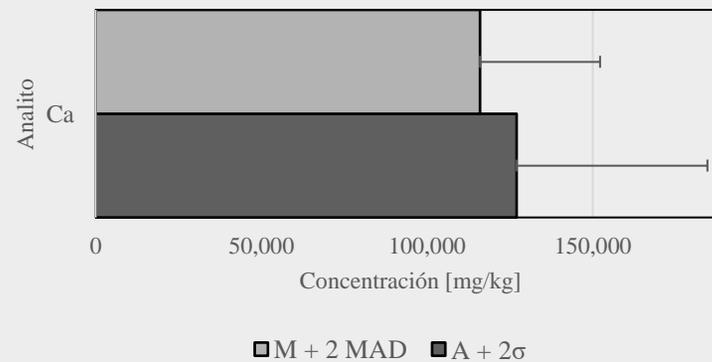
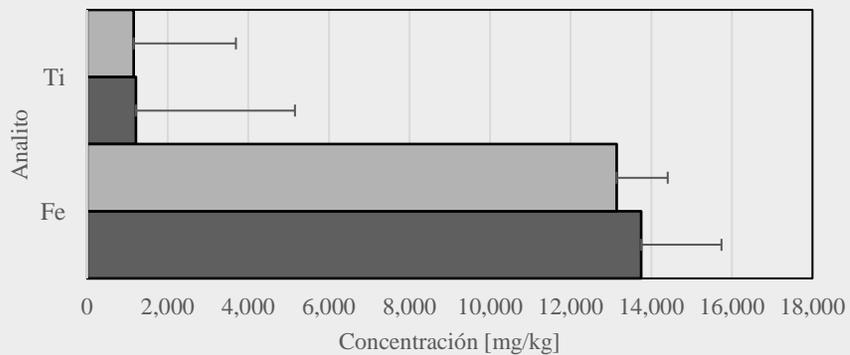
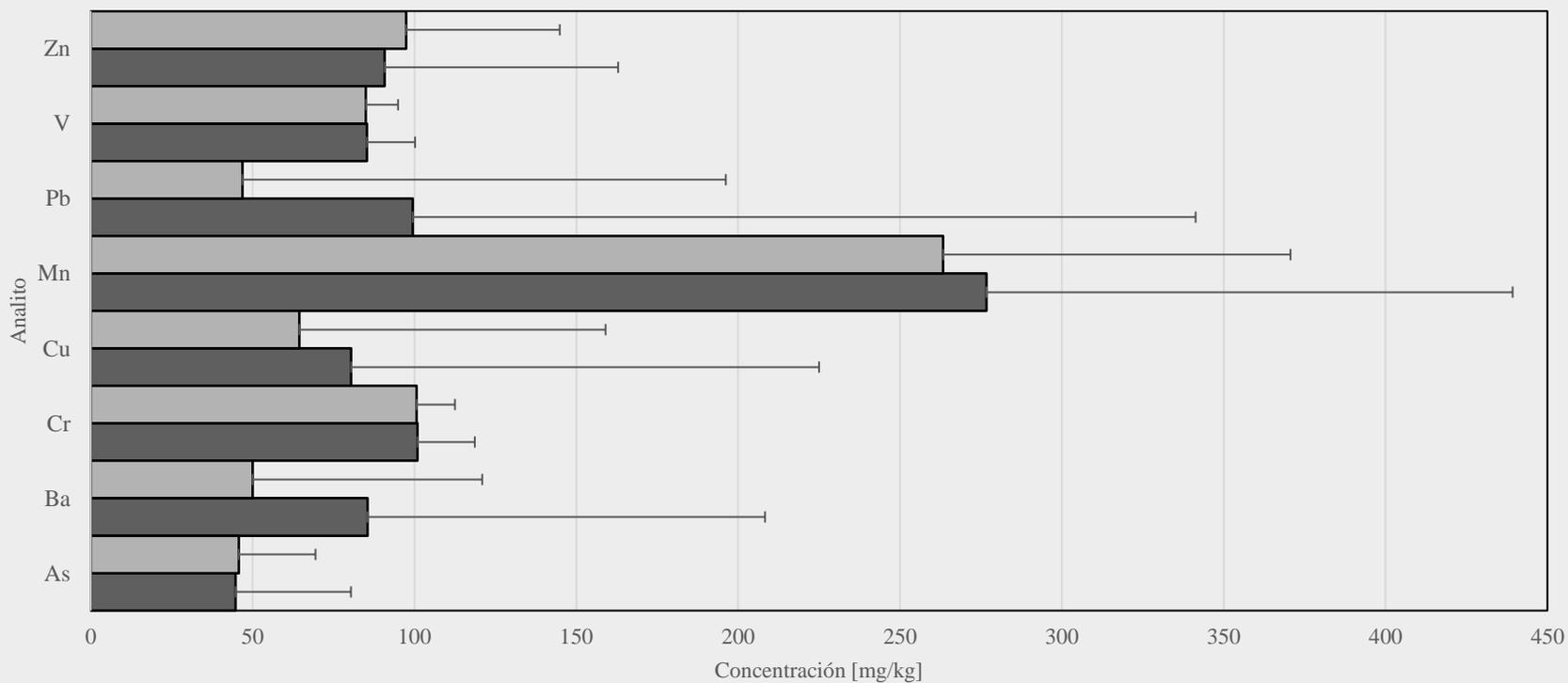


Comparativa de valores de fondo de suelos en el área de caliza-lutita



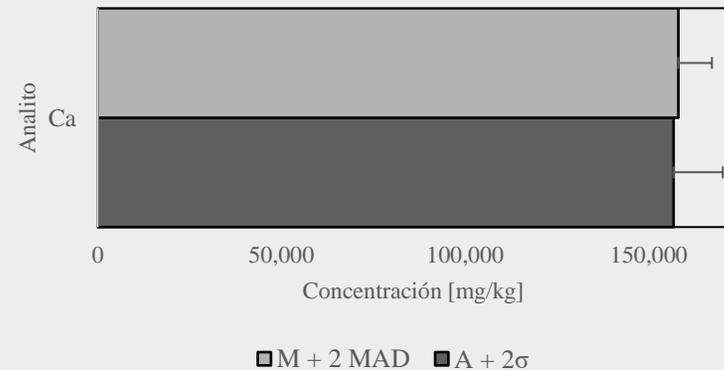
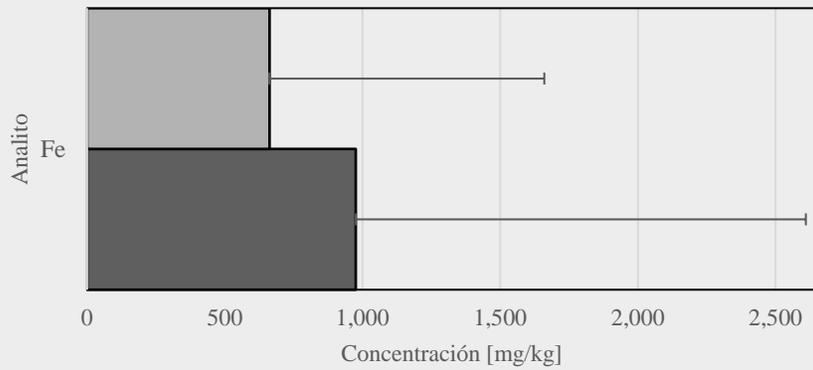
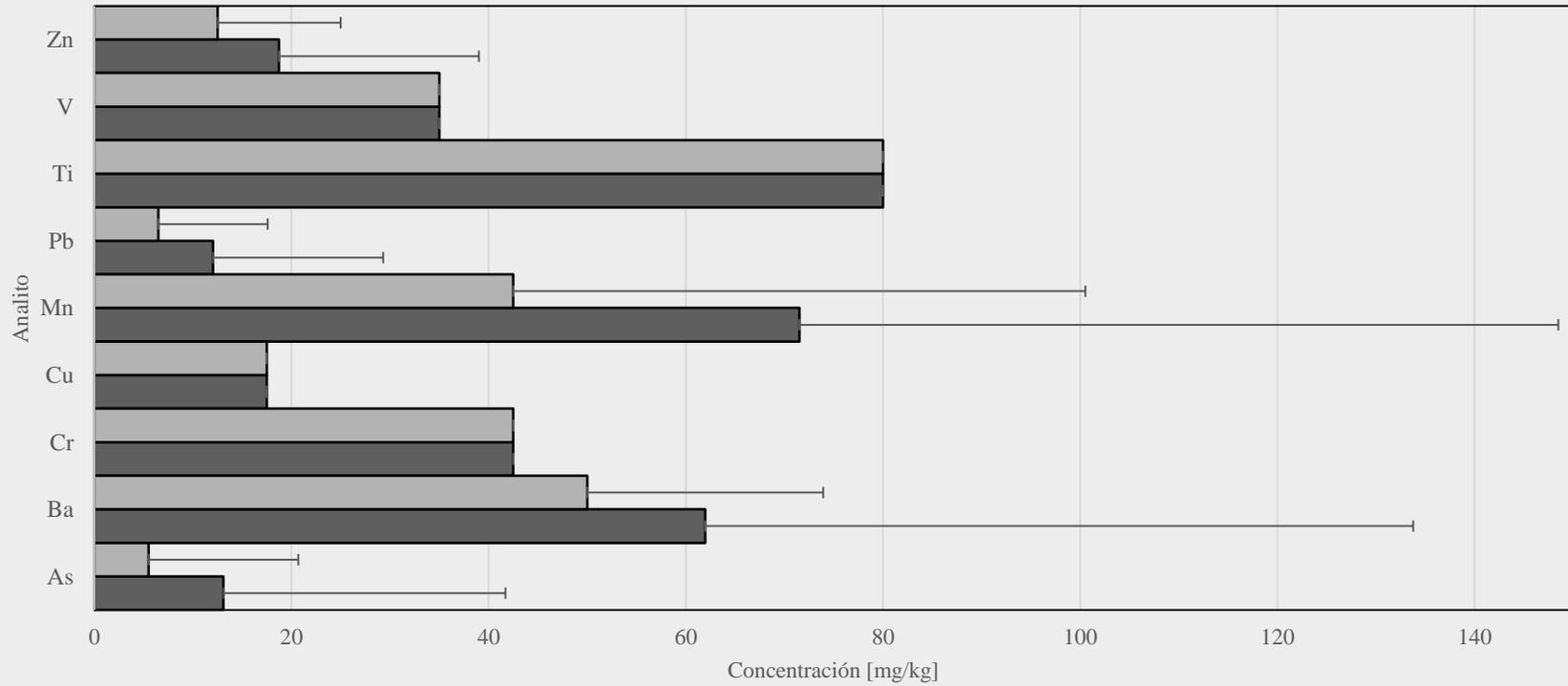
■ M + 2 MAD ■ A + 2σ

Comparativa de valores de fondo de suelos en el área de conglomerado polimíctico



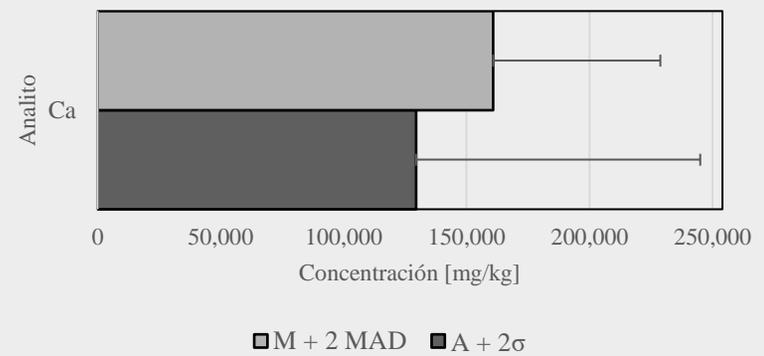
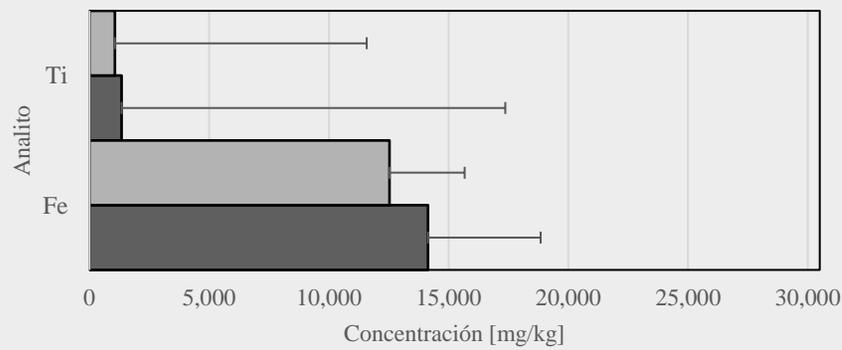
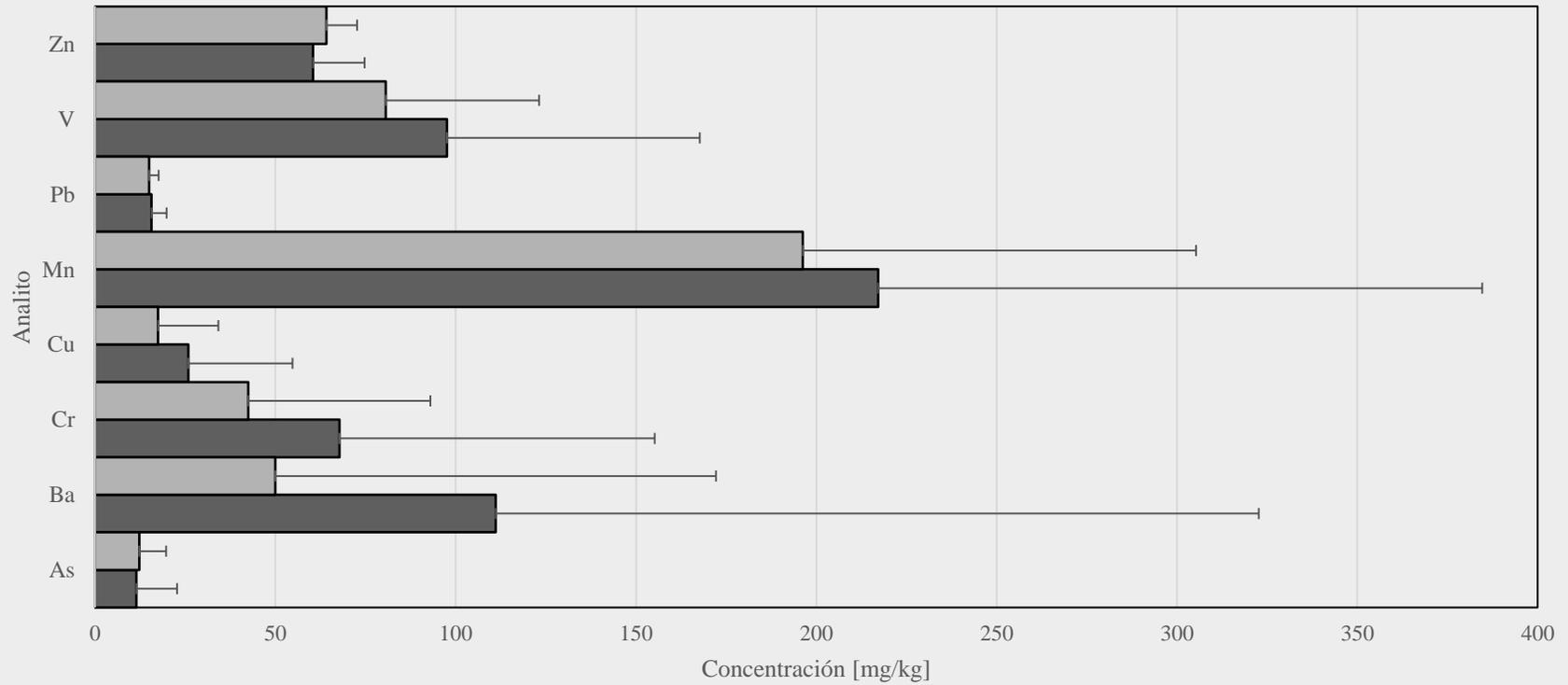
■ M + 2 MAD ■ A + 2σ

Comparativa de valores de fondo de suelos en el área de las rocas lacustres (Yeso)



■ M + 2 MAD ■ A + 2σ

Comparativa de valores de fondo de suelos en el área de lutita-arenisca



□ M + 2 MAD ■ A + 2σ

Anexo 8 - Tabla de datos de análisis de FRX de muestras de sedimentos, parámetros fisicoquímicos y valores del SGM.

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
LOD [mg/kg]			11	100	500	85	35	100	85	13	160	70	25
19-SLPM-FSed-02	8.5	111.8	13.91	238.43	77,477.93	119.05	<LOD	21,785.23	389.22	14.68	2,003.03	125.41	67.85
19-SLPM-FSed-03	8.86	81	<LOD	203.29	158,823.78	97.77	<LOD	12,943.18	346.37	<LOD	1,151.38	85.99	63.50
19-SLPM-FSed-04	8.33	204	20.85	164.84	141,319.09	99.07	46.04	12,360.99	326.46	17.33	1,229.22	86.20	90.48
19-SLPM-FSed-05	8.57	134.1	27.05	266.47	153,065.81	87.85	84.05	11,732.98	348.27	26.72	1,155.11	75.80	88.90
19-SLPM-FSed-07	8.38	184.6	<LOD	189.40	247,506.89	91.64	<LOD	5,192.50	252.65	<LOD	420.82	<LOD	50.89
19-SLPM-FSed-09	8.44	186.1	<LOD	<LOD	70,691.28	108.12	<LOD	15,183.22	288.14	15.63	1,706.51	80.69	100.14
19-SLPM-FSed-10	8.38	155.3	11.82	154.37	131,310.28	104.49	46.66	12,254.77	305.38	20.81	1,186.04	83.53	86.12
19-SLPM-FSed-11	8.52	150.8	20.48	147.19	108,574.84	109.83	48.79	14,603.52	297.19	42.32	1,436.23	108.58	87.95
19-SLPM-FSed-13	8.94	71.5	<LOD	160.86	239,369.81	<LOD	<LOD	7,919.55	272.91	<LOD	354.11	<LOD	36.10
19-SLPM-FSed-15	8.76	107.2	<LOD	188.62	204,075.81	91.22	36.86	9,125.89	239.21	<LOD	822.94	83.92	40.03
19-SLPM-FSed-20	8.61	118.8	56.32	218.58	213,855.98	87.03	42.68	7,686.52	290.03	14.28	666.78	<LOD	40.05
19-SLPM-Sed-01	9.02	141.9	402.97	362.44	202,677.99	95.59	940.95	23,093.26	469.38	64.48	718.95	76.95	304.86
19-SLPM-Sed-02	9.25	695	726.16	348.63	191,067.66	104.21	789.50	21,022.87	455.90	184.20	822.86	87.19	444.14
19-SLPM-Sed-03	8.83	102.2	351.76	175.22	181,844.29	102.72	690.25	16,504.02	534.93	210.07	624.51	85.79	497.86
19-SLPM-Sed-04	7.84	47.4	11.72	207.08	204,855.27	<LOD	36.74	9,992.82	272.37	75.33	681.90	<LOD	58.14
19-SLPM-Sed-05	7.83	1,660	478.92	162.61	142,489.26	<LOD	135.27	10,045.74	334.44	1,011.06	438.49	<LOD	305.53
19-SLPM-Sed-06	7.88	2,350	292.58	<LOD	159,408.76	<LOD	99.28	5,520.86	226.26	264.56	264.02	<LOD	154.97
19-SLPM-Sed-07	7.94	2,230	977.21	130.72	194,252.75	<LOD	59.33	3,193.25	451.44	376.11	<LOD	<LOD	142.89
19-SLPM-Sed-08	7.77	2,070	<LOD	<LOD	81,607.26	<LOD	38.74	12,411.58	289.19	26.68	1,355.65	<LOD	81.18

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
19-SLPM-Sed-09	8.46	122.6	72.92	236.83	235,143.40	93.99	110.41	11,881.81	333.68	79.03	441.88	70.75	160.18
19-SLPM-Sed-10	9.18	63.1	14.37	291.28	190,166.00	<LOD	47.70	10,033.24	309.96	23.91	740.58	79.32	49.14
19-SLPM-Sed-12	7.98	1,617	3,143.03	<LOD	199,156.53	<LOD	41.60	5,431.79	193.54	47.77	173.20	<LOD	60.27
19-SLPM-Sed-13	7.88	2,090	<LOD	<LOD	150,384.34	<LOD	<LOD	704.14	<LOD	17.87	<LOD	<LOD	27.42
19-SLPM-Sed-14	7.9	2,220	<LOD	<LOD	181,588.49	<LOD	<LOD	1,825.16	<LOD	36.64	<LOD	<LOD	32.98
19-SLPM-Sed-15	8.02	1,902	4,321.09	<LOD	269,773.13	<LOD	<LOD	3,217.17	242.27	42.36	<LOD	<LOD	52.21
19-SLPM-Sed-16	8.67	137.8	92.31	191.54	128,453.39	102.70	240.51	15,810.18	412.94	51.32	1,362.25	80.90	152.69
19-SLPM-Sed-17	9.09	48	24.50	351.16	107,691.53	94.12	51.31	22,034.45	295.51	15.54	1,873.56	112.50	77.30
19-SLPM-Sed-18	9.27	68	239.76	392.96	171,946.30	98.76	256.10	18,153.84	643.50	45.38	1,047.39	88.05	134.08
19-SLPM-Sed-19	9.25	83.6	49.29	449.42	147,917.85	101.77	60.91	20,493.01	569.24	20.88	2,422.91	108.60	87.67
19-SLPM-Sed-28	9.06	64.2	<LOD	313.21	164,807.27	100.31	46.19	14,474.51	326.71	<LOD	1,236.23	100.20	48.59
19-SLPM-Sed-29	8.78	114.8	<LOD	273.31	155,184.42	85.78	35.06	13,251.39	249.22	<LOD	1,069.66	90.84	46.77

Analito	X	Y	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
SGM 1	338730	2626213	0.6	137	191,300	1	19	16,800	278	10	90	Sin datos	54
SGM 2	339144	2625653	0.6	136	238,100	1	19	8,200	245	10	103	Sin datos	39
SGM 3	339543	2622433	2.9	150	245,300	1	19	8,800	233	26	131	Sin datos	50
SGM 4	340157	2626409	0.6	150	199,500	1	20	11,500	262	11	224	Sin datos	51
SGM 5	340286	2626798	0.6	181	200,800	1	20	11,100	227	8	217	Sin datos	45
SGM 6	340602	2622763	0.6	244	216,100	1	18	11,200	279	14	292	Sin datos	52
SGM 7	340796	2622412	0.6	210	215,800	1	16	9,400	257	21	169	Sin datos	41
SGM 8	340995	2621348	1.1	193	203,000	1	17	7,800	285	15	85	Sin datos	46
SGM 9	341298	2623750	0.6	195	233,400	1	17	8,900	254	17	129	Sin datos	49

Analito	X	Y	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
SGM 10	341601	2622001	0.6	188	212,100	1	15	7,500	261	11	77.4	Sin datos	50.4
SGM 11	341863	2618415	0.6	123	230,800	1	12	7,600	253	10	77.3	Sin datos	33
SGM 12	343068	2624773	0.6	126	207,500	1	16	9,300	280	2	95.7	Sin datos	48
SGM 13	343202	2621893	0.6	105	205,800	1	19	8,800	297	6	138.9	Sin datos	49
SGM 14	343656	2623349	0.6	134	186,700	1	13	7,100	268	11	60.8	Sin datos	43
SGM 15	343819	2621509	0.6	96	219,800	1	13	7,400	249	3	90.5	Sin datos	45
SGM 16	343982	2623229	0.6	133	182,500	1	15	10,100	281	7	140.6	Sin datos	57
SGM 17	345118	2626639	0.6	136	192,500	1	14	6,900	254	11	61.6	Sin datos	41
SGM 18	345582	2626127	0.6	105	209,300	1	15	8,600	294	4	89.1	Sin datos	42
SGM 19	345988	2622203	0.6	176	203,100	1	15	7,500	270	4	106.8	Sin datos	45
SGM 20	346115	2625693	0.6	120	185,700	1	14	12,600	314	2	227.8	Sin datos	49
SGM 21	346153	2622050	0.6	131	229,100	1	12	6,200	205	9	79	Sin datos	35
SGM 22	346239	2618607	0.6	126	224,900	1	14	9,800	327	15	205.8	Sin datos	47
SGM 23	346575	2625518	0.6	102	244,400	1	10	6,600	204	5	85.7	Sin datos	37
SGM 24	346599	2618892	0.6	105	254,600	1	9	6,500	209	11	88.8	Sin datos	27
SGM 25	346739	2626303	0.6	110	217,800	1	13	7,200	248	10	78.9	Sin datos	42
SGM 26	346831	2626534	0.6	106	217,700	1	13	6,500	231	6	68.3	Sin datos	42
SGM 27	346835	2622777	0.6	114	230,200	1	11	7,900	228	2	99.1	Sin datos	35
SGM 28	346869	2622895	0.6	119	218,100	1	13	8,200	231	10	136.7	Sin datos	42
SGM 29	347112	2624812	0.6	122	261,400	1	9	5,400	162	2	87	Sin datos	28
SGM 30	341794	2611072	0.6	130	219,100	1	20	11,900	241	19	144.9	Sin datos	44
SGM 31	341823	2612215	0.6	220	164,800	1	19	11,000	340	12	164.8	Sin datos	47
SGM 32	342267	2617631	0.6	119	229,200	1	14	8,900	227	12	132.2	Sin datos	42
SGM 33	342352	2614979	0.6	140	219,600	1	13	8,300	225	9	132	Sin datos	32
SGM 34	342543	2615944	0.6	133	205,600	1	14	7,700	231	13	119.9	Sin datos	40
SGM 35	342626	2609873	0.6	147	125,200	1	16	6,600	244	15	75.7	Sin datos	32
SGM 36	342658	2611731	0.6	137	250,200	1	14	8,900	229	10	99.1	Sin datos	33
SGM 37	342950	2613518	0.6	134	197,700	1	18	8,300	233	10	47	Sin datos	35
SGM 38	343201	2616628	0.6	102	288,500	1	8	5,500	156	11	73.9	Sin datos	22

Analito	X	Y	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
SGM 39	343948	2616732	0.6	108	251,400	1	9	7,300	203	20	100.3	Sin datos	28
SGM 40	344902	2614094	0.6	122	210,900	1	13	8,500	270	9	97.8	Sin datos	36
SGM 41	345352	2612306	0.6	118	253,700	1	12	6,000	229	9	43.8	Sin datos	22
SGM 42	345345	2610427	0.6	162	162,200	1	14	9,200	294	10	112.6	Sin datos	37
SGM 43	345371	2610028	0.6	121	225,600	1	13	8,500	219	10	63.5	Sin datos	29
SGM 44	345401	2610148	0.6	141	193,900	1	12	9,600	266	8	145.1	Sin datos	33
SGM 45	345652	2613987	0.6	117	237,700	1	11	7,000	187	8	80.2	Sin datos	28
SGM 46	346122	2617311	0.6	102	228,600	1	11	6,000	186	8	50.9	Sin datos	26
SGM 47	346120	2611612	0.6	149	172,600	1	13	9,800	338	12	86.2	Sin datos	41
SGM 48	346168	2610684	0.6	98	209,800	1	16	6,100	220	14	73.7	Sin datos	36
SGM 49	346230	2615793	0.6	133	187,600	1	12	8,200	269	16	88.3	Sin datos	36
SGM 50	346377	2616147	0.6	121	161,300	1	12	8,800	312	15	98.8	Sin datos	44
SGM 51	346419	2615232	0.6	75	296,100	1	6	4,700	139	7	56.4	Sin datos	14
SGM 52	346495	2613661	0.6	111	215,600	1	9	6,700	202	13	77.5	Sin datos	30
SGM 53	346553	2614492	0.6	113	236,500	1	10	7,500	207	14	115.5	Sin datos	34
SGM 54	319992	2626957	15.35	97.87	195,900	19.12	17.57	8,270	167.81	19.69	Sin datos	Sin datos	48.67
SGM 55	320016	2624445	12.00	129.16	173,280	27.45	23.73	10,798	280.74	30.44	Sin datos	Sin datos	50.55
SGM 56	321491	2626751	18.57	147.72	156,800	28.01	29.08	11,502	301.45	26.61	Sin datos	Sin datos	59.06
SGM 57	320941	2623493	27.54	171.38	149,850	43.25	38.45	16,623	471.46	30.13	Sin datos	Sin datos	65.33
SGM 58	322286	2625238	47.80	171.48	155,870	32.00	42.69	17,305	440.29	32.24	Sin datos	Sin datos	104.31
SGM 59	323578	2624106	134.38	147.94	132,270	42.99	116.30	20,599	434.01	41.54	Sin datos	Sin datos	127.70
SGM 60	324910	2627060	46.51	171.88	156,630	33.59	40.95	16,649	403.95	30.06	Sin datos	Sin datos	69.90
SGM 61	324933	2623553	103.10	180.14	119,720	43.16	142.70	21,098	459.36	42.22	Sin datos	Sin datos	106.84
SGM 62	324809	2622187	529.72	102.37	123,590	28.91	475.60	15,303	270.09	111.87	Sin datos	Sin datos	231.59
SGM 63	324945	2622015	1,225.80	178.10	147,150	46.36	1,133.00	28,030	474.99	674.90	Sin datos	Sin datos	590.63
SGM 64	325309	2621148	1,412.00	72.69	160,350	36.23	1,487.00	21,832	319.30	127.92	Sin datos	Sin datos	374.42
SGM 65	325773	2620099	351.75	87.48	172,010	32.16	140.20	19,036	279.94	504.88	Sin datos	Sin datos	831.39
SGM 66	327517	2625761	68.63	248.06	127,620	33.31	60.17	17,358	469.89	43.45	Sin datos	Sin datos	86.00
SGM 67	327486	2624898	160.14	183.19	119,380	49.48	98.85	21,778	485.72	60.58	Sin datos	Sin datos	106.83

Analito	X	Y	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
SGM 68	327500	2623930	138.36	264.66	144,340	38.82	107.70	20,034	457.71	36.26	Sin datos	Sin datos	89.35
SGM 69	327157	2621863	587.56	110.52	139,960	49.71	496.90	26,078	441.94	72.87	Sin datos	Sin datos	173.37
SGM 70	326970	2621584	1,117.10	87.44	150,750	50.31	960.30	28,217	413.83	179.27	Sin datos	Sin datos	390.51
SGM 71	319975	2615878	25.91	143.67	136,790	34.93	29.08	14,879	358.43	35.07	Sin datos	Sin datos	68.25
SGM 72	320339	2618917	18.22	146.63	117,600	37.38	28.44	14,978	359.75	36.67	Sin datos	Sin datos	64.97
SGM 73	320892	2618335	10.69	201.70	135,050	36.23	29.32	16,794	404.82	22.72	Sin datos	Sin datos	50.36
SGM 74	320317	2617809	19.73	110.19	152,960	28.24	26.58	12,586	258.78	21.68	Sin datos	Sin datos	62.97
SGM 75	320701	2617281	14.81	159.08	149,750	32.44	29.65	16,112	380.66	27.72	Sin datos	Sin datos	50.16
SGM 76	320180	2615221	12.61	154.90	146,980	36.38	34.13	17,483	307.30	40.71	Sin datos	Sin datos	56.22
SGM 77	320619	2611050	88.69	86.01	141,200	24.29	22.85	12,181	280.71	30.32	Sin datos	Sin datos	55.57
SGM 78	320464	2610694	29.51	153.28	79,659	48.97	36.01	21,238	575.21	51.57	Sin datos	Sin datos	89.18
SGM 79	323315	2617386	16.26	149.21	158,500	31.94	30.51	14,786	286.05	26.70	Sin datos	Sin datos	54.61
SGM 80	322916	2616134	41.73	138.61	138,380	31.72	63.04	17,055	318.45	210.84	Sin datos	Sin datos	83.43
SGM 81	324108	2615152	33.51	199.07	128,160	36.56	35.50	17,436	332.75	25.73	Sin datos	Sin datos	54.63
SGM 82	324334	2614167	12.33	201.74	131,540	44.80	34.98	17,212	301.91	27.61	Sin datos	Sin datos	64.70
SGM 83	323647	2610793	14.74	181.40	149,520	32.33	28.16	14,436	324.05	22.69	Sin datos	Sin datos	45.25
SGM 84	323493	2610414	7.72	145.16	157,170	25.79	24.01	12,531	364.68	23.27	Sin datos	Sin datos	37.13
SGM 85	324865	2618763	854.50	187.33	157,960	39.96	197.90	22,640	541.12	1,133.30	Sin datos	Sin datos	1,000.80
SGM 86	324823	2618321	533.23	207.08	184,430	25.92	1,441.00	15,684	282.36	250.37	Sin datos	Sin datos	655.94
SGM 87	325920	2616077	8.23	161.17	147,140	30.89	47.59	14,953	305.35	112.16	Sin datos	Sin datos	71.35
SGM 88	325791	2615359	21.50	240.47	120,410	43.63	37.97	18,057	345.81	26.59	Sin datos	Sin datos	61.86
SGM 89	326186	2614180	11.91	192.34	121,660	43.37	37.24	18,596	331.22	29.56	Sin datos	Sin datos	69.18
SGM 90	326851	2612209	76.09	170.26	133,570	29.93	27.58	13,047	259.69	32.92	Sin datos	Sin datos	54.88
SGM 91	327439	2618498	2,075.30	284.51	115,880	46.65	251.30	28,715	1,871.30	617.13	Sin datos	Sin datos	2,067.00
SGM 92	327577	2617842	412.83	151.69	143,850	37.44	744.30	21,186	400.76	199.64	Sin datos	Sin datos	484.25
SGM 93	327964	2611696	25.01	159.27	146,780	24.78	24.44	11,260	223.37	26.77	Sin datos	Sin datos	50.79

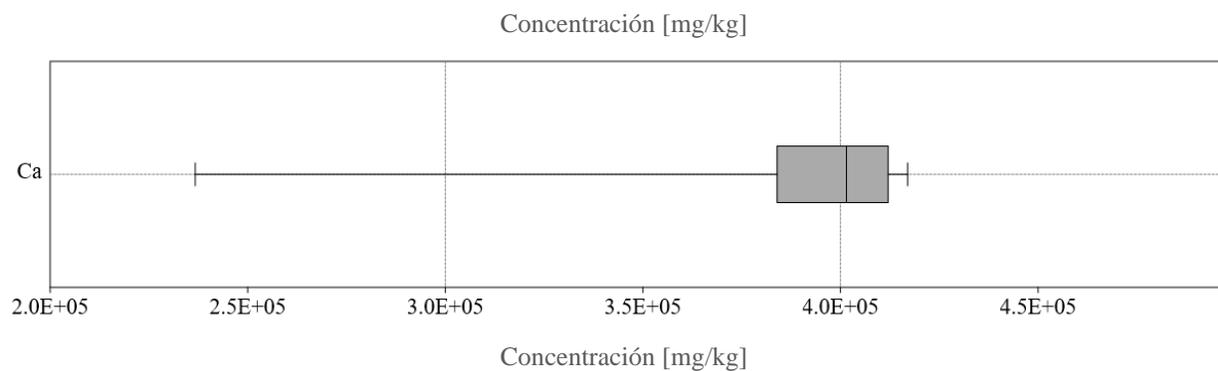
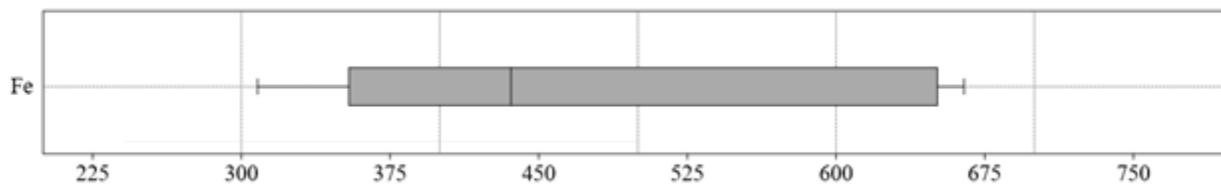
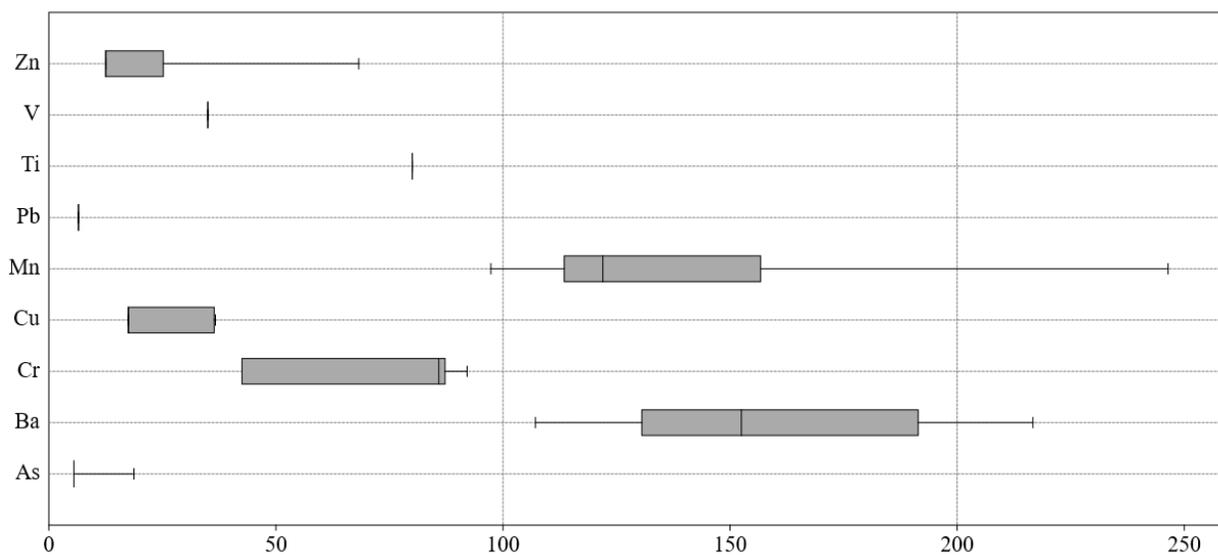
Anexo 9 - Tabla de datos de análisis de FRX y parámetros fisicoquímicos de muestras de roca.

Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
LD [mg/kg]			11	100	500	85	35	100	85	13	160	70	25
19-SLPM-FR-03	9.37	58.7	15.78	354.66	113,579.44	100.65	69.26	14,311.21	410.63	22.35	1,335.31	89.22	176.27
19-SLPM-FR-07	9.66	56.4	<LOD	144.68	401,497.52	92.09	36.33	410.42	121.99	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-FR-08	9.86	45	<LOD	107.14	398,944.76	85.86	<LOD	354.25	119.72	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-FR-13	9.54	49.6	<LOD	176.51	283,205.08	<LOD	35.26	6,465.36	328.84	<LOD	<LOD	<LOD	27.49
19-SLPM-R-01	8.43	987	<LOD	242.63	288,918.02	<LOD	45.86	4,279.25	178.00	<LOD	191.12	<LOD	46.59
19-SLPM-R-02	8.86	186.7	970.86	410.72	93,272.78	119.60	22,884.94	41,924.87	449.12	<LOD	1,105.58	98.43	691.29
19-SLPM-R-04	9.3	50.1	<LOD	209.40	102,296.45	<LOD	64.53	13,760.26	201.03	<LOD	905.83	75.47	48.57
19-SLPM-R-06	8.95	96.6	1,674.99	693.27	334,797.30	92.50	186.19	29,986.68	11,291.56	995.95	<LOD	<LOD	3,663.64
19-SLPM-R-10	9.69	41.1	18.73	216.67	412,057.82	87.24	36.67	651.11	246.46	<LOD	<LOD	<LOD	68.22
19-SLPM-R-11	9.74	48.4	<LOD	130.55	416,965.96	<LOD	<LOD	664.56	113.47	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-R-13	9.42	77	181.18	207.51	326,887.61	103.17	439.51	4,265.24	181.13	41.62	<LOD	<LOD	115.08
19-SLPM-R-15	9.43	56.7	<LOD	203.05	273,104.61	<LOD	45.58	5,107.21	217.00	<LOD	<LOD	<LOD	52.73
19-SLPM-R-17	9.25	93.5	<LOD	125.25	282,535.06	<LOD	<LOD	8,362.20	485.80	<LOD	310.84	<LOD	38.39
19-SLPM-R-18	9.14	78.7	88.17	<LOD	252,626.34	<LOD	70.59	753.29	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-R-20	9.09	101.6	29.53	196.14	282,315.74	<LOD	<LOD	2,634.38	142.53	<LOD	<LOD	<LOD	31.56
19-SLPM-R-21	9.69	47.9	<LOD	191.40	410,036.36	87.11	<LOD	436.03	151.14	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-R-22	9.77	42.7	<LOD	188.73	383,961.56	<LOD	36.41	308.17	156.71	<LOD	<LOD	<LOD	25.17
19-SLPM-R-23	9.2	77.2	<LOD	164.92	295,651.01	101.24	<LOD	2,689.99	124.43	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-R-27	8.98	278	68.93	227.70	361,602.96	<LOD	115.29	1,004.51	117.29	<LOD	<LOD	<LOD	41.66

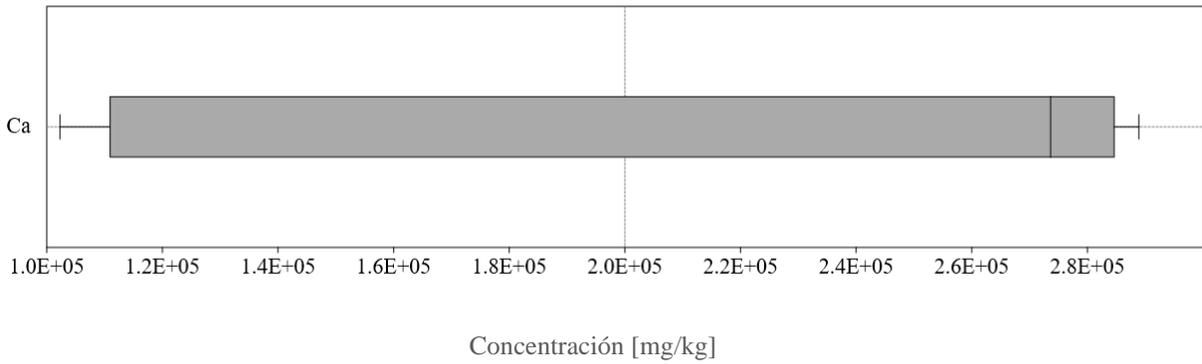
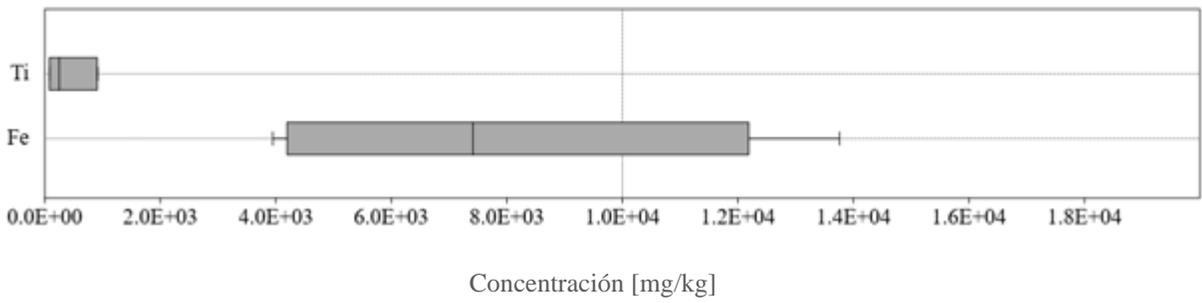
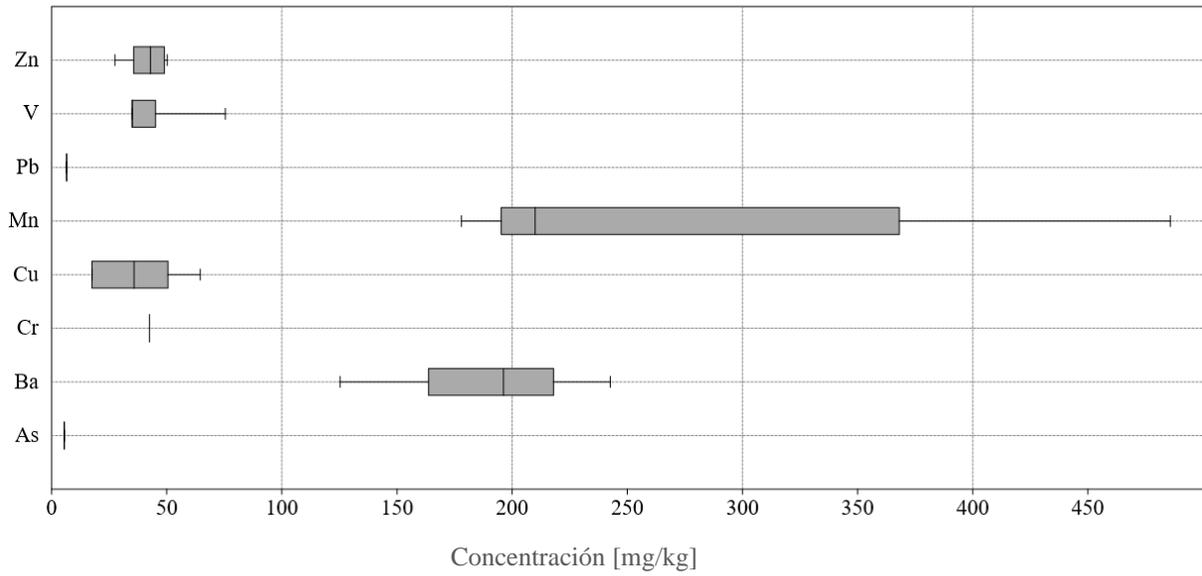
Analito	pH	CE [μS/cm]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Mn [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Ti [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]
19-SLPM-R-28	9.93	758	<LOD	209.73	264,755.13	<LOD	36.37	3,947.60	211.92	<LOD	<LOD	<LOD	39.26
19-SLPM-R-29	9.41	76.9	<LOD	183.03	113,846.79	<LOD	<LOD	11,664.12	208.05	<LOD	915.08	<LOD	50.18
19-SLPM-R-39	9.96	66.5	<LOD	152.50	236,714.35	<LOD	<LOD	517.65	97.33	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
19-SLPM-R-40	9.04	825	94.91	189.79	275,965.63	89.37	115.66	4,117.18	155.57	13.99	<LOD	<LOD	55.24

Anexo 10 - Diagramas de cajas y bigotes (sin cercas interiores) de litologías y mineralización.

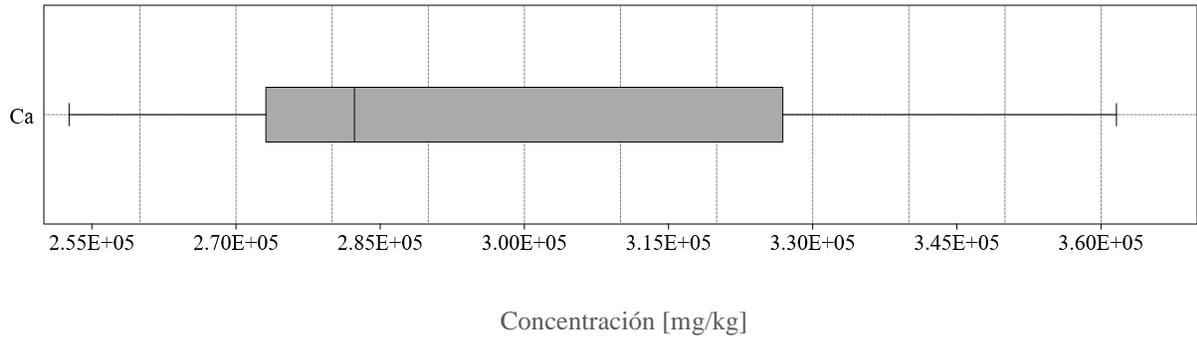
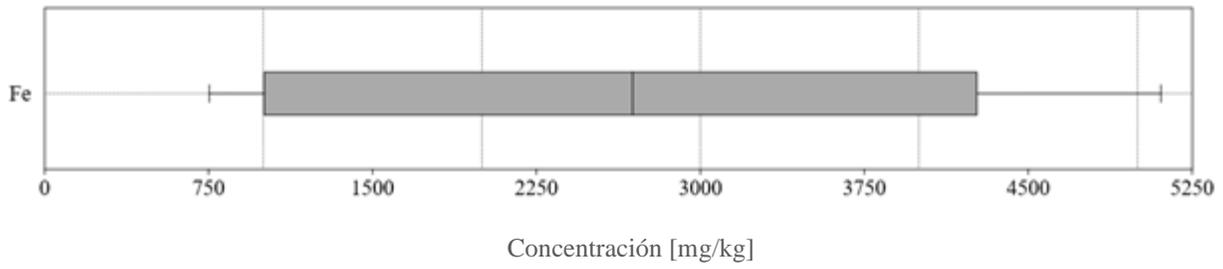
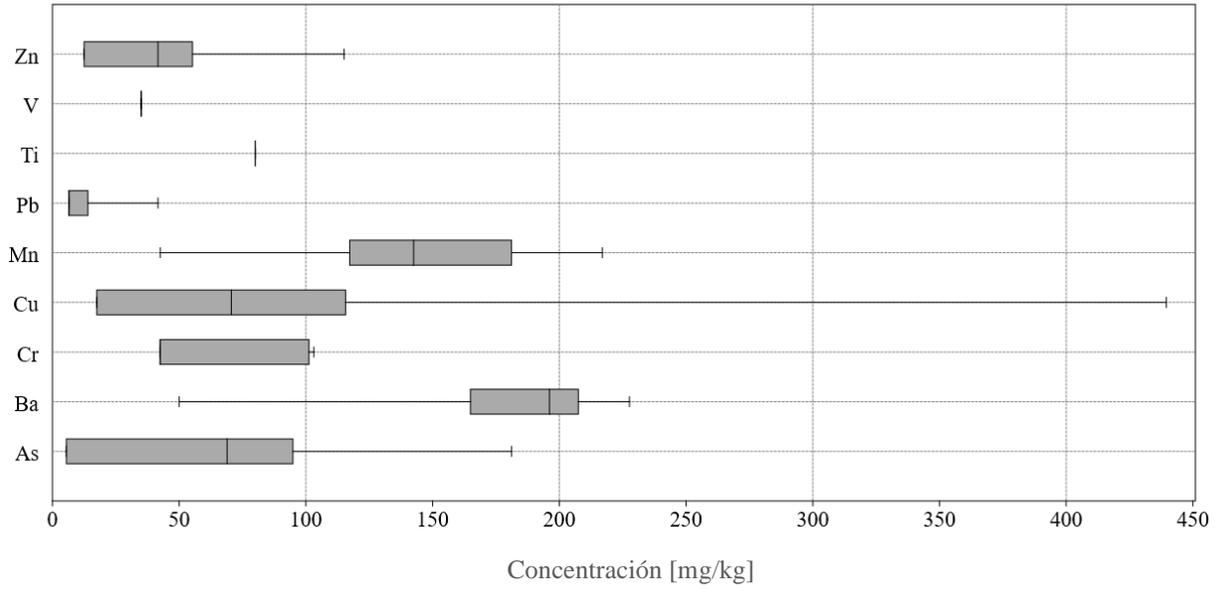
- Calizas Grises



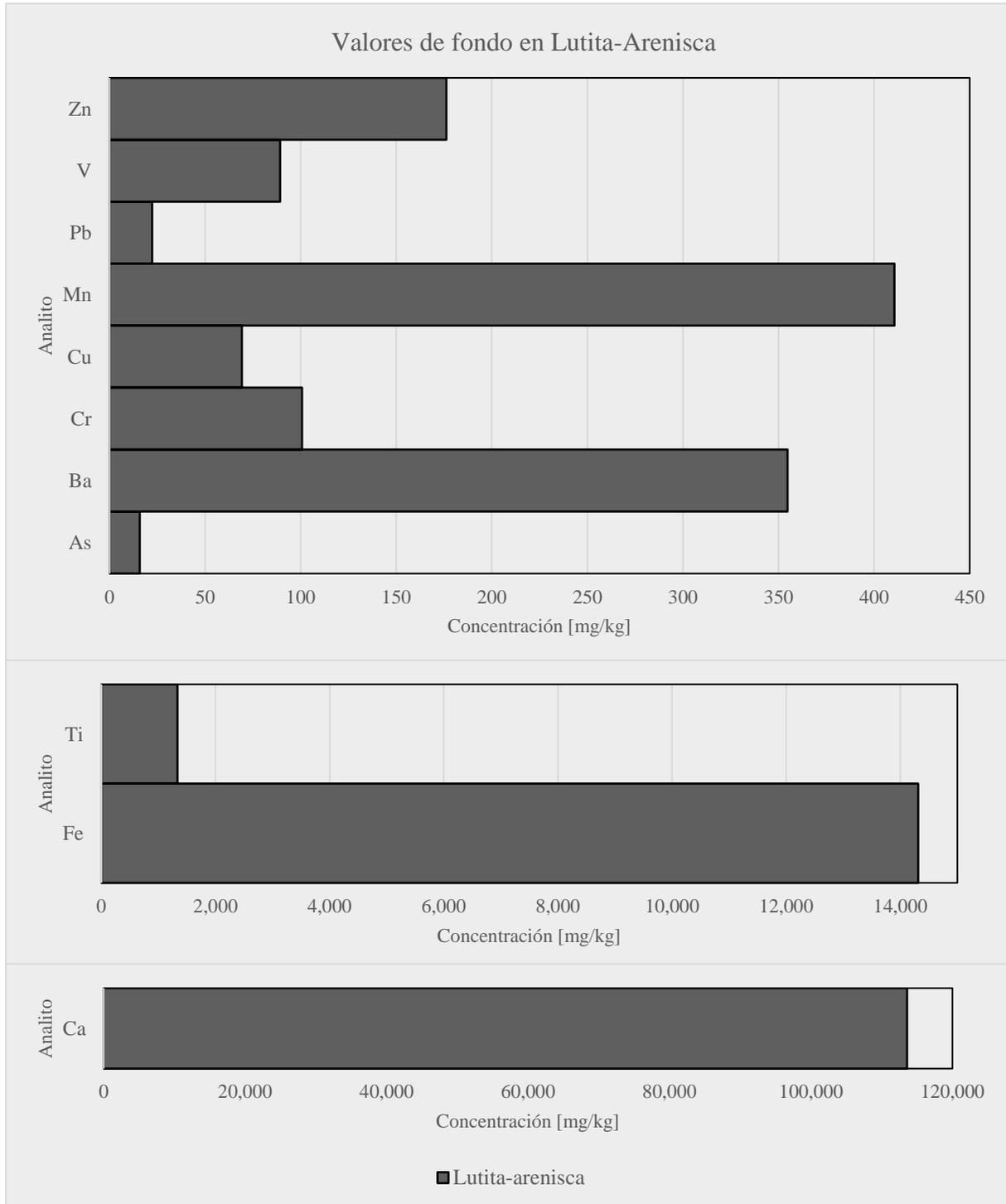
• Caliza-Lutita



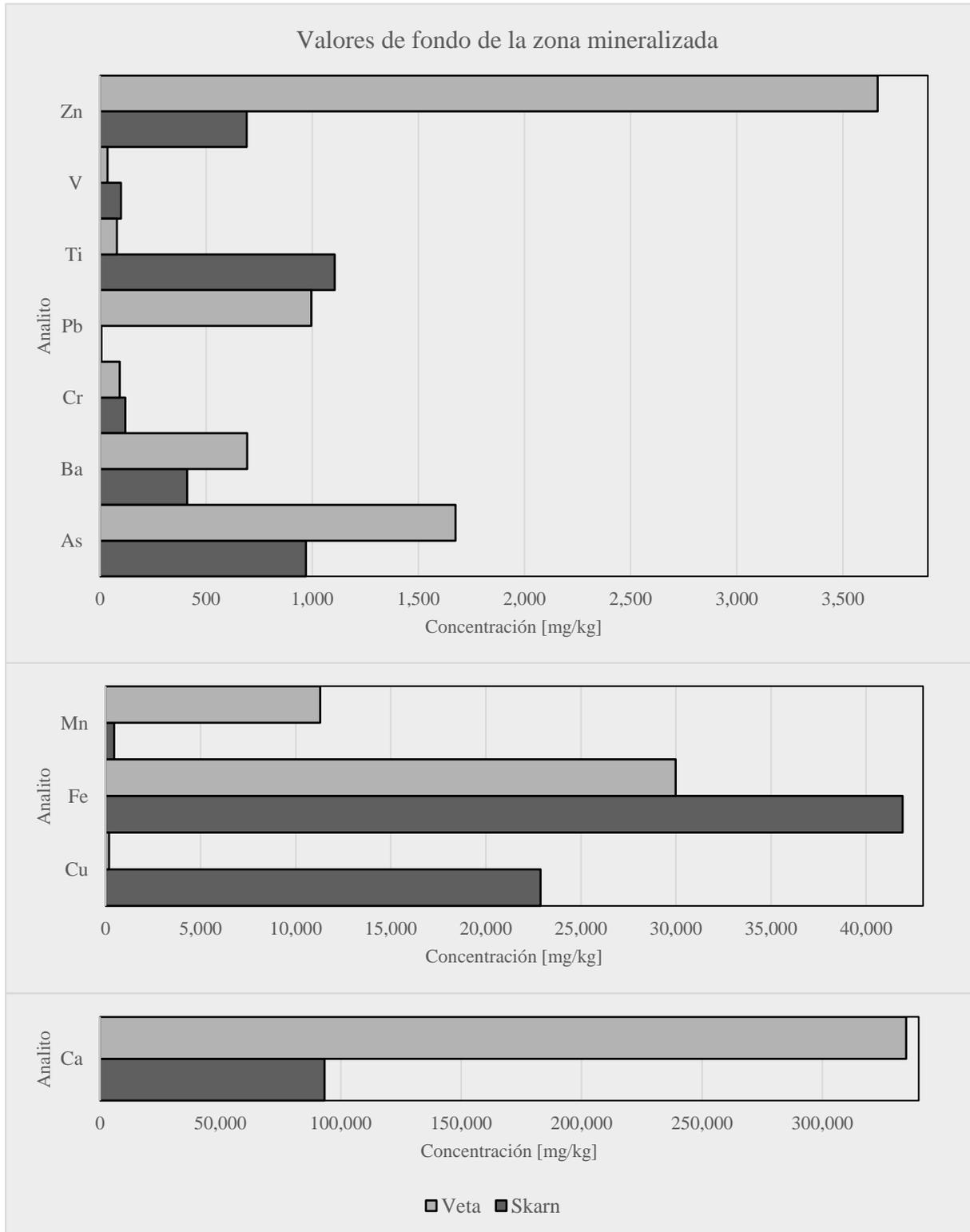
- Conglomerado polimítico



- Lutita-Arenisca



- Mineralización



Anexo 11 - Detalles del muestreo del área de influencia y memoria fotográfica.

Clave de campo	Matriz	Coordenadas UTM		Descripción de la muestra
		X	Y	
20 - SLPM - ZIS - 01	Suelo	329633	2621705	Suelo franco arenoso, color café claro
20 - SLPM - ZIS - 02	Suelo	331596	2621701	Suelo franco limoso, color café grisáceo claro
20 - SLPM - ZIS - 03	Suelo	332600	2621722	Suelo franco limoso, color gris - blanco
20 - SLPM - ZIS - 04	Suelo	326616	2620693	Suelo franco arenoso, color gris
20 - SLPM - ZIS - 05	Suelo	328621	2620700	Suelo franco arenoso, color grisáceo - café claro
20 - SLPM - ZIS - 06	Suelo	329611	2620691	Suelo arenoso, color café claro - grisáceo
20 - SLPM - ZIS - 07	Suelo	331642	2620795	Suelo franco limoso, color café claro
20 - SLPM - ZIS - 08	Suelo	333631	2620655	Suelo franco, color gris - blanco
20 - SLPM - ZIS - 09	Suelo	335550	2620645	Suelo franco limoso, color gris - blanco
20 - SLPM - ZIS - 10	Suelo	338840	2620741	Suelo franco limoso, color café
20 - SLPM - ZIS - 11	Suelo	325542	2619693	Suelo franco, color café
20 - SLPM - ZIS - 12	Suelo	327584	2619914	Suelo arenoso, color café claro
20 - SLPM - ZIS - 13	Suelo	328657	2619702	Suelo arenoso, color café - amarillo
20 - SLPM - ZIS - 14	Suelo	330642	2619620	Suelo franco, color café - naranja claro
20 - SLPM - ZIS - 15	Suelo	331714	2619660	Suelo franco limoso, color café claro
20 - SLPM - ZIS - 16	Suelo	332607	2619691	Suelo franco limoso, color café claro
20 - SLPM - ZIS - 17	Suelo	333655	2619677	Suelo franco limoso, color gris - café
20 - SLPM - ZIS - 18	Suelo	334577	2619685	Suelo franco limoso, color gris - blanco
20 - SLPM - ZIS - 19	Suelo	336601	2619702	Suelo franco limoso, color café - gris blanco
20 - SLPM - ZIS - 20	Suelo	338556	2619657	Suelo franco limoso, color gris - blanco
20 - SLPM - ZIS - 21	Suelo	325554	2618608	Suelo franco limoso, color gris - oscuro
20 - SLPM - ZIS - 22	Suelo	326634	2618686	Suelo franco limoso, color gris - claro
20 - SLPM - ZIS - 23	Suelo	327591	2618601	Suelo franco limoso, color gris - claro
20 - SLPM - ZIS - 24	Suelo	328600	2618712	Suelo franco arenoso, color gris
20 - SLPM - ZIS - 25	Suelo	330535	2618662	Suelo franco limoso, color café - grisáceo claro
20 - SLPM - ZIS - 26	Suelo	331566	2618696	Suelo franco limoso, color gris - claro
20 - SLPM - ZIS - 27	Suelo	332623	2618687	Suelo franco limoso, color café claro
20 - SLPM - ZIS - 28	Suelo	333609	2618689	Suelo franco limoso, color gris
20 - SLPM - ZIS - 29	Suelo	335627	2618675	Suelo franco limoso, color gris - blanco
20 - SLPM - ZIS - 30	Suelo	337607	2618704	Suelo franco limoso, color café claro
20 - SLPM - ZIS - 31	Suelo	326545	2617672	Suelo franco arenoso, color gris - café claro
20 - SLPM - ZIS - 32	Suelo	328632	2617697	Suelo franco arenoso, color gris claro
20 - SLPM - ZIS - 33	Suelo	330620	2617690	Suelo franco limoso, color gris claro
20 - SLPM - ZIS - 34	Suelo	331552	2617651	Suelo franco limoso, color gris
20 - SLPM - ZIS - 35	Suelo	332659	2617482	Suelo arenoso, color café - gris
20 - SLPM - ZIS - 36	Suelo	333638	2617700	Suelo franco limoso, color gris
20 - SLPM - ZIS - 37	Suelo	334577	2617689	Suelo arenoso, color café - gris
20 - SLPM - ZIS - 38	Suelo	331586	2616717	Suelo franco arenoso, color gris claro
20 - SLPM - ZIS - 39	Suelo	336603	2617728	Suelo franco limoso, color blanco

Clave de campo	Matriz	Coordenadas UTM		Descripción de la muestra
		X	Y	
20 - SLPM - ZIS - 40	Suelo	338653	2617715	Suelo franco arenoso, color café claro
20 - SLPM - ZIS - 41	Suelo	325705	2616692	Suelo franco, color café - grisáceo claro
20 - SLPM - ZIS - 42	Suelo	327571	2616705	Suelo arenoso, color gris
20 - SLPM - ZIS - 43	Suelo	329637	2616703	Suelo franco limoso, color gris
20 - SLPM - ZIS - 44	Suelo	333631	2616687	Suelo arenoso, color gris
20 - SLPM - ZIS - 45	Suelo	335703	2616504	Suelo franco limoso, color gris
20 - SLPM - ZIS - 46	Suelo	337618	2616696	Suelo franco limoso, color blanco
20 - SLPM - ZIS - 47	Suelo	332622	2615688	Suelo franco arenoso, color café - gris
20 - SLPM - ZIS - 48	Suelo	332468	2619273	Suelo franco limoso, color gris - café
20 - SLPM - ZIS - 49	Suelo	332135	2618724	Suelo franco arenoso, color café claro
20 - SLPM - ZIS - 50	Suelo	333122	2618169	Suelo franco limoso, color café - rosado



Clave de la muestra Sitio Panorámicas Panorámicas

20 - SLPM -
ZIS - 20



20 - SLPM -
ZIS - 30



20 - SLPM -
ZIS - 40



Clave de la muestra	Sitio	Panorámicas	Panorámicas
---------------------	-------	-------------	-------------

20 - SLPM -
ZIS - 43



20 - SLPM -
ZIS - 46



20 - SLPM -
ZIS - 50



Anexo 12 - Tabla de datos de análisis de FRX y parámetros fisicoquímicos de muestras de la zona de influencia.

Clave de campo	X	Y	pH	CE [μS]	As	Ba	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Ti	V	Zn
					[mg/kg] 11	[mg/kg] 100	[mg/kg] 500	[mg/kg] 85	[mg/kg] 35	[mg/kg] 100	[mg/kg] 85	[mg/kg] 13	[mg/kg] 160	[mg/kg] 70	[mg/kg] 25
20 - SLPM - ZIS - 01	329633	2621705	9.12	84	255.94	494.52	190,767.58	<LOD	295.78	24,123.18	658.67	57.35	1,869.50	78.37	156.07
20 - SLPM - ZIS - 02	331596	2621701	7.88	2,450	84.60	294.82	157,696.68	<LOD	180.44	14,568.69	396.96	110.67	1,619.69	<LOD	134.85
20 - SLPM - ZIS - 03	332600	2621722	8.05	1,948	85.10	<LOD	123,912.04	<LOD	59.28	6,126.13	169.23	218.42	481.88	<LOD	91.94
20 - SLPM - ZIS - 04	326616	2620693	8.51	136	211.26	383.52	128,334.06	<LOD	298.91	27,650.83	588.34	131.34	1,959.77	97.10	301.72
20 - SLPM - ZIS - 05	328621	2620700	8.52	124	87.85	332.80	173,162.08	<LOD	182.33	17,260.68	549.81	111.00	1,610.31	75.52	387.21
20 - SLPM - ZIS - 06	329611	2620691	8.18	143	117.33	311.18	138,574.47	<LOD	301.71	19,134.85	629.42	89.22	1,772.41	89.58	348.23
20 - SLPM - ZIS - 07	331642	2620795	8.20	384	259.56	369.94	238,977.19	<LOD	313.22	13,669.88	415.46	68.23	1,092.89	<LOD	177.78
20 - SLPM - ZIS - 08	333631	2620655	7.87	2,010	49.70	175.61	211,698.54	<LOD	109.64	2,912.59	188.65	385.94	<LOD	<LOD	120.14
20 - SLPM - ZIS - 09	335550	2620645	7.94	2,050	28.30	189.92	193,636.52	<LOD	49.36	3,448.74	156.05	106.17	243.49	<LOD	66.70
20 - SLPM - ZIS - 10	338840	2620741	8.58	109	12.46	225.00	251,433.69	<LOD	<LOD	9,166.82	340.65	39.19	1,080.18	<LOD	62.29
20 - SLPM - ZIS - 11	325542	2619693	7.93	226	341.51	440.53	222,869.57	<LOD	328.68	15,940.83	698.73	950.85	1,099.18	<LOD	698.86
20 - SLPM - ZIS - 12	327584	2619914	8.68	115	1,233.05	1,091.40	241,762.09	<LOD	1,962.48	47,317.18	1,535.77	1,399.46	940.38	<LOD	1,007.34
20 - SLPM - ZIS - 13	328657	2619702	8.68	124	397.92	584.42	227,021.67	<LOD	390.84	21,261.93	1,673.69	440.79	961.78	<LOD	566.42
20 - SLPM - ZIS - 14	330642	2619620	8.51	122	170.69	363.83	250,394.56	<LOD	268.38	12,642.32	461.43	106.79	1,046.21	73.24	283.96
20 - SLPM - ZIS - 15	331714	2619660	8.32	209	1,289.65	579.45	200,105.40	<LOD	349.45	21,260.14	1,669.87	586.02	1,466.58	<LOD	1,509.30
20 - SLPM - ZIS - 16	332607	2619691	8.03	1,996	186.36	215.13	195,377.11	<LOD	173.66	10,740.61	288.19	633.87	992.75	<LOD	306.20
20 - SLPM - ZIS - 17	333655	2619677	7.60	1,690	29.46	172.73	209,389.36	<LOD	35.67	2,034.69	197.37	80.15	<LOD	<LOD	43.97
20 - SLPM - ZIS - 18	334577	2619685	7.50	1,979	17.09	128.00	210,107.73	<LOD	<LOD	1,874.00	<LOD	60.64	<LOD	<LOD	32.10
20 - SLPM - ZIS - 19	336601	2619702	7.25	2,040	58.60	279.80	134,551.11	<LOD	62.14	11,193.20	349.82	147.07	1,511.19	<LOD	124.31
20 - SLPM - ZIS - 20	338556	2619657	7.60	106	<LOD	136.85	102,986.05	<LOD	35.24	16,164.15	352.41	19.37	2,198.27	76.12	98.77
20 - SLPM - ZIS - 21	325554	2618608	7.93	106	331.99	425.83	155,018.56	<LOD	866.20	28,402.68	660.40	283.63	1,798.80	81.17	524.01
20 - SLPM - ZIS - 22	326634	2618686	7.55	553	417.43	390.87	207,870.58	<LOD	328.61	17,994.20	713.71	464.21	1,393.79	88.32	1,481.41
20 - SLPM - ZIS - 23	327591	2618601	7.89	136	173.36	385.10	167,455.92	<LOD	391.08	21,839.90	662.49	188.11	1,632.30	88.42	460.93
20 - SLPM - ZIS - 24	328600	2618712	7.51	177	500.64	410.25	157,754.21	<LOD	221.76	17,108.09	1,218.65	286.24	1,717.71	75.02	838.01
20 - SLPM - ZIS - 25	330535	2618662	7.90	121	114.89	284.77	189,100.17	<LOD	425.75	14,427.06	452.33	155.43	1,445.72	<LOD	342.34
20 - SLPM - ZIS - 26	331566	2618696	7.70	1,891	2,835.70	470.34	149,965.15	<LOD	968.23	40,060.48	1,848.94	1,118.80	1,424.88	85.55	2,791.05
20 - SLPM - ZIS - 27	332623	2618687	7.58	2,120	545.47	344.33	192,759.81	<LOD	307.86	14,497.95	410.86	2,039.71	1,010.37	<LOD	560.90

Clave de campo	X	Y	pH	CE [μ S]	As	Ba	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Ti	V	Zn
					[mg/kg] 11	[mg/kg] 100	[mg/kg] 500	[mg/kg] 85	[mg/kg] 35	[mg/kg] 100	[mg/kg] 85	[mg/kg] 13	[mg/kg] 160	[mg/kg] 70	[mg/kg] 25
20 - SLPM - ZIS - 28	333609	2618689	7.42	2,090	160.23	328.59	213,621.02	<LOD	154.27	8,646.82	305.89	239.88	359.36	<LOD	627.32
20 - SLPM - ZIS - 29	335627	2618675	7.39	2,090	14.17	148.78	216,384.96	<LOD	<LOD	1,012.85	109.57	47.13	<LOD	<LOD	<LOD
20 - SLPM - ZIS - 30	337607	2618704	7.58	1,421	158.70	232.70	115,349.23	<LOD	104.25	17,507.24	462.67	359.09	2,026.75	78.21	288.03
20 - SLPM - ZIS - 31	326545	2617672	8.01	63	55.80	305.92	220,575.34	<LOD	131.91	12,981.77	370.66	36.68	1,476.66	<LOD	105.71
20 - SLPM - ZIS - 32	328632	2617697	7.65	122	61.83	117.87	141,488.03	99.11	138.39	11,799.44	383.28	102.04	1,084.07	77.46	145.31
20 - SLPM - ZIS - 33	330620	2617690	7.85	177	34.82	242.58	171,342.58	<LOD	89.15	14,573.96	436.36	73.30	1,735.15	83.76	152.36
20 - SLPM - ZIS - 34	331552	2617651	8.02	91	66.22	373.00	234,842.95	<LOD	116.18	13,039.09	422.93	152.08	1,271.86	<LOD	258.76
20 - SLPM - ZIS - 35	332659	2617482	7.53	1,790	73.21	311.75	185,431.45	<LOD	106.14	13,203.98	347.06	183.57	1,389.34	<LOD	193.91
20 - SLPM - ZIS - 36	333638	2617700	7.61	364	63.52	239.22	167,550.33	<LOD	141.25	13,726.76	313.48	138.69	1,561.35	73.90	227.78
20 - SLPM - ZIS - 37	334577	2617689	7.01	1,132	288.79	212.41	194,853.92	<LOD	197.86	9,473.22	270.42	343.01	825.07	<LOD	398.17
20 - SLPM - ZIS - 38	331586	2616717	7.45	510	72.45	220.93	177,872.52	<LOD	53.54	14,416.06	438.84	68.18	1,527.19	74.14	110.36
20 - SLPM - ZIS - 39	336603	2617728	7.51	1,623	<LOD	166.48	213,197.06	<LOD	<LOD	346.88	95.27	18.48	<LOD	<LOD	<LOD
20 - SLPM - ZIS - 40	338653	2617715	7.26	2,090	94.28	148.08	157,349.41	<LOD	94.32	11,037.85	315.26	450.37	1,075.30	<LOD	225.37
20 - SLPM - ZIS - 41	325705	2616692	7.91	117	27.86	316.37	171,802.93	<LOD	96.72	15,228.56	399.34	276.97	1,573.63	90.17	158.76
20 - SLPM - ZIS - 42	327571	2616705	7.85	89	25.06	313.99	168,332.76	<LOD	58.16	14,702.21	475.71	25.17	1,672.63	78.52	91.36
20 - SLPM - ZIS - 43	329637	2616703	8.05	97	32.38	277.10	175,928.40	<LOD	45.21	14,286.16	419.94	39.41	1,688.13	92.32	87.43
20 - SLPM - ZIS - 44	333631	2616687	7.32	1,557	38.01	329.68	423,068.17	<LOD	56.22	6,545.75	254.60	94.90	260.71	<LOD	168.55
20 - SLPM - ZIS - 45	335703	2616504	7.36	2,060	88.01	341.48	143,742.95	<LOD	211.71	13,313.61	537.95	865.39	1,420.94	<LOD	467.40
20 - SLPM - ZIS - 46	337618	2616696	7.37	2,050	<LOD	131.96	217,624.70	<LOD	<LOD	209.41	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
20 - SLPM - ZIS - 47	332622	2615688	7.59	185	44.90	259.24	290,563.96	<LOD	85.54	9,985.54	314.03	142.14	978.79	<LOD	295.40
20 - SLPM - ZIS - 48	332468	2619273	7.94	143	218.45	322.22	185,186.37	<LOD	288.04	14,573.61	472.12	645.18	1,441.63	82.46	453.01
20 - SLPM - ZIS - 49	332135	2618724	7.13	2,410	607.26	650.53	250,034.34	<LOD	399.82	27,734.45	988.36	531.07	1,008.78	<LOD	1,940.10
20 - SLPM - ZIS - 50	333122	2618769	7.44	2,080	3,288.81	2,662.48	91,579.64	<LOD	906.56	101,753.26	4,487.79	16,556.50	1,864.77	99.30	3,891.87

Anexo 13 - Tablas de criterios para evaluar la contaminación.

- Índice de geoacumulación

IG Muestra Fondo [mg/kg]	Índice de geoacumulación (As)				Índice de geoacumulación (Pb)			
	NOM 147 22	TIF 47	M + 2 MAD 33	A& A 5	NOM 147 400	TIF 59	M + 2 MAD 49	A& A 10
FS-02	0	0	0	1	0	0	0	1
FS-03	0	0	0	0	0	0	0	0
FS-04	0	0	0	2	0	0	0	1
FS-05	1	0	0	3	0	0	0	1
FS-06	0	0	0	0	0	0	0	0
FS-07	0	0	0	0	0	0	0	1
FS-08	0	0	0	1	0	0	0	2
FS-09	0	0	0	0	0	0	0	0
FS-10	0	0	0	1	0	0	0	1
FS-11	0	0	0	2	0	0	0	2
FS-13	0	0	0	0	0	0	0	0
FS-15	0	0	0	2	0	0	0	1
FS-20	1	0	1	4	0	0	0	0
S-01	0	0	0	2	0	0	0	3
S-02	6	6	6	6	0	0	0	1
S-03	3	2	2	5	0	0	0	3
S-04	0	0	0	2	0	2	2	4
S-05	0	0	0	0	0	0	0	1
S-06	0	0	0	1	0	0	0	1
S-07	0	0	0	2	0	0	0	0
S-08	0	0	0	0	0	0	0	0
S-09	0	0	0	2	0	0	0	0
S-10	0	0	0	2	0	0	0	1
S-11	6	6	6	6	1	3	4	6
S-12	3	2	2	5	0	1	2	4

IG Muestra	Índice de geoacumulación (As)				Índice de geoacumulación (Pb)			
	NOM 147	TIF	M + 2 MAD	A& A	NOM 147	TIF	M + 2 MAD	A& A
Fondo [mg/kg]	22	47	33	5	400	59	49	10
S-13	2	1	1	4	0	1	1	4
S-14	0	0	0	1	0	0	0	0
S-15	0	0	0	2	0	0	0	2
S-16	0	0	0	2	0	0	0	2
S-17	0	0	0	0	0	0	0	0
S-18	1	0	0	3	0	0	0	2
S-19	0	0	0	0	0	0	0	1
S-20	0	0	0	1	0	0	0	1
S-21	0	0	0	0	0	0	0	1
S-22	0	0	0	1	0	0	0	2
S-23	0	0	0	0	0	0	0	0
S-24	0	0	0	0	0	0	0	1
S-25	2	1	2	4	0	0	0	2
S-26	0	0	0	2	0	0	0	1
S-27	2	1	2	4	0	0	1	3
S-28	0	0	0	2	0	0	0	1
S-29	0	0	0	0	0	0	0	0
S-30	6	6	6	6	2	5	5	6
S-31	3	2	2	5	0	0	0	2
S-32	3	2	2	5	0	3	3	5
S-33	2	1	1	4	0	2	2	4
S-34	0	0	0	0	0	0	0	1
S-35	2	1	2	4	0	1	1	4
S-36	0	0	0	2	0	0	0	0
S-37	0	0	0	1	0	0	0	1
S-38	1	0	0	3	0	0	0	1
S-39	4	3	4	6	0	2	3	5
S-40	0	0	0	0	0	0	0	0

IG Muestra	Índice de geoacumulación (As)				Índice de geoacumulación (Pb)			
	NOM 147	TIF	M + 2 MAD	A & A	NOM 147	TIF	M + 2 MAD	A & A
Fondo [mg/kg]	22	47	33	5	400	59	49	10
S-41	1	0	1	3	0	0	0	1
S-42	0	0	0	0	0	0	0	0
S-43	0	0	0	2	0	0	0	0
S-44	0	0	0	0	0	0	0	1
S-45	6	5	5	6	0	2	2	4
S-46	2	1	1	4	0	2	2	4
ZIS - 01	3	2	3	6	0	0	0	2
ZIS - 02	2	1	1	4	0	1	1	3
ZIS - 03	2	1	1	4	0	2	2	4
ZIS - 04	3	2	3	5	0	1	1	4
ZIS - 05	2	1	1	4	0	1	1	3
ZIS - 06	2	1	2	4	0	1	1	3
ZIS - 07	3	2	3	6	0	0	0	3
ZIS - 08	1	0	1	3	0	3	3	5
ZIS - 09	0	0	0	2	0	1	1	3
ZIS - 10	0	0	0	1	0	0	0	2
ZIS - 11	4	3	3	6	1	4	4	6
ZIS - 12	6	5	5	6	2	4	5	6
ZIS - 13	4	3	4	6	0	3	3	5
ZIS - 14	3	2	2	5	0	1	1	3
ZIS - 15	6	5	5	6	0	3	3	6
ZIS - 16	3	2	2	5	1	3	4	6
ZIS - 17	0	0	0	2	0	0	1	3
ZIS - 18	0	0	0	2	0	0	0	3
ZIS - 19	1	0	1	3	0	1	2	4
ZIS - 20	0	0	0	0	0	0	0	1
ZIS - 21	4	3	3	6	0	2	2	5
ZIS - 22	4	3	4	6	0	3	3	5

IG Muestra	Índice de geoacumulación (As)				Índice de geoacumulación (Pb)			
	NOM 147	TIF	M + 2 MAD	A& A	NOM 147	TIF	M + 2 MAD	A& A
Fondo [mg/kg]	22	47	33	5	400	59	49	10
ZIS - 23	3	2	2	5	0	2	2	4
ZIS - 24	4	3	4	6	0	2	2	5
ZIS - 25	2	1	2	4	0	1	2	4
ZIS - 26	6	6	6	6	1	4	4	6
ZIS - 27	5	3	4	6	2	5	5	6
ZIS - 28	3	2	2	5	0	2	2	4
ZIS - 29	0	0	0	1	0	0	0	2
ZIS - 30	3	2	2	5	0	3	3	5
ZIS - 31	1	0	1	3	0	0	0	2
ZIS - 32	1	0	1	4	0	1	1	3
ZIS - 33	1	0	0	3	0	0	0	3
ZIS - 34	1	0	1	4	0	1	2	4
ZIS - 35	2	1	1	4	0	2	2	4
ZIS - 36	1	0	1	4	0	1	1	4
ZIS - 37	4	3	3	6	0	2	3	5
ZIS - 38	2	1	1	4	0	0	0	3
ZIS - 39	0	0	0	0	0	0	0	1
ZIS - 40	2	1	1	4	0	3	3	5
ZIS - 41	0	0	0	2	0	2	2	5
ZIS - 42	0	0	0	2	0	0	0	1
ZIS - 43	0	0	0	3	0	0	0	2
ZIS - 44	1	0	0	3	0	1	1	3
ZIS - 45	2	1	1	4	1	4	4	6
ZIS - 46	0	0	0	0	0	0	0	0
ZIS - 47	1	0	0	3	0	1	1	4
ZIS - 48	3	2	3	5	1	3	4	6
ZIS - 49	5	4	4	6	0	3	3	6
ZIS - 50	6	6	6	6	5	6	6	6

- Factor de enriquecimiento

Analito	FE As		FE Pb		FE As		FE Pb		FE As NOM-147		FE Pb NOM-147		FE As		FE Pb	
	TIF	Clase	TIF	Clase	M+2MAD	Clase	M+2MAD	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase	AA	Clase	AA
FS-02	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	4	EMOD	3	EMOD
FS-03	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	6	ESIG	8	ESIG
FS-04	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	2	EMOD	0	EMIN	15	ESIG	6	ESIG
FS-05	2	EMIN	1	EMIN	2	EMOD	1	EMIN	4	EMOD	0	EMIN	29	EMA	8	ESIG
FS-06	6	ESIG	6	ESIG	7	ESIG	6	ESIG	13	ESIG	1	EMIN	94	EEA	55	EEA
FS-07	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	2	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	6	ESIG	14	ESIG
FS-08	0	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	7	ESIG	9	ESIG
FS-09	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	4	EMOD	2	EMOD
FS-10	0	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	7	ESIG	9	ESIG
FS-11	1	EMIN	2	EMIN	1	EMIN	2	EMIN	2	EMIN	0	EMIN	12	ESIG	14	ESIG
FS-13	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	4	EMOD	3	EMOD
FS-15	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	11	ESIG	5	EMOD
FS-20	3	EMOD	0	EMIN	3	EMOD	0	EMIN	5	ESIG	0	EMIN	39	EMA	4	EMOD
S-01	1	EMIN	3	EMOD	1	EMIN	3	EMOD	2	EMOD	0	EMIN	16	ESIG	25	EMA
S-02	48	EEA	0	EMIN	57	EEA	0	EMIN	96	EEA	0	EMIN	719	EEA	1	EMIN
S-03	6	ESIG	2	EMOD	7	ESIG	2	ESIG	12	ESIG	0	EMIN	88	EEA	20	ESIG
S-04	1	EMIN	7	ESIG	1	EMIN	7	ESIG	2	EMOD	1	EMIN	15	ESIG	69	EEA
S-05	5	ESIG	21	EMA	6	ESIG	21	EMA	10	ESIG	3	EMOD	77	EEA	199	EEA
S-06	10	ESIG	12	ESIG	12	ESIG	12	ESIG	20	ESIG	2	EMIN	148	EEA	113	EEA
S-07	16	ESIG	5	EMOD	19	ESIG	5	ESIG	31	EMA	1	EMIN	232	EEA	47	EEA
S-08	9	ESIG	9	ESIG	11	ESIG	9	ESIG	19	ESIG	1	EMIN	141	EEA	83	EEA
S-09	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	11	ESIG	4	EMOD
S-10	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	2	EMOD	0	EMIN	17	ESIG	11	ESIG
S-11	36	EMA	3	EMOD	42	EEA	3	EMOD	71	EEA	0	EMIN	531	EEA	29	EMA
S-12	6	ESIG	4	EMOD	7	ESIG	4	EMOD	11	ESIG	1	EMIN	82	EEA	37	EMA
S-13	2	EMOD	3	EMOD	3	EMOD	3	EMOD	5	EMOD	0	EMIN	35	EMA	25	EMA
S-14	6	ESIG	3	EMOD	7	ESIG	3	EMOD	11	ESIG	0	EMIN	85	EEA	24	EMA
S-15	1	EMIN	2	EMIN	1	EMIN	2	EMIN	2	EMOD	0	EMIN	17	ESIG	15	ESIG
S-16	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	2	EMIN	0	EMIN	13	ESIG	11	ESIG

Analito	FE As		FE Pb		FE As		FE Pb		FE As NOM-147		FE Pb NOM-147		FE As		FE Pb	
	TIF	Clase	TIF	Clase	M+2MAD	Clase	M+2MAD	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase	AA	Clase	AA	Clase
S-17	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	2	EMIN	0	EMIN	14	ESIG	8	ESIG
S-18	1	EMIN	1	EMIN	2	EMIN	1	EMIN	3	EMOD	0	EMIN	22	EMA	11	ESIG
S-19	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	3	EMOD	4	EMOD
S-20	5	ESIG	9	ESIG	6	ESIG	9	ESIG	10	ESIG	1	EMIN	78	EEA	84	EEA
S-21	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	3	EMOD	6	ESIG
S-22	1	EMIN	2	EMIN	1	EMIN	2	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	9	ESIG	14	ESIG
S-23	0	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	7	ESIG	4	EMOD
S-24	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	3	EMOD	5	ESIG
S-25	3	EMOD	1	EMIN	4	EMOD	1	EMIN	7	ESIG	0	EMIN	49	EEA	8	ESIG
S-26	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	2	EMOD	0	EMIN	17	ESIG	11	ESIG
S-27	6	ESIG	3	EMOD	7	ESIG	3	EMOD	11	ESIG	0	EMIN	85	EEA	29	EMA
S-28	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	2	EMIN	0	EMIN	11	ESIG	9	ESIG
S-29	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	3	EMOD	2	EMOD
S-30	12	ESIG	5	ESIG	15	ESIG	5	ESIG	24	EMA	1	EMIN	182	EEA	50	EEA
S-31	4	EMOD	1	EMIN	5	ESIG	1	EMIN	8	ESIG	0	EMIN	64	EEA	11	ESIG
S-32	7	ESIG	11	ESIG	8	ESIG	12	ESIG	14	ESIG	2	EMIN	105	EEA	107	EEA
S-33	9	ESIG	22	EMA	11	ESIG	22	EMA	18	ESIG	3	EMOD	137	EEA	208	EEA
S-34	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	8	ESIG	14	ESIG
S-35	4	EMOD	4	EMOD	5	ESIG	4	EMOD	8	ESIG	1	EMIN	63	EEA	41	EEA
S-36	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	8	ESIG	3	EMOD
S-37	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	5	EMOD	4	EMOD
S-38	3	EMOD	1	EMIN	3	EMOD	1	EMIN	5	ESIG	0	EMIN	38	EMA	9	ESIG
S-39	10	ESIG	6	ESIG	12	ESIG	6	ESIG	20	ESIG	1	EMIN	147	EEA	52	EEA
S-40	3	EMOD	3	EMOD	3	EMOD	3	EMOD	6	ESIG	0	EMIN	42	EEA	25	EMA
S-41	19	ESIG	7	ESIG	23	EMA	7	ESIG	39	EMA	1	EMIN	290	EEA	62	EEA
S-42	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	6	ESIG	3	EMOD
S-43	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	10	ESIG	4	EMOD
S-44	0	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	5	EMOD	8	ESIG
S-45	29	EMA	4	EMOD	34	EMA	5	EMOD	57	EEA	1	EMIN	426	EEA	42	EEA
S-46	4	EMOD	7	ESIG	4	EMOD	7	ESIG	7	ESIG	1	EMIN	55	EEA	62	EEA
ZIS-01	5	ESIG	1	EMIN	6	ESIG	1	EMIN	11	ESIG	0	EMIN	81	EEA	9	ESIG

Analito	FE As		FE Pb		FE As		FE Pb		FE As NOM-147		FE Pb NOM-147		FE As		FE Pb	
	TIF	Clase	TIF	Clase	M+2MAD	Clase	M+2MAD	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase	AA	Clase	AA	Clase
ZIS-02	3	EMOD	3	EMOD	4	EMOD	3	EMOD	6	ESIG	0	EMIN	44	EEA	29	EMA
ZIS-03	7	ESIG	14	ESIG	8	ESIG	15	ESIG	14	ESIG	2	EMIN	106	EEA	135	EEA
ZIS-04	4	EMOD	2	EMIN	5	EMOD	2	EMIN	8	ESIG	0	EMIN	58	EEA	18	ESIG
ZIS-05	3	EMOD	3	EMOD	3	EMOD	3	EMOD	5	ESIG	0	EMIN	39	EMA	24	EMA
ZIS-06	3	EMOD	2	EMIN	4	EMOD	2	EMIN	6	ESIG	0	EMIN	47	EEA	18	ESIG
ZIS-07	10	ESIG	2	EMOD	12	ESIG	2	EMOD	19	ESIG	0	EMIN	144	EEA	19	ESIG
ZIS-08	9	ESIG	54	EEA	10	ESIG	54	EEA	17	ESIG	7	ESIG	130	EEA	504	EEA
ZIS-09	4	EMOD	12	ESIG	5	EMOD	13	ESIG	8	ESIG	2	EMIN	62	EEA	117	EEA
ZIS-10	1	EMIN	2	EMIN	1	EMIN	2	EMIN	1	EMIN	0	EMIN	10	ESIG	16	ESIG
ZIS-11	11	ESIG	24	EMA	13	ESIG	24	EMA	22	EMA	3	EMOD	163	EEA	227	EEA
ZIS-12	13	ESIG	12	ESIG	16	ESIG	12	ESIG	26	EMA	2	EMIN	198	EEA	112	EEA
ZIS-13	10	ESIG	8	ESIG	11	ESIG	8	ESIG	19	ESIG	1	EMIN	142	EEA	79	EEA
ZIS-14	7	ESIG	3	EMOD	8	ESIG	3	EMOD	14	ESIG	0	EMIN	103	EEA	32	EMA
ZIS-15	31	EMA	11	ESIG	37	EMA	11	ESIG	61	EEA	2	EMIN	461	EEA	105	EEA
ZIS-16	9	ESIG	24	EMA	11	ESIG	24	EMA	18	ESIG	3	EMOD	132	EEA	224	EEA
ZIS-17	7	ESIG	16	ESIG	9	ESIG	16	ESIG	15	ESIG	2	EMOD	110	EEA	150	EEA
ZIS-18	5	EMOD	13	ESIG	6	ESIG	13	ESIG	9	ESIG	2	EMIN	69	EEA	123	EEA
ZIS-19	3	EMOD	5	ESIG	3	EMOD	5	ESIG	5	ESIG	1	EMIN	40	EMA	50	EEA
ZIS-20	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	0	EMIN	3	EMOD	5	EMOD
ZIS-21	6	ESIG	4	EMOD	7	ESIG	4	EMOD	12	ESIG	1	EMIN	89	EEA	38	EMA
ZIS-22	12	ESIG	10	ESIG	14	ESIG	11	ESIG	24	EMA	1	EMIN	176	EEA	98	EEA
ZIS-23	4	EMOD	3	EMOD	5	EMOD	4	EMOD	8	ESIG	0	EMIN	60	EEA	33	EMA
ZIS-24	15	ESIG	7	ESIG	18	ESIG	7	ESIG	30	EMA	1	EMIN	222	EEA	64	EEA
ZIS-25	4	EMOD	4	EMOD	5	EMOD	4	EMOD	8	ESIG	1	EMIN	61	EEA	41	EEA
ZIS-26	36	EMA	11	ESIG	43	EEA	11	ESIG	72	EEA	2	EMIN	538	EEA	106	EEA
ZIS-27	19	ESIG	57	EEA	23	EMA	58	EEA	38	EMA	8	ESIG	286	EEA	535	EEA
ZIS-28	9	ESIG	11	ESIG	11	ESIG	11	ESIG	19	ESIG	2	EMIN	141	EEA	105	EEA
ZIS-29	7	ESIG	19	ESIG	8	ESIG	19	ESIG	14	ESIG	3	EMOD	106	EEA	177	EEA
ZIS-30	5	EMOD	8	ESIG	6	ESIG	8	ESIG	9	ESIG	1	EMIN	69	EEA	78	EEA
ZIS-31	2	EMOD	1	EMIN	3	EMOD	1	EMIN	4	EMOD	0	EMIN	33	EMA	11	ESIG
ZIS-32	3	EMOD	4	EMOD	3	EMOD	4	EMOD	5	ESIG	0	EMIN	40	EMA	33	EMA

Analito	FE As		FE Pb		FE As		FE Pb		FE As NOM-147		FE Pb NOM-147		FE As		FE Pb	
	TIF	Clase	TIF	Clase	M+2MAD	Clase	M+2MAD	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase	AA	Clase	AA	Clase
ZIS-33	1	EMIN	2	EMOD	1	EMIN	2	EMOD	2	EMOD	0	EMIN	18	ESIG	19	ESIG
ZIS-34	3	EMOD	5	EMOD	3	EMOD	5	EMOD	5	ESIG	1	EMIN	39	EMA	44	EEA
ZIS-35	3	EMOD	6	ESIG	3	EMOD	6	ESIG	6	ESIG	1	EMIN	42	EEA	53	EEA
ZIS-36	2	EMOD	4	EMOD	3	EMOD	4	EMOD	5	EMOD	1	EMIN	35	EMA	38	EMA
ZIS-37	16	ESIG	15	ESIG	19	ESIG	15	ESIG	31	EMA	2	EMOD	232	EEA	138	EEA
ZIS-38	3	EMOD	2	EMIN	3	EMOD	2	EMIN	5	ESIG	0	EMIN	38	EMA	18	ESIG
ZIS-39	8	ESIG	22	EMA	10	ESIG	22	EMA	16	ESIG	3	EMOD	121	EEA	202	EEA
ZIS-40	4	EMOD	17	ESIG	5	ESIG	17	ESIG	9	ESIG	2	EMOD	65	EEA	155	EEA
ZIS-41	1	EMIN	7	ESIG	1	EMIN	7	ESIG	2	EMIN	1	EMIN	14	ESIG	69	EEA
ZIS-42	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	2	EMIN	0	EMIN	13	ESIG	7	ESIG
ZIS-43	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	1	EMIN	2	EMOD	0	EMIN	17	ESIG	10	ESIG
ZIS-44	3	EMOD	6	ESIG	4	EMOD	6	ESIG	6	ESIG	1	EMIN	44	EEA	55	EEA
ZIS-45	3	EMOD	26	EMA	4	EMOD	27	EMA	7	ESIG	4	EMOD	50	EEA	247	EEA
ZIS-46	13	ESIG	13	ESIG	16	ESIG	13	ESIG	27	EMA	2	EMIN	200	EEA	118	EEA
ZIS-47	2	EMOD	6	ESIG	3	EMOD	6	ESIG	5	EMOD	1	EMIN	34	EMA	54	EEA
ZIS-48	8	ESIG	18	ESIG	9	ESIG	18	ESIG	15	ESIG	2	EMOD	114	EEA	168	EEA
ZIS-49	11	ESIG	8	ESIG	13	ESIG	8	ESIG	22	EMA	1	EMIN	166	EEA	73	EEA
ZIS-50	16	ESIG	66	EEA	20	ESIG	67	EEA	33	EMA	9	ESIG	246	EEA	618	EEA