

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD HUMANA POR EXPOSICIÓN A METALES EN SUELOS EN TRES POBLACIONES DEL RÍO SONORA: BANÁMICHÍ, HUÉPAC, BAVIÁCORA, SONORA MÉXICO.

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología.



PRESENTA:

DUARTE RODRÍGUEZ DENEBA ANTONIO.

Hermosillo, Sonora, agosto del 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Este trabajo fue realizado con el apoyo del Fideicomiso Río Sonora, a través de la Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad de Sonora, Instituto Tecnológico de Sonora y el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, LANGEM.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la ayuda otorgada durante el periodo 2016 - 2017, sin su apoyo no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

Agradezco profundamente a las personas que formaron parte de este trabajo de investigación, que con su apoyo se logró la culminación de este trabajo.

A la Dra. Diana Meza Figueroa, directora de tesis y de proyecto, por su dedicación y compromiso en todo momento.

A mis sinodales, Dr. Lucas Ocha Landin, Dr. Francisco Romero y Dr. Agustín Gómez por el tiempo dedicado, sus acertadas opiniones y observaciones durante la elaboración de este trabajo de tesis.

Agradezco el apoyo otorgado por la Universidad de Sonora y la Estación Regional Noroeste (ERNO), además de cuerpo académico, por la facilitación del uso de instalaciones, equipo y material en la realización de trabajo.

A los investigadores Dr. Rafael del Río, por su apoyo y logística, al Dr. Jesús Vidal, por su coordinación del posgrado durante mis estudios.

De igual manera agradezco a mis compañeros de grupo, por su apoyo y acertadas sugerencias: Carlos Ibanez, Roberto Ochoa, Francisco Mario, Belem González, Carla Rosas y a los alumnos Ricardo, Daisy, Carmen, Jesica, Cesar y Francisco por el apoyo en trabajo de campo y laboratorio durante la preparación y análisis de muestras.

En especial agradezco de nueva manera a la Dra. Diana Meza, quien más que ser mi directora, fue amiga y consejera las 24 horas.

A mis padres y hermanos que siempre están pendientes y apoyan cada proyecto en el que me involucro, con las mejores observaciones y entusiasmo. A mi familia, mi esposa Belem, por su apoyo incondicional y asesoría en todo momento, a mi hijo David Antonio por su alegría inspiradora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD HUMANA POR EXPOSICIÓN A METALES EN SUELOS EN TRES POBLACIONES DEL RÍO SONORA: BANÁMICHÍ, HUÉPAC, BAVIÁCORA, SONORA MÉXICO. | i |
| ÍNDICE..... | iv |
| INDICE DE FIGURAS | vii |
| INDICE DE TABLAS | xi |
| RESUMEN..... | xii |
| ABSTRACT..... | xiv |
| OBJETIVOS | xvi |
| Objetivo General | xvi |
| Objetivos Específicos..... | xvi |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. MARCO TEÓRICO..... | 3 |
| II.1. Elementos potencialmente tóxicos y efectos en la salud | 3 |
| II.1.1. Arsénico (As)..... | 4 |
| II.1.2. Cobre (Cu) | 4 |
| II.1.3. Cromo (Cr) | 4 |
| II.1.4. Zinc (Zn)..... | 5 |
| II.1.5. Plomo (Pb)..... | 5 |
| II.1.6. Cadmio (Cd) | 5 |
| II.1.7. Manganeseo (Mn)..... | 6 |
| II.1.8. Níquel (Ni)..... | 6 |
| II.2. Principios de la evaluación del riesgo. | 9 |
| II.2.1. Descripción del escenario humano. | 10 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

| | |
|--|----|
| II.2.2. Dosis de Referencia (DdR)..... | 12 |
| II.2.3. Bioaccesibilidad..... | 13 |
| II.2.4. Índice de peligro. | 15 |
| III. ÁREA DE ESTUDIO..... | 17 |
| III.1. Localización de datos generales y demografía..... | 17 |
| III.1.1. Clima. | 23 |
| III.1.2. Geología. | 24 |
| III.1.3. Edafología y uso de suelo..... | 25 |
| IV. METODOLOGIA. | 31 |
| IV.1. Evaluación de riesgo a la salud por exposición a metales..... | 31 |
| IV.1.1. Modelo conceptual para rutas, vías de exposición y receptores..... | 32 |
| IV.1.2. Contaminantes críticos, criterio de selección. | 34 |
| IV.2. Muestreo de suelo superficial..... | 38 |
| IV.3. Preparación de muestra y análisis granulométrico. | 45 |
| IV.3.1. Análisis granulométrico. | 46 |
| IV.4. Técnicas analíticas en análisis de metales..... | 48 |
| IV.4.1. Fluorescencia de rayos x con tubos miniaturizados y control de calidad. | 48 |
| IV.4.2. Bioaccesibilidad. | 52 |
| IV.4.3. Estimación del riesgo. | 54 |
| IV.4.4. Estimación de riesgo por exposición a plomo (Modelo IEUBK). | 57 |
| V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 59 |
| V.1. Análisis textural de suelos y relación con adherencia a manos..... | 59 |
| V.2. Metales y metaloides en suelos. | 64 |
| V.2.1. Distribución de metales por fracción granulométrica..... | 66 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

| | |
|---|-----|
| V.2.3. Concentración de elementos analizados por malla, entre localidades..... | 77 |
| V.3. Bioaccesibilidad de metales..... | 96 |
| V.4. Estimación de riesgo a la salud humana..... | 100 |
| V.4.1. Riesgo por exposición a metales en suelos..... | 100 |
| V.4.2. Estimación de riesgo por exposición a plomo en base al modelo IEUBK..... | 109 |
| VI. CONCLUSIONES | 112 |
| VII. RECOMENDACIONES..... | 114 |
| VIII. REFERENCIAS | 115 |
| IX. ANEXOS | 122 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Porcentaje de población vulnerable en localidades a estudiar, en las poblaciones de Banámichi, Huépac y Banámichi, Sonora..... | 11 |
| Figura 2. Representación esquemática de bioreactividad y biosolubilidad de varios geomateriales. Muchos tipos de materiales como los jales y suelos contienen una variedad de minerales con distintas solubilidades y bioreactividades, de tal manera que la posición de un material en la figura debe considerarse una aproximación. Figura modificada del Capítulo 9.07, Vol. 9, Treatise of Geochemistry (Plumlee & Ziegler, 2007) | 14 |
| Figura 3. Mapa de localización de los municipios y localidades a estudiar, ubicadas en la cuenca del río Sonora | 18 |
| Figura 4. Mapa de localización de la localidad de Banámichi..... | 19 |
| Figura 5. Mapa de localización de la localidad de Huépac..... | 20 |
| Figura 6. Mapa de localización de la localidad de Baviácora..... | 21 |
| Figura 7. Ubicación de localidades muestreadas y zonas con actividad minera en años pasados y recientes en la cuenca del río Sonora. (SGM, 2015)..... | 23 |
| Figura 8. Mapa de localización del municipio y localidad de Banámichi. Figura tomada y modificada de prontuarios (INEGI, 2009)..... | 27 |
| Figura 9. Mapa de localización del municipio y localidad de Huépac. Figura tomada y modificada de prontuarios (INEGI, 2009)..... | 28 |
| Figura 10. Mapa de localización del municipio y localidad de Baviácora. Figura tomada y modificada de prontuarios (INEGI, 2009)..... | 29 |
| Figura 11. Evaluación de riesgo ambiental cuando los receptores incluyen población humana..... | 31 |
| Figura 12. Representación esquemática de las rutas y vías de exposición en un sitio contaminado. Fuente: Anexo J, Guía para orientar los estudios de evaluación de riesgo (SEMARNAT, 2006).... | 33 |
| Figura 13. Modelo conceptual con rutas y vías de exposición para el presente trabajo de investigación..... | 34 |
| Figura 14. Esquema del proceso de selección de contaminantes criterio, basado en SEMARNAT (2006)..... | 35 |
| Figura 15. Ejemplo de distribución sistemática de puntos de muestreo, así como diversidad de zonas de muestreo dentro de una localidad..... | 40 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

| | |
|--|----|
| Figura 16. Localización geografica de los puntos muestreados para la localidad de Banámichi..... | 41 |
| Figura 17. Localización geografica de los puntos muestreados para la localidad de Huépac..... | 42 |
| Figura 18. Localización geografica de los puntos muestreados para la localidad de Baviácora..... | 43 |
| Figura 19. Método de muestreo utilizado para la toma de muestras “tresbolillo”, en un área de 1m ² | 44 |
| Figura 20. Procedimiento para la preparación de las muestras de suelo en el laboratorio. | 45 |
| Figura 21. Tamaño de partículas con respecto al número de tamiz en relación a los distintos tipos de clasificación de tamaños de partículas. USDA – U. S. Department of Agriculture.; CSSC – Canada Soil Sourvey Commitee. ISSS – International Soil SCI. SOC.; ASTM – American Society for Testing & Materials..... | 47 |
| Figura 22. Diámetro de partícula con respecto a la fracción de masa que pasa por la malla. (Tuller y Or, 2004). | 48 |
| Figura 23. Equipo de Fluorescencia de rayos x, utilizado para la obtención de las concentraciones de metales..... | 49 |
| Figura 24. Análisis de precisión y exactitud (porcentaje de diferencia %D), utilizando como ejemplo el estandar NIST 2710a Montana Soil. Los elementos que se encuentran dentro del rango $\pm 20\%$, (Método 6200 US-EPA) serán los que se utilizarán en el presente estudio..... | 52 |
| Figura 25. Equipo utilizado en realización de pruebas de bioaccesibilidad gástrica (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004), localizado en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental de la Universidad Autonoma de México. | 53 |
| Figura 26. Resultados obtenidos por Yamamoto <i>et al.</i> , (2006) y Siciliano <i>et al.</i> , (2010) respectivamente, sobre la distribución del tamaño de partícula adherida a manos. *Figuras tomadas de: Ruby et al (2016)..... | 60 |
| Figura 27. Curva de distribución granulométrica para la localidad de Banámichi. | 62 |
| Figura 28. Curva de distribucion granulometrica para la localidad de Huépac. | 62 |
| Figura 29. Curva de distribucion granulometrica para la localidad de Baviácora. | 62 |
| Figura 30. Comparación de análisis textural entre localidades estudiadas, se observa una tendencia a suelos mayormente arenosos..... | 63 |
| Figura 31. Concentración de metales obtenida en fracción menor a 20 μm (partículas potencialmente adheribles a manos). | 64 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

| | |
|--|-----|
| Figura 32. Diferencias en concentraciones (mg/kg) entre el análisis de la fracción < 250 μm y la fracción < 20 μm | 71 |
| Figura 33. Análisis de tamaño de partícula en referencia a concentración de metales (mg/kg), localidad de Banámichi. | 74 |
| Figura 34. Análisis de tamaño de partícula en referencia a concentración de metales (mg/kg), localidad de Huépac. | 75 |
| Figura 35. Análisis de tamaño de partícula en referencia a concentración de metales (mg/kg), localidad de Baviácora. | 76 |
| Figura 36. Análisis de la concentración (mg/kg) de elementos para las tres localidades evaluadas. | 78 |
| Figura 37. Concentraciones máximas, mínimas y promedio (mg/kg) para las localidades evaluadas. | 80 |
| Figura 38. Concentraciones (máximas, mínimas, promedio) y valores máximos del sitio de referencia, de los metales presentes en muestras de suelo total (mg/Kg) para las tres localidades muestreadas. BAN = Banámichi, HUE = Huépac, BAV = Baviácora, BAC = Bacoáchi (sitio de referencia). | 81 |
| Figura 39. Distribución espacial de arsénico en Banámichi. Muestra total (MT) y fracción <250 μm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad). | 84 |
| Figura 40. Distribución espacial de arsénico en Huépac. Muestra total (MT) y fracción <250 μm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad). | 88 |
| Figura 41. Distribución espacial de arsénico en Baviácora. Muestra total (MT) y fracción <250 μm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad). | 92 |
| Figura 42. Bioaccesibilidad para cobre, manganeso, zinc, plomo y cromo de Banámichi. | 97 |
| Figura 43. Bioaccesibilidad para cobre, manganeso, zinc y plomo de Huépac. | 98 |
| Figura 44. Bioaccesibilidad para cobre, manganeso, zinc, Plomo, cromo de Banámichi. | 99 |
| Figura 45. Gráficas de riesgo (HQ) para niños, por exposición a cobre, manganeso, zinc y arsénico en suelos, en fracción adherible a manos, en Banámichi, Sonora. | 101 |
| Figura 46. Gráficas de riesgo (HQ) para niños, por exposición a cobre, manganeso, zinc y arsénico en suelos, en fracción adherible a manos, en Huépac, Sonora. | 103 |
| Figura 47. Gráficas de riesgo (HQ) para niños, por exposición a cobre, manganeso, zinc y arsénico en suelos, en fracción adherible a manos, en Baviácora, Sonora. | 105 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

| | |
|---|-----|
| Figura 48. Mapa de riesgo integrado para niños expuestos a Mn, Cu, As y Zn en suelos de Banámichi, Sonora. | 107 |
| Figura 49. Mapa de riesgo integrado para niños expuestos a Cu, Mn, As, y Zn en suelos de Huépac, Sonora. | 108 |
| Figura 50. Mapa de riesgo integrado para niños expuestos a Cu, Mn, Zn y As en suelos de Baviácora, Sonora. | 109 |
| Figura 51. Riesgo de plomo en sangre para las localidades de Banámichi, Huépac y Baviácora... | 110 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Ejemplos de metales pesados o metaloides, y sus fuentes potenciales (con énfasis en materiales geogénicos), y efectos en la salud asociados con las principales vías de exposición. | 7 |
| Tabla 2. Descripción del escenario humano por población a estudiar. | 11 |
| Tabla 3. Bases de datos para la obtención del valor de dosis de referencia (DdR). | 12 |
| Tabla 4. Elementos de interés con valor de dosis de referencia (DdR) documentados. | 12 |
| Tabla 5. Descripción de tipos de suelos. | 26 |
| Tabla 6. Resumen de Información fisiográfica de las localidades de estudio. | 30 |
| Tabla 7. Composición química del derrame de solución ácido ferrocuprífera de la mina Buenavista del Cobre. | 33 |
| Tabla 8. Concentraciones de referencia totales (CrT) por tipo de suelo, establecidas en la NOM-147-SEMARNAT_SSA1-2004. | 36 |
| Tabla 9. Números de puntos a muestrear para cada localidad. | 39 |
| Tabla 10. Recuperación de metales en los estándares certificados en matrices de suelos (NIST: 2709 ^a , 2710 ^a , 2711). | 51 |
| Tabla 11. Contaminantes criterio y dosis de referencia. | 56 |
| Tabla 12. Comparativo de valores de los elementos analizados en Banámichi. NR: no reportado .. | 65 |
| Tabla 13. Comparativo de valores de los elementos analizados en Huépac. NR: no reportado | 65 |
| Tabla 14. Comparativo de valores de los elementos analizados en Baviácora. NR: no reportado. .. | 66 |
| Tabla 15. Resultados del análisis de elementos (mg/Kg) por fracción granulométrica en Banámichi. | 67 |
| Tabla 16. Resultados del análisis de elementos (mg/Kg) por fracción granulométrica en Huépac. .. | 68 |
| Tabla 17. Resultados del análisis de elementos (mg/Kg) por fracción granulométrica en Baviácora. | 69 |
| Tabla 18. Concentraciones de elementos asociados y No asociados al derrame. | 72 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

RESUMEN

Se realizó un estudio de cálculo de riesgo a la salud humana en suelos de tres localidades del río Sonora, Banámichi, Huépac y Baviácora, con el objetivo de evaluar la exposición a metales potencialmente tóxicos en suelos residenciales y agrícolas las cuales fueron potencialmente afectadas por el derrame de Buenavista del Cobre en agosto del 2014. Se determinaron las concentraciones de metales en suelos superficiales y su relación con la granulometría, así como su bioaccesibilidad.

Los resultados obtenidos indican que la localidad de Huépac es la que presentó una mayor cantidad de arcillas en sus suelos, por lo que se favorece la re-suspensión de estos. Debido al factor de adherencia en la fracción $<250\ \mu\text{m}$ de suelo puede significar una mayor ingesta de partículas. En esta localidad, las partículas más finas ($<20\ \mu\text{m}$) presentaron una mayor concentración de Pb, As, Cr y Mn; en la localidad de Banámichi presenta mayor concentración de Cu en sus suelos y en la localidad de Baviácora se tiene que el Zn presenta la mayor concentración. En su contraparte, la localidad de Baviácora es la que presenta menores concentraciones de Cu, Cr y Mn. La localidad de Banámichi presenta las menores concentraciones de Pb y As. La fracción $<250\ \mu\text{m}$ (malla <60), presenta los mismos patrones de concentración de metales con respecto a los encontrados la fracción $<20\ \mu\text{m}$.

En el análisis de bioaccesibilidad se encontró que los metales que son mayormente bioaccesibles son el Zn y Pb. Para la localidad de Banámichi se tiene el Zn, para la localidad de Huépac se tiene que los metales más bioaccesibles son Zn y Pb. Finalmente, el Pb, Cr y Zn son los que presentan mayor bioaccesibilidad para la localidad de Baviácora. El 98% de los resultados de bioaccesibilidad para As quedaron por abajo del límite de detección.

En cuanto al análisis de riesgo por exposición a metales (HQ), se encontró que los metales que representan un mayor riesgo son el Mn, Cu y Zn. La estimación del riesgo integrado (HI) para las localidades (peligro de riesgo =1) fue relativamente bajo, teniendo valores

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

cercanos a 0.3 para las localidades Banámichi y Huépac, y de 0.12 para la localidad de Baviácora.

En el análisis de riesgo de plomo en sangre del modelo biocinético IEUBK, se encontró que la localidad que se encuentra con un mayor riesgo a tener valores superiores de 10 microgramos por decilitro de Pb en sangre es mucho mayor en Huépac, con un 7.36%, y en menor medida Baviácora con 0.014%, finalmente Banámichi con solo el 0.0001%.

Es importante que se sigan realizando trabajos de investigación los cuales contribuyan y provean información útil que conlleve a una evaluación completa y estructurada de los riesgos ambientales por exposición a metales en suelos en las distintas localidades de la cuenca del río Sonora, México.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

ABSTRACT

A human health risk evaluation study was carried out in three localities of the Sonora River, Banámichi, Huépac and Baviacora, with the objective of evaluating exposure to potentially toxic metals in residential and agricultural soils that were potentially affected by the Buenavista del Cobre mine spill in August 2014. The concentrations of metals in surface soils and their relationship to granulometry, as well as their bioaccessibility, were determined.

The results obtained indicate that Huépac is the one with the highest amount of clays in its soils, which favors the re-suspension of these in this town. Due to the adhesion factor in the fraction $<250\ \mu\text{m}$ of soil can mean a greater intake of particles. In this locality, the finest particles ($<20\ \mu\text{m}$) presented a higher concentration of Pb, As, Cr and Mn; In the locality of Banámichi it presents a greater concentration of Cu in its soils and in the locality of Baviácora the Zn presents the greater concentration. In contrast, Baviacora is the one with the lowest concentrations of Cu, Cr and Mn. Banámichi presents the lowest concentrations of Pb and As. The fraction of $<250\ \mu\text{m}$ (mesh <60) has the same concentration of metals as the fraction $<20\ \mu\text{m}$.

In the bioaccessibility analysis it was found that metals that are mostly bioaccessible are Zn and Pb. For the locality of Banámichi it is the Zn, for the locality of Huépac the most bioaccessible metals are Zn and Pb. Finally, the Pb, Cr and Zn are metals that present greater bioaccessibility for the locality of Baviácora. 98% of the bioaccessibility results for As were below the limit of detection.

Regarding the risk analysis by exposure to metals (HQ), it was found that the metals that represent a greater risk are Mn, Cu and Zn. The estimation of integrated risk (HI) for localities (hazard risk = 1) was relatively low, with values close to 0.3 for Banámichi and Huépac localities and 0.12 for Baviácora locality.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

In the blood lead risk analysis of the IEUBK biokinetic model, it was found that the locality with a higher risk of having higher values of 10 micrograms per deciliter of Pb in blood is much higher in Huépac, with 7.36% And to a lesser extent Baviacora with 0.014%, finally Banámichi with only 0.0001%.

It is important to continue carrying out research that contributes and provides useful information that leads to a complete and structured assessment of the environmental risks due to exposure to metals in soils in the different localities of the Sonora River Basin, Mexico.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el riesgo a la salud humana por exposición a metales potencialmente tóxicos en suelos residenciales y agrícolas de tres pueblos del río Sonora, los cuales fueron potencialmente afectados por el derrame de la mina Buenavista del Cobre, Cananea Sonora, en agosto del 2014.

Objetivos Específicos

- Determinar las concentraciones de metales y su relación con la granulometría en suelos urbanos y agrícolas de tres localidades.
- Determinar la bioaccesibilidad de metales en las muestras estudiadas para saber si las concentraciones de metales en suelos representan un riesgo a la población.
- Estimar el riesgo a la salud por exposición a metales (As, Pb, Mn, Zn, Cr y Cu), a partir de suelos residenciales.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

I. INTRODUCCIÓN

Se realizó un programa de muestreo de suelos en tres comunidades de la cuenca del río Sonora. Estas localidades se vieron afectadas por el derrame de una solución de sulfato de cobre de la empresa Buenavista del Cobre en Cananea, ocurrido en agosto del 2014, la cual está ubicada en la parte alta de la cuenca del río Sonora. El derrame tuvo origen en la mina Buenavista del Cobre, sobre el río Bacanuchi (tributario del río Sonora). Los contaminantes se dispersaron hacia el sur del estado siguiendo la cuenca del río Sonora, afectado posiblemente todo el cauce del río, así como a las comunidades asentadas a sus márgenes, las cuales dependen de la fuente de agua que representa este río. No existen estudios previos de evaluación de riesgo por exposición a metales en la zona, por lo que a la fecha se desconoce el nivel de riesgo a la salud humana por la posible exposición a elementos potencialmente tóxicos asociados al derrame, ó que ocurren de manera natural en las localidades.

Diversos estudios publicados sobre evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales se centran en el contenido total del metal de interés en la fuente (suelos, aire, agua); sin embargo, existe muy poca documentación de las formas químicas de estos metales y en particular casi no se tienen trabajos publicados que establezcan claramente la asociación de los metales con minerales (geogénico) y su separación de sus formas no naturales (antropogénico), así como su bioaccesibilidad.

La caracterización y distribución espacio-temporal de suelos y material particulado de origen geogénico y su distinción de aquel de origen antropogénico permite entender mejor el comportamiento de las fuentes de área y realizar una estimación del riesgo¹ más adecuada. La sedimentación de partículas previamente suspendidas y la erosión del suelo

¹ Se define como riesgo a la probabilidad de un daño ó pérdida y puede considerarse como un producto de la probabilidad y la severidad de consecuencias específicas. El riesgo ambiental a la salud se define como la posibilidad de que los humanos sufran efectos adversos a su salud como consecuencia de una exposición aguda o crónica a un contaminante ambiental.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

son las dos principales fuentes de polvo en las zonas urbanizadas. Es común que otros materiales se integren a este polvo urbano (materiales antropogénicos), como los desechos industriales, las emisiones del tráfico vehicular y de los sistemas de calefacción, el material producto del deterioro, construcción y renovación de edificios, la corrosión de estructuras metálicas galvanizadas, desgaste de pinturas y esmaltes, etc. (Faiz *et al.*, 2009; Dao *et al.*, 2014); siendo estas fuentes potenciales de elementos tóxicos, obteniendo finalmente suelos urbanos de composición geogénica y antropogénica (Rodrigues *et al.*, 2009; Argyraki y Kelepertzis, 2014). En el caso particular del río Sonora, el análisis de los suelos, considerando zonas no impactadas por localidad (fondo natural geoquímico) permitirá distinguir el aporte natural (rocas y suelos) del antrópico (derrame, otras actividades) y hacer una evaluación de riesgo a salud humana más adecuado.

Diversas concentraciones de metales pesados son de común ocurrencia en el ambiente y como resultado los seres humanos han estado expuestos a estos durante toda su historia. Sin embargo, las actividades antropogénicas como la minería han dado resultado en niveles altos de este tipo de contaminación en el ambiente (Kamunda *et al.*, 2016).

Técnicas como la difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, fluorescencia portátil de rayos X y análisis textural son sumamente útiles en el estudio de impacto ambiental en suelos y permiten determinar el origen (geogénico o antropogénico) de los metales presentes en las localidades.

En este trabajo se caracterizará los suelos residenciales de 3 localidades ubicados en la cuenca del río Sonora, en función de: 1) La distribución de metales asociados al derrame; 2) Metales no asociados al derrame pero que se utilizan como trazadores de contaminación antrópica y natural; 3) Análisis textural de los suelos para evaluar rutas de exposición, y 4) Estimación del riesgo no cancerígeno en humanos por ingestión de metales, considerando la bioaccesibilidad.

II. MARCO TEÓRICO

La estimación de riesgo a humanos debido a la exposición de metales y metaloides en suelos debe incluir una comparación entre la magnitud estimada de la exposición con la toxicidad del contaminante en cuestión. Aunque los cálculos de riesgo para suelos contaminados pueden ser complejos existen 3 aspectos fundamentales: 1) la concentración de metales o metaloides en suelos en función de la ruta de exposición al receptor; 2) las variables relacionadas a la naturaleza y alcance de exposición (por ejemplo, frecuencia de exposición, cantidad de suelo ingerido, peso corporal), y 3) los valores de toxicidad ² documentados para contaminante en cuestión (SEMARNAT, 2006).

II.1. Elementos potencialmente tóxicos y efectos en la salud

Algunos metales son esenciales para la vida y juegan un rol irremplazable en esta, ya que son una fuente de vitaminas y minerales necesarias para el funcionamiento de los órganos del cuerpo humano. De esta manera, todos los organismos vivos requieren de estos metales en distintas concentraciones, pero estos se vuelven tóxicos en los organismos cuando estos se encuentran en altas concentraciones. Algunos otros metales no tienen un rol significativo o no son necesarios para el cuerpo humano. Ejemplos de estos son el arsénico, plomo y mercurio (Tabla 1) (Lane y Morel, 2000; Kamunda *et al.*, 2016).

A continuación, se describe el potencial de toxicidad de los metales y metaloides asociados al derrame del río Sonora agosto del 2014, utilizando la Guía para orientar los estudios de evaluación de riesgo (SEMARNAT, 2006).

² Valores de toxicidad, se relacionan con estudios críticos que dan información de la relación dosis del contaminante y efectos tóxicos (dosis - respuesta o RfD)

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

II.1.1. Arsénico (As)

Se encuentra en la mayoría de los casos como arseniatos pentavalentes (V). La forma trivalente es más tóxica y más móvil que la especie pentavalente. Debido a la fácil transición de la forma penta- a la forma trivalente o viceversa, la determinación analítica de la forma no es común en materiales geológicos. Los compuestos de arsénico metilados son menos tóxicos que los compuestos inorgánicos (Plumlee & Ziegler, 2007).

II.1.2. Cobre (Cu)

En el suelo se encuentra en forma divalente y muy rara vez se encuentra como cobre monovalente. La solubilidad y la disponibilidad para plantas es relativamente baja; sin embargo, aumenta cuando el pH disminuye por debajo de 5. El cobre puede formar complejos estables, pero es tóxico en primera instancia para las bacterias, plantas, peces y rumiantes. También se ha registrado alta toxicidad para niños muy pequeños, pero para adultos su toxicidad es relativamente baja (Plumlee & Ziegler, 2007).

II.1.3. Cromo (Cr)

Se encuentra en el suelo como un catión trivalente Cr (III) o en forma aniónica como cromato o dicromato Cr (VI). Bajo condiciones reductoras, el Cr (VI) se convierte en Cr (III) y bajo condiciones oxidantes es estable. El cromo (VI) es mucho más soluble que el cromo (III) y por ello en el suelo es mucho más móvil. El cromo (VI) es además más tóxico y es considerado como un cancerígeno por inhalación (Plumlee & Ziegler, 2007).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

II.1.4. Zinc (Zn)

Se encuentra en el suelo como ión divalente. Su solubilidad aumenta cuando el valor de pH disminuye por debajo de 6. Debido a sus características anfóteras³ su solubilidad también aumenta a altos valores de pH. En suelos es relativamente móvil. A pesar de que el Zn es un elemento esencial, en cantidades elevadas puede ejercer una toxicidad baja para animales y humanos, mientras que para plantas se ha registrado como tóxico (fitotóxico) (Plumlee & Ziegler, 2007).

II.1.5. Plomo (Pb)

En la mayoría de los casos está en forma de compuestos bivalentes. El plomo metálico en suelos se convierte en hidroxí-carbonato de plomo y en sulfato de plomo. El plomo tiene una mayor capacidad para ser adsorbido en sustancias húmicas o en óxidos de manganeso y hierro que otros metales pesados (Plumlee & Ziegler, 2007).

II.1.6. Cadmio (Cd)

En la mayoría de los casos esta en forma divalente. El cadmio en los suelos es relativamente móvil y es fácilmente biodisponible. Su solubilidad en agua aumenta conforme el pH disminuye. El Cadmio puede ser des-adsorbido⁴ de las partículas de mineral de arcilla a través del desalojo competitivo por iones de metales alcalinos y alcalino-térreos. Por tal motivo, la aplicación de un fertilizante que contenga distintas sales solubles como las de potasio (K) o de sodio (Na), incrementa la movilidad del Cd. Este aspecto es especialmente importante en las zonas agrícolas ubicadas en distritos mineros activos o inactivos, y que tengan mineralogías con Cd asociado (Plumlee & Ziegler, 2007).

³ Anfóteras: En química, una sustancia anfótera es aquella que puede reaccionar ya sea como un ácido o como una base (IUPAC, 2005).

⁴ Adsorción: Proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material (IUPAC, 2005).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

II.1.7. Manganeso (Mn)

Se encuentra como elemento libre en la naturaleza. El manganeso es un metal traza esencial para todos los seres vivos. En cantidades mayores (al parecer con una actividad mucho mayor por la inhalación), el manganeso puede causar un síndrome de intoxicación en los mamíferos, con daños neurológicos que a veces son irreversibles. Los iones de manganeso funcionan como cofactores de una serie de enzimas en los organismos superiores, donde son esenciales en la desintoxicación de los radicales libres de superóxido (Plumlee & Ziegler, 2007).

II.1.8. Níquel (Ni)

Se encuentra en el suelo como compuesto divalente. El níquel que es emitido al suelo puede ser inmovilizado en las partículas de mineral de arcilla o en los óxidos del suelo. Sin embargo, la movilidad ocurre cuando el pH del suelo disminuye por debajo de 5.5 o por la acción de formadores de complejos orgánicos. En el suelo el níquel es relativamente móvil (Plumlee & Ziegler, 2007).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Tabla 1. Ejemplos de metales pesados o metaloides, y sus fuentes potenciales (con énfasis en materiales geogénicos), y efectos en la salud asociados con las principales vías de exposición.

| Elemento químico Esencial/benéfico | Posible fuente enriquecida | Efectos en la salud asociados con la deficiencia del elemento | Efectos en la salud asociados con el exceso y vía de exposición dominante. |
|---|---|---|---|
| Cobre (Cu) | Depósitos enriquecidos en cobre (i.e. pórfidos de cobre, sulfuros masivos, y <i>sedimentos</i>). Suelos y aguas afectadas por emisiones de fundición, residuos mineros y subproductos. Cu localmente enriquecido en rocas | Anemia, Síndrome de Menke | Ingestión, inhalación. Enfermedad de Wilson (asociado con la acumulación de Cu en los órganos), inflamación intestinal e hígado, hemólisis (destrucción de las células rojas de la sangre, hiperglucemia). |
| Cromo (Cr) | Comúnmente enriquecido en rocas ultramáficas y depósitos de mineral asociados. Mucho del Cr de origen natural relativamente cromita insoluble. El Cr soluble puede ocurrir de forma natural en los sedimentos de un lago evaporado y otros ambientes evaporíticos, como un elemento traza dentro de otras sales solubles. El Cr antropogénico se producen en suelos, sedimentos y aguas afectadas por los residuos y subproductos industriales. | Cr (III) es esencial. Deficiencias afectan a la glucosa del metabolismo, hiperlipidemia, opacidad corneal. | Inhalación, ingestión, percutánea absorción. Irritación y la generación de las lesiones en la piel, vías respiratorias, y mucosa gástrica e intestinal; contacto dermatitis; edema pulmonar. Agudo insuficiencia renal. Riesgo a largo plazo para pulmones, cánceres. Neumoconiosis de la exposición a polvo de mineral de cromita. |
| Manganeso (Mn) | Presente en una variedad de rocas (calizas, ígneas y volcánicas) y en suelos formadas como precipitados químicos. Común en depósitos de minerales | Deformidades esqueléticas, disfunción testicular | Inhalación. Ingestión. Neumonitis aguda. La exposición crónica conduce manganismo, trastornos neurológicos y psicológicos. Ingestión. Cirrosis hepática. |
| Zinc (Zn) | Depósitos de mineral ricos en Zn. Suelos y aguas afectados por las emisiones de fundición, residuos mineros y subproductos. Enriquecido en algunas rocas, tales como lutitas negras, basaltos. | Anorexia, enanismo, anemia, Hipogonadismo, hiperqueratosis, acrodermatitis, enteropatía, sistema inmune deprimido, efectos teratogénicos. | Ingestión. Anemia hipercrómica Inhalación. Fiebre del humo del metal a dosis altas. |
| Metales no esenciales y tóxicos en exceso | | | |
| Arsénico (As) | Suelos y aguas afectadas por emisiones de fundiciones, plantas de energía, desechos mineros y subproductos. Algunos sedimentos de playa. Suelos y polvos derivados de rocas naturalmente enriquecidos. Aguas lixiviados a partir rocas, suelos y sedimentos enriquecidos en As. Pesticidas y otros productos químicos industriales. | No reconocido | Ingestión, inhalación. La intoxicación aguda puede conducir a una amplia variedad de enfermedades, incluyendo: hipotensión sistémica; dolor y sangrado gastrointestinal; edema pulmonar; anemia, destrucción de las células rojas de la sangre; necrosis hepática, insuficiencia renal; encefalopatía y |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

| | | | |
|-------------|--|---------------|---|
| | | | trastorno central del sistema nervioso periférico. Toxicidad crónica puede conducir a: hipotensión; trastornos de la piel tales como eczema, hiperqueratosis, melanosis, ulceración, cáncer de piel; anemia, aguda leucemia; insuficiencia renal; delirio, encefalopatía, convulsiones, neuropatía. |
| Cadmio (Cd) | Enriquecido en muchos minerales de zinc, lutitas negras, lutitas fosfatados. Puede ser enriquecido en los suelos, sedimentos y aguas afectadas por las emisiones: de fundiciones, plantas de energía; agrícola aplicaciones de fango cloacal; minería y residuos industriales y subproductos; industrial Desechos (batería subproductos, y basura producción, curtido de cuero, galvanoplastia, el uso de cemento). | No reconocido | Inhalación, ingestión. La exposición aguda conduce a: angustia, gastroenteritis, hígado y daño renal, cardiomiopatía, acidosis metabólica, irritación del tracto nasofaríngeo, neumonitis. La exposición crónica puede conducir a: enfermedad pulmonar obstructiva, bronquitis, enfisema, cáncer de pulmón, daño renal, efectos secundarios del sistema esquelético (osteoporosis, osteomalacia-fragilidad y el ablandamiento de los huesos; Enfermedad Itai-Itai). |
| Plomo (Pb) | Suelos y aguas afectadas por gasolina con plomo, emisiones de fundición, residuos de minería y subproductos. Polvo, suelos, y residuo que contiene la pintura con plomo. Alimentos cultivados en suelos ricos en plomo. Suelos y polvos derivados de rocas naturalmente enriquecidos con plomo. Aguas que han sido lixiviadas por tuberías de suministro. | No reconocido | Inhalación, ingestión. La intoxicación aguda conduce a una encefalopatía aguda, insuficiencia renal y grave malestar gastrointestinal. La intoxicación crónica conduce a problemas en el sistema nervioso central, función neuroconductual deteriorada, disminución en el desarrollo de la motricidad fina en niños, enfermedad renal, hipertensión, anemia, y otros efectos hematológica. |
| Níquel (Ni) | Enriquecido en rocas ultramáficas y depósitos minerales asociados a lutitas negras. Los suelos, sedimentos y aguas afectadas por residuos mineros, emisiones de la fundición, plantas eléctricas, desechos industriales y subproductos | No reconocido | Inhalación. Bronquitis crónica, enfisema, reducción de la capacidad pulmonar, cáncer de pulmón. Ingestión. La muerte (debido a paro cardíaco), efectos gastrointestinales (náuseas, calambres, diarrea, vómitos), efectos sobre sangre, el hígado, y riñones. Efectos neurológicos (vértigo, cansancio). |

Fuente: Plumlee & Ziegler (2007). The medical geochemistry of dusts, soils, and other earth materials in: environmental geochemistry. Editado de Tratado de Geoquímica.

II.2. Principios de la evaluación del riesgo.

En los últimos años el estudio de la contaminación por metales pesados ha tomado gran relevancia, principalmente en países desarrollados como Estados Unidos, Canadá y algunos países europeos; recientemente, algunos países asiáticos han incrementado el interés debido a su rápido crecimiento económico, industrial y poblacional. Debido a este creciente interés, se han desarrollado nuevas técnicas y mecanismos para la evaluación del riesgo en los apartados metodológicos (Muestreo y análisis; Geo-estadísticos y métodos estadísticos multivariados; y Modelación multimedia de la evaluación de riesgo) usados en la evaluación de la contaminación con metales de suelos, agua, vegetación, cultivos y sedimentos (Tianlik *et al.*, 2016). Los países más desarrollados son los que han puesto un mayor enfoque en el estudio de la evaluación del riesgo, siendo estos los pioneros en el estudio ambiental, así como la creación de marcos de referencia, normatividades y mecanismos para la evaluación y manejo del riesgo de sitios contaminados (Rodrigues *et al.*, 2009).

Algunas de las técnicas que actualmente se utilizan para el análisis de metales son las siguientes: Espectroscopia de Absorción Atómica de Llama (FAAS), Fluorescencia de Rayos X (XRF), Espectrometría de Absorción Atómica en Horno de Grafito (GFAAS), Espectrometría de Absorción Atómica (AAS), Espectrometría de Fluorescencia Atómica – Generación de Hidruros (HG-AFS), Espectrometría de Absorción Atómica de Vapor Frío (CVAAS), Espectroscopia de Plasma Masas Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP-MS), y Espectroscopia de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP-AES) (Tianlik *et al.*, 2016). En el presente trabajo de evaluación de riesgo a la salud humana por exposición a metales en suelos, se utilizaron dos métodos de análisis en las distintas fases del trabajo (XRF y ICP-AES). Dentro del apartado estadístico, se han estado utilizando técnicas estadísticas multivariadas por ser herramientas valiosas en el análisis de información tales como: análisis de componentes principales (PCA), factor análisis (FA), análisis de clústers (CA) y análisis geoestadísticos (Yay *et al.*, 2008). Por su parte, los modelos multimedia de evaluación del riesgo se han desarrollado como una herramienta

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

muy valiosa para calcular la persistencia y el potencial de transporte a gran distancia de los contaminantes (metales) (Tianlik *et al.*, 2016).

Diversos estudios han demostrado que el contacto directo con partículas de suelo, asume una ingesta incidental de éstas mismas, siendo el contacto la vía principal de exposición humana a los contaminantes del suelo. De manera general, la ingesta incidental es el resultado del contacto mano – boca (o mano – alimentos para su posterior digestión) después de haber cargado las manos con partículas de suelo durante las actividades diarias que normalmente se desarrollan. De esta manera, según diversos estudios realizados (Duggan *et al.*, 1985; Kissel *et al.*, 1996; Choate *et al.*, 2006; Yamamoto *et al.*, 2006; Siciliano *et al.*, 2010) han demostrado que la mayor cantidad de partículas que se quedan adheridas a manos corresponden a partículas finas entre 15 – 125 μm (Ruby *et al.*, 2016).

II.2.1. Descripción del escenario humano.

Para llevar a cabo la descripción del escenario humano, es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1. Información demográfica: se define por la magnitud de la población expuesta, para ello se establece la distribución por edades, sexo y grupos étnicos.
2. Vivienda: tipo de vivienda (material de construcción, tipo de piso, tipo de calles, asfaltadas o no asfaltadas), localización del área residencial con respecto a la fuente (distancia, vientos dominantes, etc.), antigüedad del área residencial, proyectos de crecimiento del área residencial.
3. Patrones de comportamiento en el interior de la vivienda.
4. Presencia de contaminantes en interiores: por ejemplo, fumigación con insecticidas, leña para la cocción de alimentos.
5. Localización del dormitorio y del área de preparación de alimentos.
6. Presencia de industria familiar: por ejemplo, carpinterías, ladrilleras, invernaderos.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

En la Tabla 2, se describen algunos aspectos relacionados en las poblaciones estudiadas.

Tabla 2. Descripción del escenario humano por población a estudiar.

| Localidades | Población total | Viviendas | Servicio medico | | Población | | | |
|------------------|-----------------|-----------|------------------|---------------------|-----------|-----------------|--------------------|-----------------|
| | | | Derecho habiente | No derecho habiente | E.A. | menor a 11 años | entre 12 y 59 años | mayor a 60 años |
| Baviácora | 1890 | 771 | 1263 | 602 | 701 | 414 | 1214 | 262 |
| Huépac | 725 | 309 | 615 | 102 | 246 | 132 | 463 | 130 |
| Banámichi | 1238 | 460 | 1066 | 143 | 422 | 283 | 727 | 228 |

Fuente: Censo de Población y Vivienda, 2010. Área Geoestadística Básica (AGEB); E.A. = Económicamente activa.

Un aspecto que se incluye en la descripción del entorno humano son los factores que pudieran incrementar la exposición a las sustancias químicas o que pudieran aumentar el número de tóxicos a los cuales pudieran estar expuestos los individuos de las comunidades, por ejemplo: nivel socioeconómico, nivel académico, acceso a drenaje y agua potable, acceso a servicios médicos, consanguinidad. Se considera mayormente vulnerable la población menor a 11 años y mayor a 60 años (Figura 1).

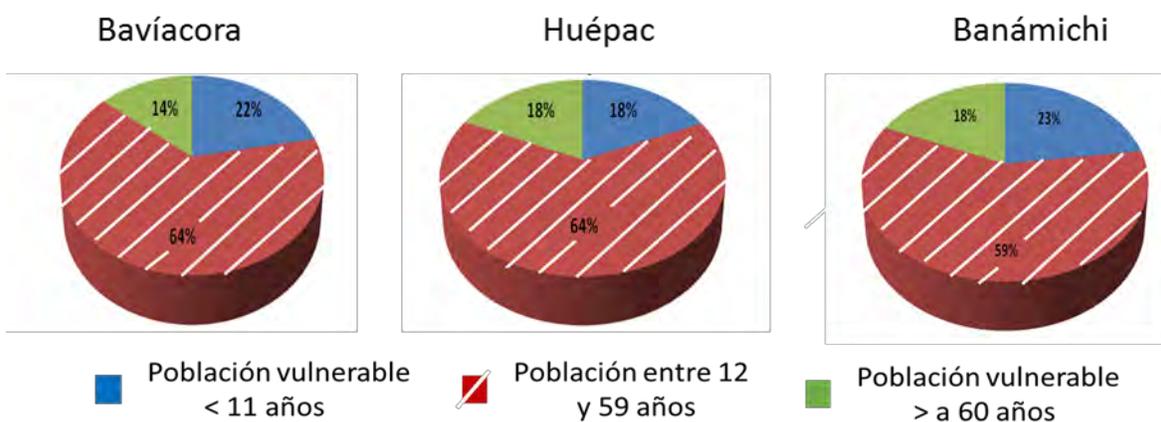


Figura 1. Porcentaje de población vulnerable en localidades a estudiar, en las poblaciones de Banámichi, Huépac y Banámichi, Sonora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

II.2.2. Dosis de Referencia (DdR).

Es el índice de toxicidad que más se utiliza en la evaluación de riesgos por exposición a sustancias no-cancerígenas. Es el nivel de exposición diaria que no produce un riesgo apreciable de daño en poblaciones humanas, incluyendo las subpoblaciones sensibles (SEMARNAT, 2006).

Los valores de DdR por contaminante crítico se pueden obtener de las siguientes bases de datos reconocidas a nivel internacional (Tablas 3 y 4):

Tabla 3. Bases de datos para la obtención del valor de dosis de referencia (DdR).

| | | |
|----------|---|-----------------------|
| ASTDR | http://www.atdsdr.gov/toxprofiles/ | |
| US - EPA | http://www.epa.gov/iris | |
| OMS | http://www.who.int/es/ | Lista de cancerígenos |
| PAN | http://www.pesticideinfo.org/ | Plaguicidas |
| IPCS | http://www.inchem.org | Riesgos químicos. |

Tabla 4. Elementos de interés con valor de dosis de referencia (DdR) documentados.

| Contaminante crítico | Criterios | DdR | Referencia |
|----------------------|----------------------|---------|------------|
| Arsénico (As) | Asociados al derrame | 3E-04 | USEPA |
| Cadmio (Cd) | Asociados al derrame | 5E-04 | USEPA |
| Cobre (Cu) | Asociados al derrame | 1.3-E00 | USEPA |
| Manganeso (Mn) | Asociados al derrame | 2E-02 | USEPA |
| Níquel (Ni) | Asociados al derrame | 1E-01 | USEPA |
| Zinc (Zn) | Asociados al derrame | 5E-00 | USEPA |

DdR = Dosis de referencia.

US-EPA, 2017.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

II.2.3. Bioaccesibilidad.

En esta sección se discute la bioaccesibilidad ya que no es un parámetro considerado en la estimación de riesgo a la salud según los criterios de la guía (Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgo ambiental en sitios contaminados, SEMARNAT, 2006) en México, sin embargo, a nivel internacional la bioaccesibilidad gástrica e intestinal o BAF es un parámetro que se integra a la ecuación de estimación de riesgo a la salud.

Un suelo se considera contaminado con elementos tóxicos cuando las concentraciones totales superan las concentraciones de fondo o las concentraciones de referencia, reportados por las autoridades ambientales. Sin embargo, cuando un suelo está contaminado no necesariamente implica que exista un peligro para la salud humana; ya que se requiere que los contaminantes estén en formas mineral disponibles, lo que depende de su solubilidad, para ser absorbidos por los humanos (bioaccesibilidad⁵). La Norma Oficial Mexicana (NOM 147 Semarnat /SSA1-2004), la cual describe los procedimientos de criterios de remediación de suelos, en donde se describe como la fracción de suelo (malla < 60, <0.250 µm) necesaria para realizar las pruebas. La bioaccesibilidad depende en gran medida de la solubilidad de las fases minerales a las que se asocia el contaminante, es decir si no es fácilmente soluble es biodurable y si es fácilmente soluble es bioaccesible (Figura 2).

⁵ La biodisponibilidad es la fracción soluble del contaminante ingerido que alcanza la circulación sistémica, hallándose así disponible para actuar en el organismo receptor. La bioaccesibilidad es la relación entre la concentración bioaccesible o soluble en fluidos corporales de un contaminante y la concentración total del mismo en la muestra total.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

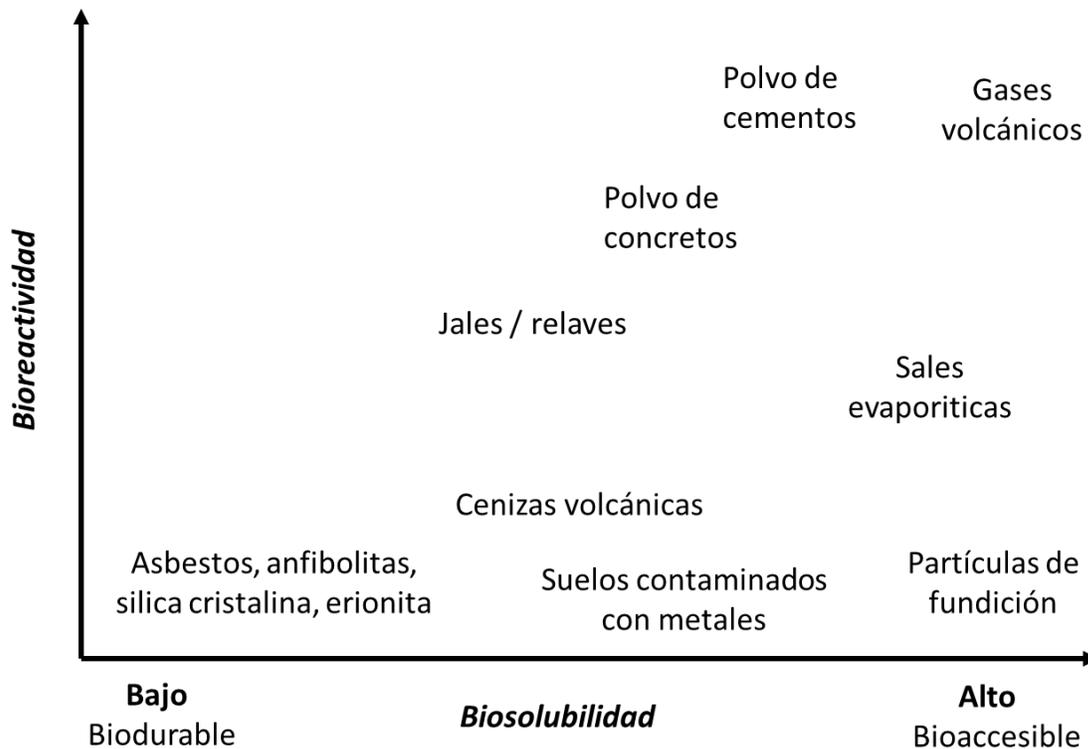


Figura 2. Representación esquemática de bioreactividad y biosolubilidad de varios geomateriales. Muchos tipos de materiales como los jales y suelos contienen una variedad de minerales con distintas solubilidades y bioreactividades, de tal manera que la posición de un material en la figura debe considerarse una aproximación. Figura modificada del Capítulo 9.07, Vol. 9, *Treatise of Geochemistry*⁶ (Plumlee & Ziegler, 2007) .

Por otro lado, la solubilidad de un mineral depende no solo de su estructura cristalina, sino del tamaño de partícula. Sin embargo, no existen estudios que relacionen la concentración total de metales a las diferentes fracciones minerales. Estudios previos indican que niveles altos de metales se relacionan con mayores porcentajes de limos y arcillas; sin embargo, algunas investigaciones sugieren que en zonas áridas el proceso parece inverso (Meza-Montenegro *et al.*, 2012). El entender estas asociaciones permitiría comprender tanto la bioaccesibilidad de metales como la caracterización adecuada de las rutas de exposición-receptor, teniendo esto impacto en los estudios de evaluación de riesgo a la salud humana.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Para evaluar la bioaccesibilidad, se utiliza un sistema de prueba in vitro conocido como método PBET el cual permite predecir la bioaccesibilidad de elementos potencialmente tóxicos de naturaleza inorgánica contenidos en una matriz sólida. Este método establece parámetros representativos del tracto gastrointestinal de los seres humanos tales como pH del estómago, temperatura, composición química y tiempo de residencia, similares a los procesos de digestión humana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004). El método PBET fue diseñado en relación a los parámetros del tracto gastrointestinal de niños de 2 a 3 años, ya que se cree que el mayor riesgo de exposición a los metales es por la ingestión accidental de suelo. La comparación y validación de este método es específicamente para pruebas realizadas en animales, pero su utilidad se basa en la predicción a la exposición humana y en la extrapolación de datos en animales a los seres humanos.

II.2.4. Índice de peligro.

El índice de peligro se denomina como la relación entre la concentración de exposición y un valor de referencia (Díaz – Barriga, 1999). De esta manera, el índice de peligro (IP) se utiliza para determinar el riesgo que representan los contaminantes críticos sobre los organismos de las especies críticas dentro de la evaluación. Para el cálculo de este índice se compara la dosis de exposición o concentración de exposición contra DdR, dependiendo del grupo de organismos.

La determinación del riesgo puede efectuarse a través de los Índices de Peligro Individuales (IPi) para efectos no cancerígenos crónicos y subcrónicos, y de los Índices de Riesgo individuales (IRi) para efectos cancerígenos para cada contaminante crítico, por ruta y vía de exposición. La determinación se realiza para todas las rutas de exposición involucradas (suelos, polvos, aire, gases o vapores, agua, alimentos) en las que se halle presentes los contaminantes y para todas las vías de exposición (ingestión de suelos, ingestión de alimentos, ingestión de agua, inhalación de polvos, inhalación de gases o

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

vapores, contacto dérmico de suelos y aguas) y de ser necesario por tipo de efecto (SEMARNAT, 2006).

Pr lo tanto, si el Índice de Peligro $IP < 1$, las medidas de remediación se enfocarán al monitoreo de la contaminación siempre y cuando estos niveles sobrepasen las concentraciones de referencia de las Normas Oficiales Mexicanas, o aquellas establecidas por la SEMARNAT. Si las concentraciones no sobrepasan las Normas Oficiales Mexicanas o aquellas establecidas por la SEMARNAT, 2006, entonces no existe la obligación de la reparación de daños.

Si el Índice de Peligro $IP > 1$, entonces se puede optar por determinar las acciones de remediación necesarias para reducir la exposición de las especies (seres vivos) y poblaciones a los contaminantes críticos con base en un nivel de riesgo aceptable (SEMARNAT, 2006).

III. ÁREA DE ESTUDIO.

III.1. Localización de datos generales y demografía.

Este estudio forma parte integral del proyecto de Geología Medica “Evaluación del riesgo a la salud humana por exposición a elementos potencialmente tóxicos en suelo, asociados al derrame de Buenavista del Cobre, ocurrido en agosto del 2014”, realizado con el apoyo del Fideicomiso Río Sonora, a través de la Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad de Sonora, Instituto Tecnológico de Sonora y el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, LANGEM.

Para llevar a cabo este estudio se seleccionaron las localidades de Banámichi al norte, Huépac central y Baviácora en el sur, dentro de la cuenca del río Sonora, esto con el fin de tratar de cubrir parte de la zona afectada por el derrame y poder realizar comparaciones entre las localidades estudiadas. Las localidades de estudio (Banámichi, Huepac y Baviácora) se encuentran situadas al noroeste de México, en el estado de Sonora, en la porción centro-norte del Estado (Figura 3), en la cuenca del río Sonora. A la zona se llega siguiendo la carretera federal 14, Hermosillo – Moctezuma, a la altura de la localidad de Mazocahui se toma la ruta hacia el norte siguiendo la carretera estatal 118 “ruta del río Sonora”. Baviácora (Figura 4), se encuentra a 135 km de la ciudad de Hermosillo, 23 km más se llega a Huepac (Figura 5), y finalmente 12 km más se llega la población de Banámichi (Figura 6).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

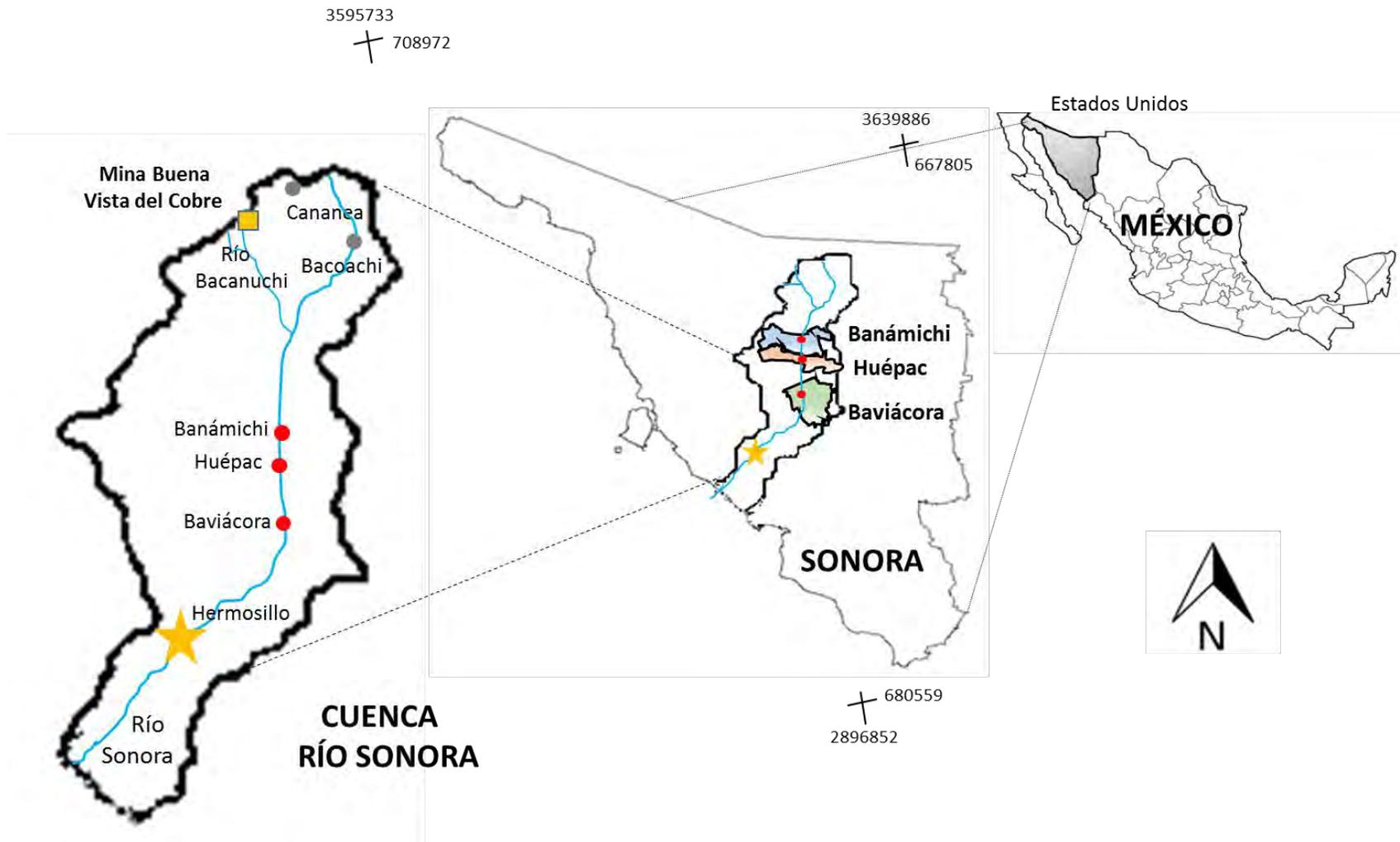


Figura 3. Mapa de localización de los municipios y localidades a estudiar, ubicadas en la cuenca del río Sonora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

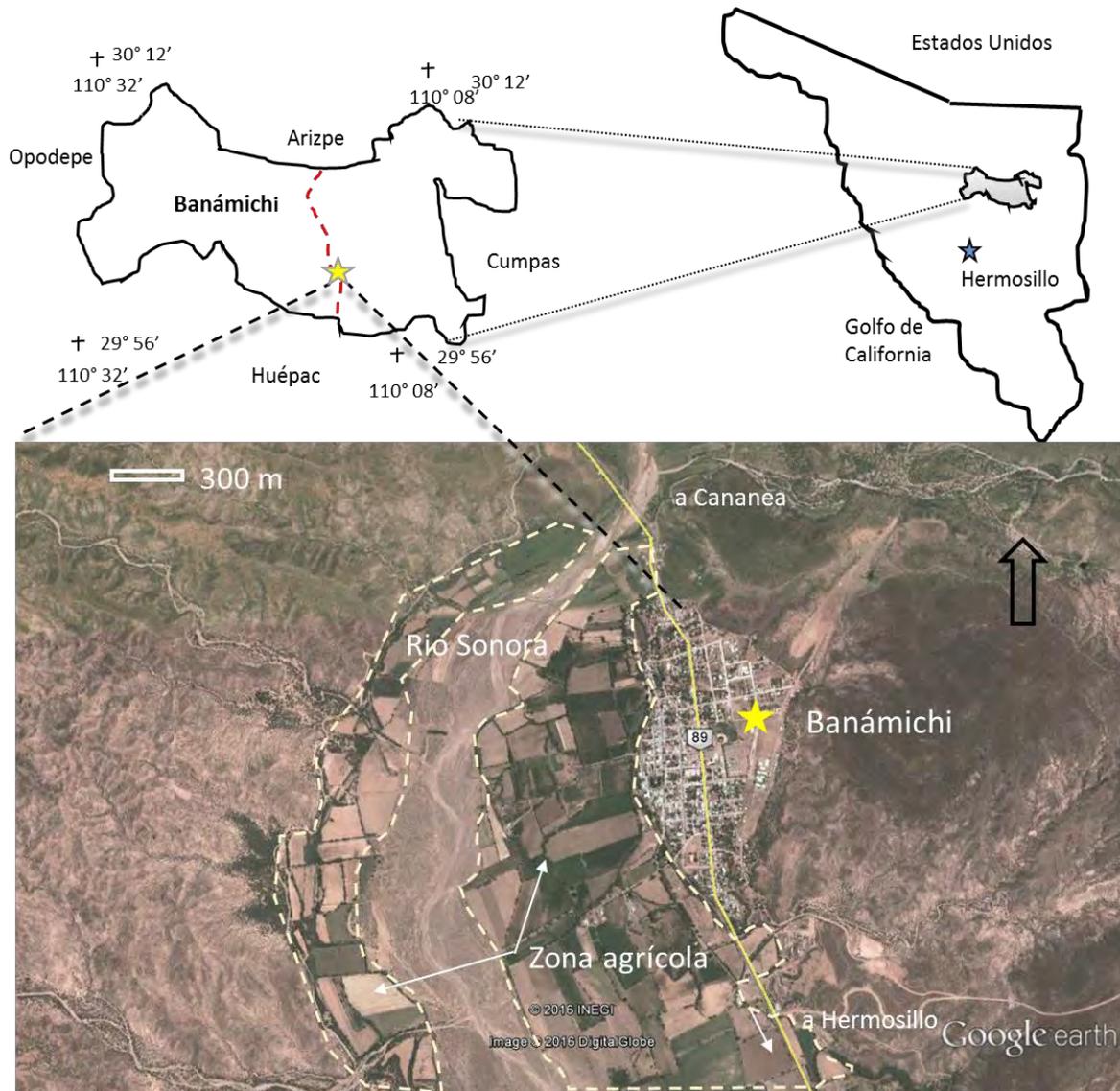


Figura 4. Mapa de localización de la localidad de Banámichi.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

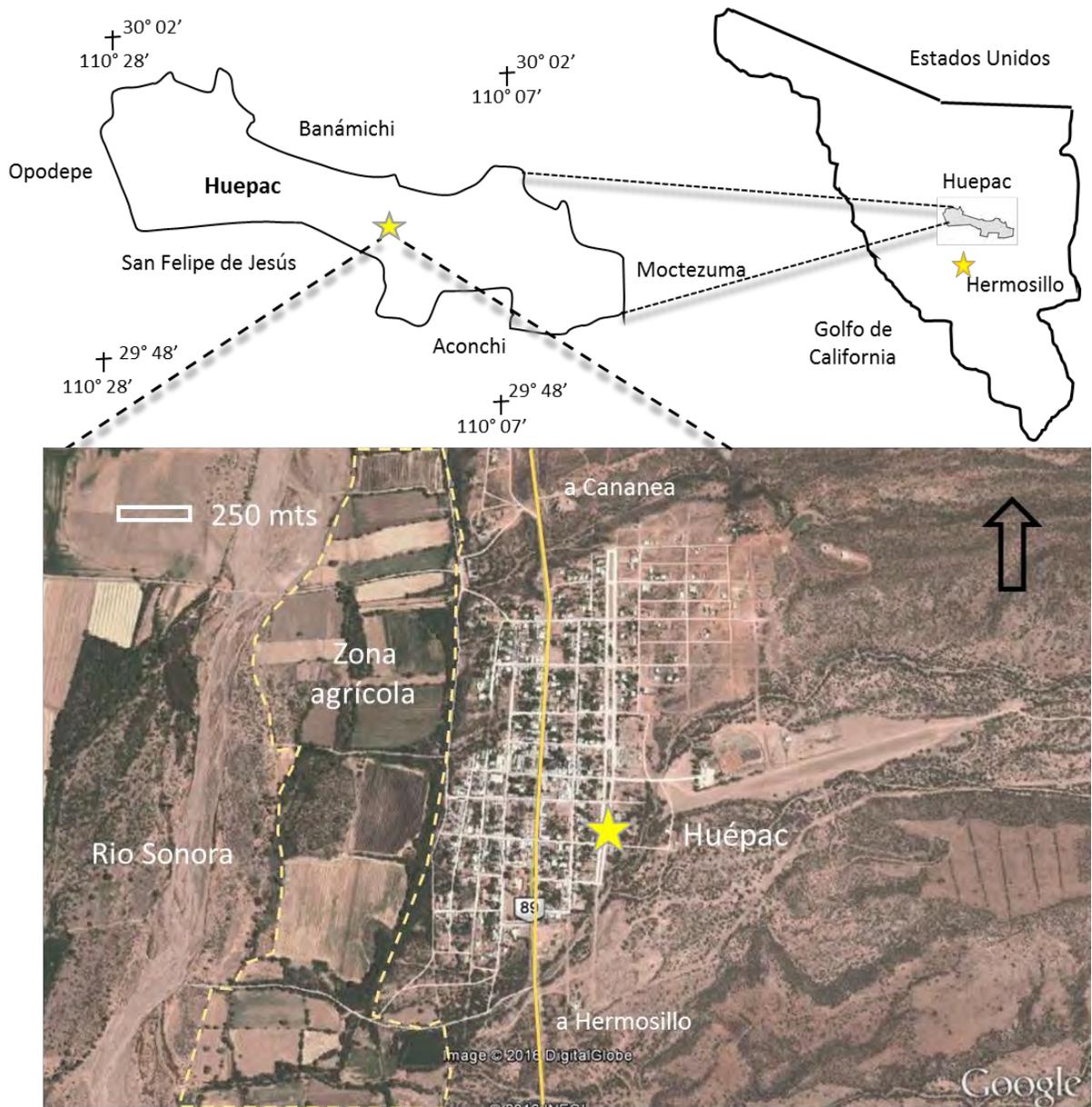


Figura 5. Mapa de localización de la localidad de Huépac.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

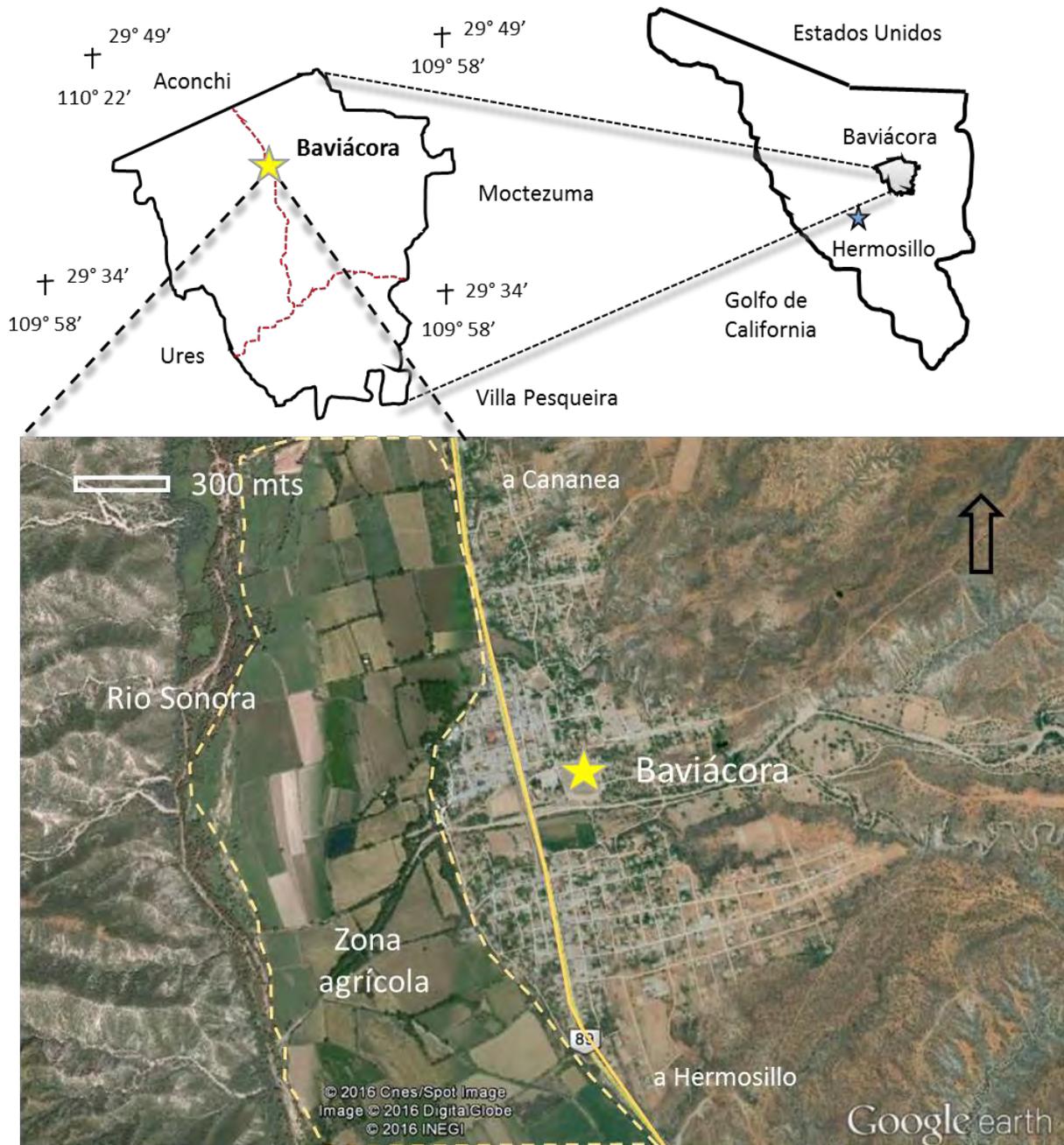


Figura 6. Mapa de localización de la localidad de Baviácora.

Estas localidades se encuentran situadas en una cuenca que presenta diversos y numerosos tipos y estilos de mineralización, para la localidad de Banámichi se presentan diferentes tipos de yacimientos minerales metálicos, como son zonas de tipo stockworks, brechas y

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

vetas epitermales de relleno de fisuras. Para el área central de Huépac – Aconchi, se tienen áreas con zonas de alteración interesantes desde el punto de vista económico, donde los fluidos y las soluciones hidrotermales forman zonas con mineralizaciones polimetálicas y amplias zonas de alteración. Por ejemplo, en el área de Baviácora se tienen yacimientos del tipo Skarn por efectos del metamorfismo de contacto, entre cuerpos ígneos y sedimentos paleozoicos dando mineralizaciones de tungsteno y/o hierro. Estos cuerpos intrusivos también cortan a secuencias sedimentarias y volcánica de composición andesítica, ocasionando importantes zonas de alteración hidrotermal con yacimientos minerales asociados del tipo hidrotermal, principalmente de Au, Ag, Cu, Pb y Zn (SGM, 2012).

Debido a esta naturaleza que se presenta dentro de la cuenca, se encuentran situadas aproximadamente 80 zonas con algún tipo de actividad minera (Figura 7), incluyendo minas en actual producción industrial, así como extracción in-situ (gambusinos), minas abandonadas, prospecto de mina, plantas de beneficio y fundición (SGM, 2015). Por lo que se puede suponer que algunos de estos sitios podrían ser fuentes potenciales de contaminantes hacia la cuenca del Sonora, como por ejemplo el sitio minero ubicado en la localidad de San Felipe de Jesús.

Como parte del archivo histórico, se hace mención de centros mineros que estuvieron operando dentro de la cuenca del Sonora cercanos a las localidades estudiadas. Estos proyectos mineros pudiesen tener aportes significativos de residuos a la cuenca, dentro de la porción del municipio de Banámichi; se hace mención de proyectos mineros que operaron y/o operan actualmente: La chispita (mina y planta de beneficio), El Colmillo, Santa Elena y Banámichi principalmente. En el área central de la cuenca, cercanos a la localidad de Huépac se tienen ubicadas 5 zonas o distritos mineros: Distrito minero San Felipe, zona minera Washington, Distrito Minero Las Cabezas, zona minera El Bellotal, zona minera Rancho Viejo/Vallecitos. En la porción de Baviácora, se tienen ubicados: Distrito Minero El Jaralito, Santa Elena, mina La Abundancia, además de las plantas de beneficio abandonadas de El Jaralito y El Realito (SGM, 2012).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

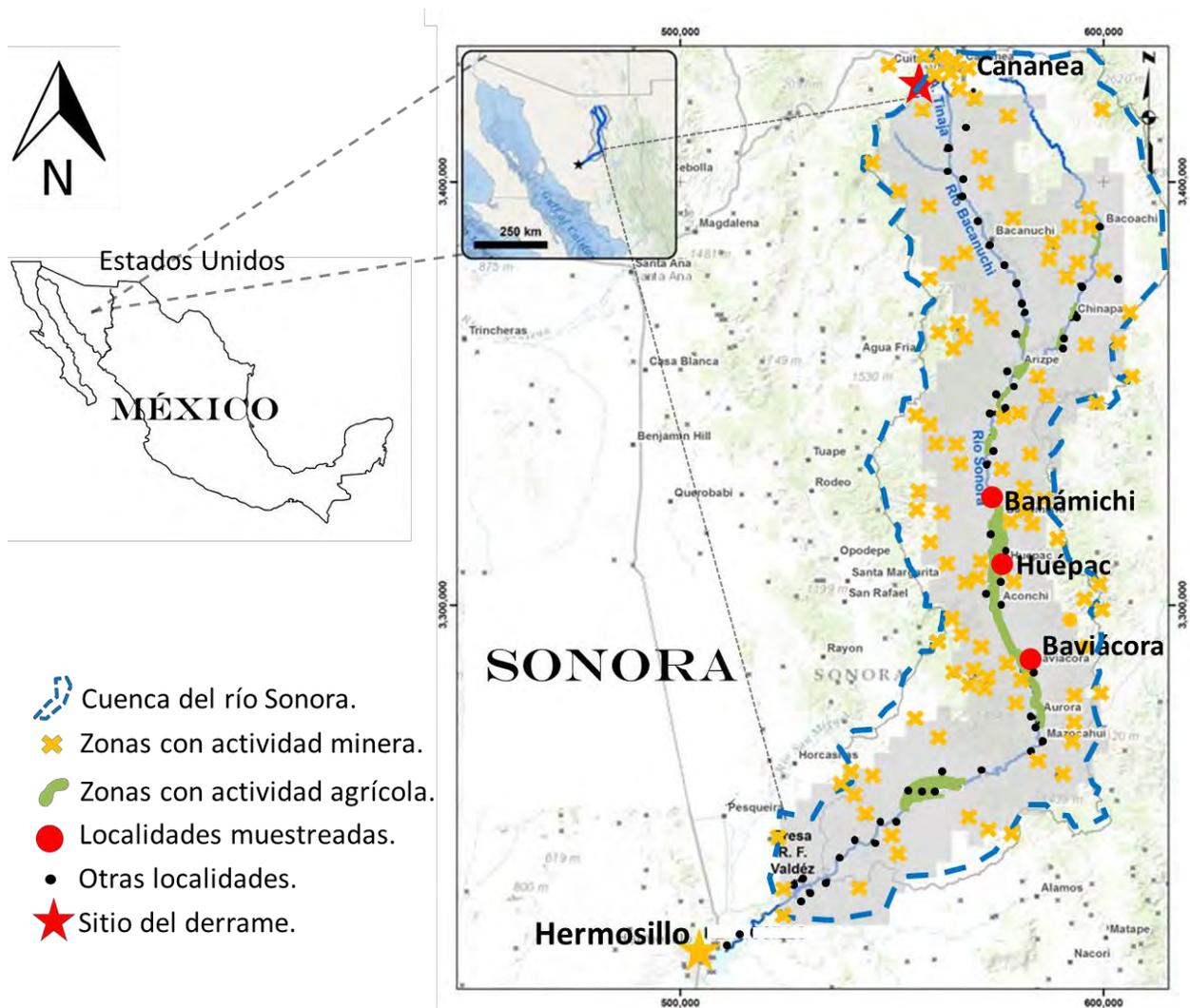


Figura 7. Ubicación de localidades muestreadas y zonas con actividad minera en años pasados y recientes en la cuenca del río Sonora. (SGM, 2015).

III.1.1. Clima.

Baviácora presenta un clima seco semicálido (43.60%), semiseco semicálido (32.77%), semiseco templado (11.22%), seco muy cálido y cálido (6.78%), muy seco muy cálido y cálido (5.62%), teniendo un rango de temperatura de 16 – 24° C durante el año y con precipitaciones en el orden de los 300 – 600mm (INEGI, 2009).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Huépac presenta un clima seco semicálido (40.18%), semiseco semicálido (31.92%), semiseco templado (27.91%), teniendo un rango de temperatura media en el año de 14 – 22°C, y con precipitaciones en el orden de los 200 – 600mm (INEGI, 2009).

Banámichi presenta un clima del tipo seco semicálido (34.03%), semiseco semicálido (35.59%) y semiseco templado (30.38%), teniendo un rango de temperatura promedio anual de 14 – 22°C y con precipitaciones del orden de 400 – 600 mm (INEGI, 2009).

III.1.2. Geología.

En aspectos geológicos, la zona de Baviácora se encuentra conformada por roca Ígnea intrusiva: granito (46.22%). Ígnea extrusiva: riolita-toba ácida (25.79%), basalto (4.02%) y andesita (1.29%). Roca sedimentaria: conglomerado (16.99%) y caliza (1.47%), y suelo: aluvial (4.22%). De esta manera, la geología del lugar se encuentra conformada principalmente por unidades del Cretácico (46.15%), Terciario (42.33%), Cuaternario (4.22%), Neógeno (4.22%), Paleógeno (1.68%), y No definido (1.40%). En este municipio se encuentra una mina de tungsteno (INEGI, 2009).

La zona de Huépac se encuentra conformada por roca del tipo sedimentaria: conglomerado (36.83%). Ígnea extrusiva: riolita-toba ácida (32.05%), andesita-toba intermedia (1.63%), basalto (1.44%), riolita (0.97%), toba ácida (0.29%) Ígnea intrusiva: granito (15%) suelo: aluvial (11.50%) metamórfica: gneis (0.21%). De esta manera, la geología del lugar se encuentra conformada principalmente por unidades del Terciario (71.77%), Cretácico (15%), Cuaternario (11.50%), Neógeno (1.44%), no definido (0.20%) y no aplicable (0.09%). En el municipio se tiene actividad minera de cobre (INEGI, 2009).

En aspectos geológicos, la zona de Banámichi encuentra conformada por roca del tipo Ígnea extrusiva: riolita-toba ácida (23.10%), toba ácida (18.90%), andesita (2.89%), basalto (1.71%) y andesita-toba intermedia (0.58%). Rocas sedimentarias: conglomerado (33.63%)

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

y limolita-arenisca (8.36%). Suelo: aluvial (6.47%) ígnea intrusiva: granito (2.38%), granodiorita (1.60%) y diorita (0.27%). De esta manera, la geología del lugar se encuentra conformada principalmente por unidades del: Terciario (76.02%), Jurásico (8.36%), Cuaternario (7.57%), Cretácico (4.36%) y Neógeno (3.69%) (INEGI, 2009).

III.1.3. Edafología y uso de suelo.

El suelo dominante para la región de Banámichi corresponde a: Leptosol (55.47%), Regosol (17.66%), Calcisol (9.92%), Luvisol (9.68%), Fluvisol (1.43%) y Phaeozem (1.20%) (Tabla 5). El uso de suelo corresponde a lo siguiente: agricultura (2.92%), zona urbana (0.21%) y el 96.87% le corresponde al forestal, el cual se encuentra dividido en lo siguiente: selva (56.31%), bosque (20.82%), matorral (9.80%), pastizal (4.73%) y No aplicable (5.21%) (Figura 8) (INEGI, 2009).

El suelo dominante para la región de Huépac corresponde a: Regosol (63.04%), Leptosol (24.03%), Fluvisol (11.31%), Phaeozem (0.68%). El uso de suelo corresponde a lo siguiente: Agricultura (3.78%), zona urbana (0.14%) y más del 96% le corresponde al forestal, dividido de la siguiente manera: selva (48.10%), bosque (23.44%), matorral (10.26%), pastizal (4.07%) y no aplicable (10.20%) (Figura 9) (INEGI, 2009).

El suelo dominante para la región de Baviácora es la siguiente: Regosol (46.06%), Planosol (44.44%), Fluvisol (6.29%), Vertisol (2.89%). El uso de suelo corresponde a lo siguiente: Agricultura (2.82%), zona urbana (0.32%) y 96.9% le corresponde al forestal, dividido de la siguiente manera: selva (75.85%), bosque (11.73%), matorral (6.48%), pastizal (0.93%) y No aplicable (2.88%) (Figura 10) (INEGI, 2009).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Tabla 5. Descripción de tipos de suelos.

| | |
|----------|---|
| Fluvisol | Literalmente, suelo de río. Se caracterizan por estar formados de materiales acarreados por agua. Son suelos muy poco desarrollados, medianamente profundos y presentan generalmente estructura débil o suelta. |
| Luvisol | Literalmente, suelo con acumulación de arcilla. Son suelos que se encuentran en zonas templadas o tropicales lluviosas, son frecuentemente rojos o amarillentos. Destinados principalmente para agricultura. |
| Regosol | Este tipo de suelo se caracteriza por tener material suelto (manto o cobija) que cubre a la roca. Suelos ubicados en muy diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son claros o pobres en materia orgánica. |
| Calcisol | Suelos asociados con un clima árido o semiárido. Suelo con contenido calcáreo, haciendo alusión a la sustancial acumulación de caliza secundaria. El material original lo constituyen depósitos aluviales, coluviales o eólicos de materiales alterados ricos en bases. |
| Phaeozem | Literalmente, tierra parda. Suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes. |
| Vertisol | Literalmente, suelo que se revuelve o que se voltea. Suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. Se caracterizan por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas. |
| Planosol | Este tipo de suelos se presenta en zonas llanas, estacionalmente inundadas. Se caracterizan por un horizonte eluvial degradado que sobreyace abruptamente sobre un denso subsuelo, también se caracterizan por ser suelos pobres. |

Guía para interpretación de edafología, (INEGI, 2004).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

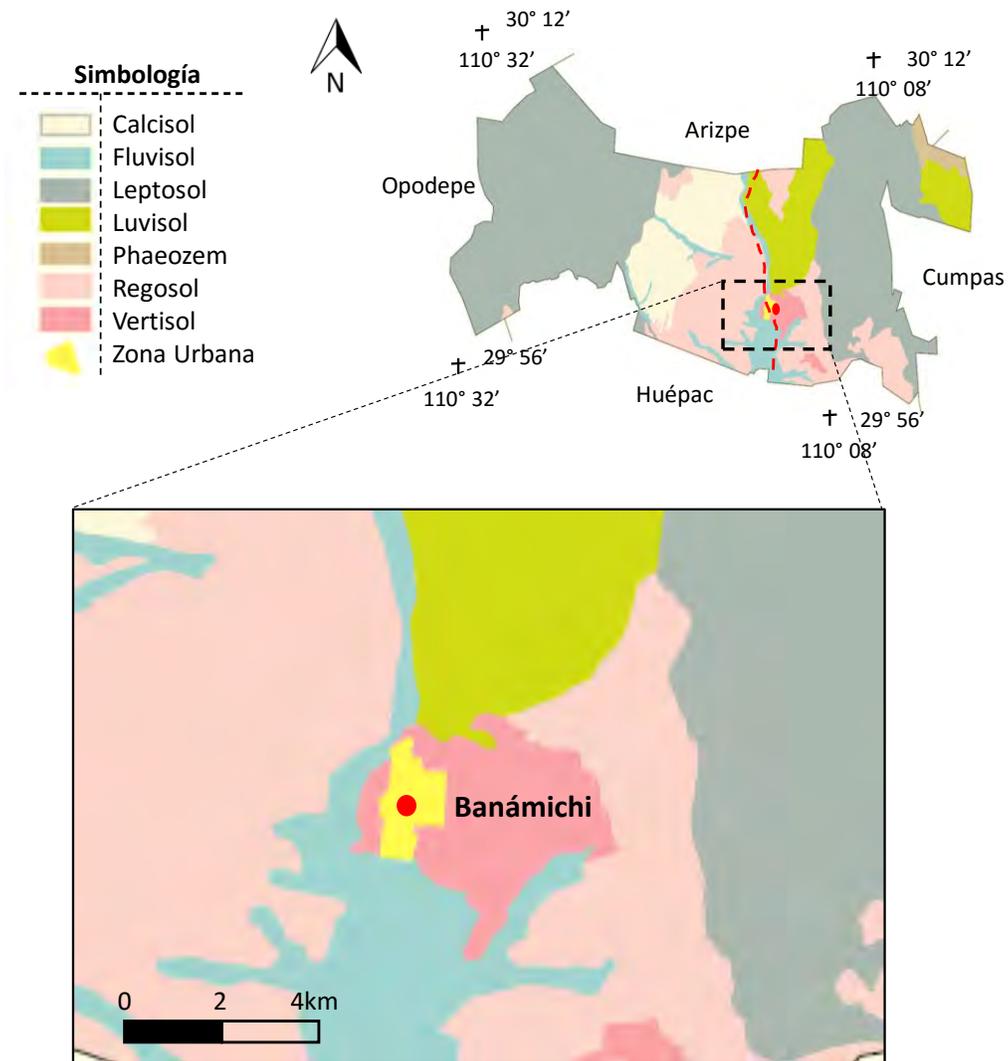


Figura 8. Mapa de localización del municipio y localidad de Banámichi (Figura tomada y modificada de prontuarios INEGI, 2009).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

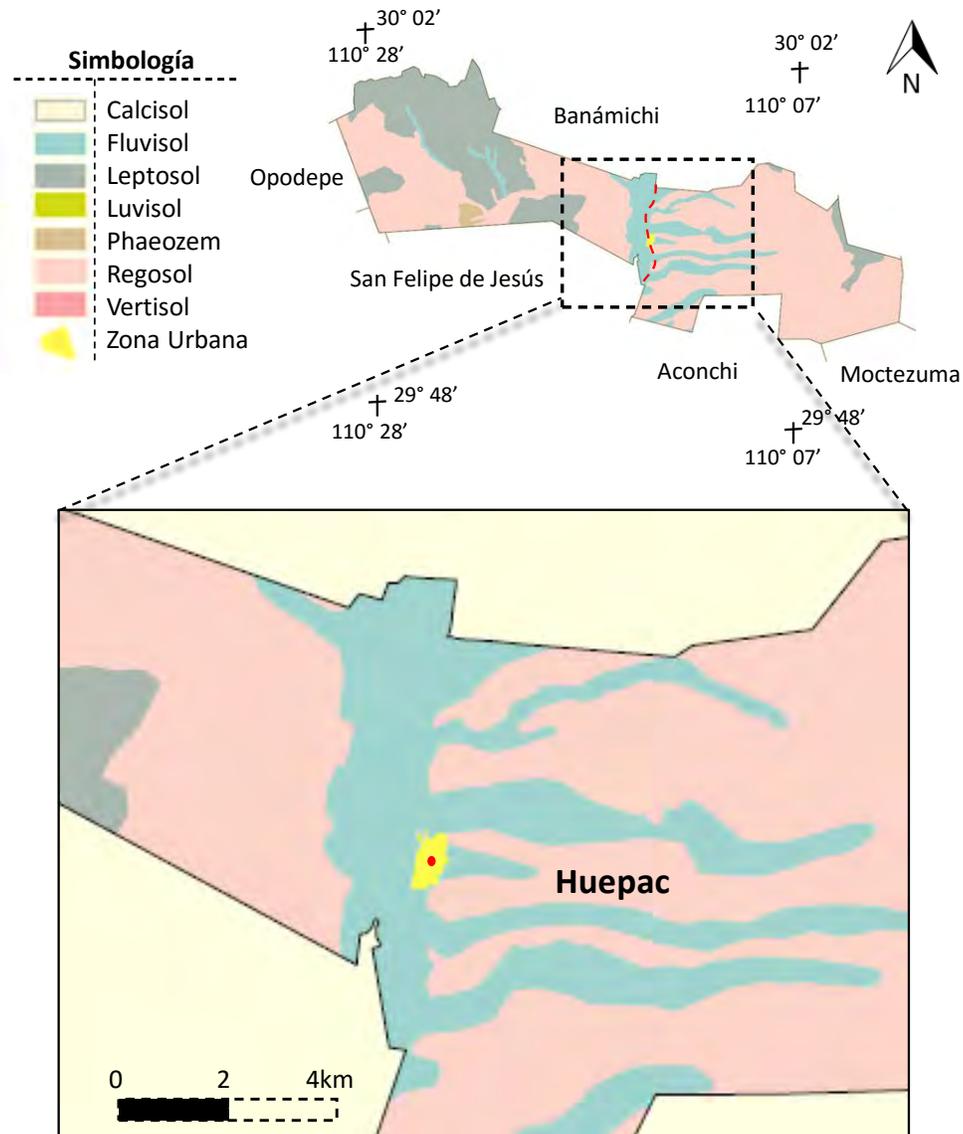


Figura 9. Mapa de localización del municipio y localidad de Huépac. (Figura tomada y modificada de prontuarios INEGI, 2009).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

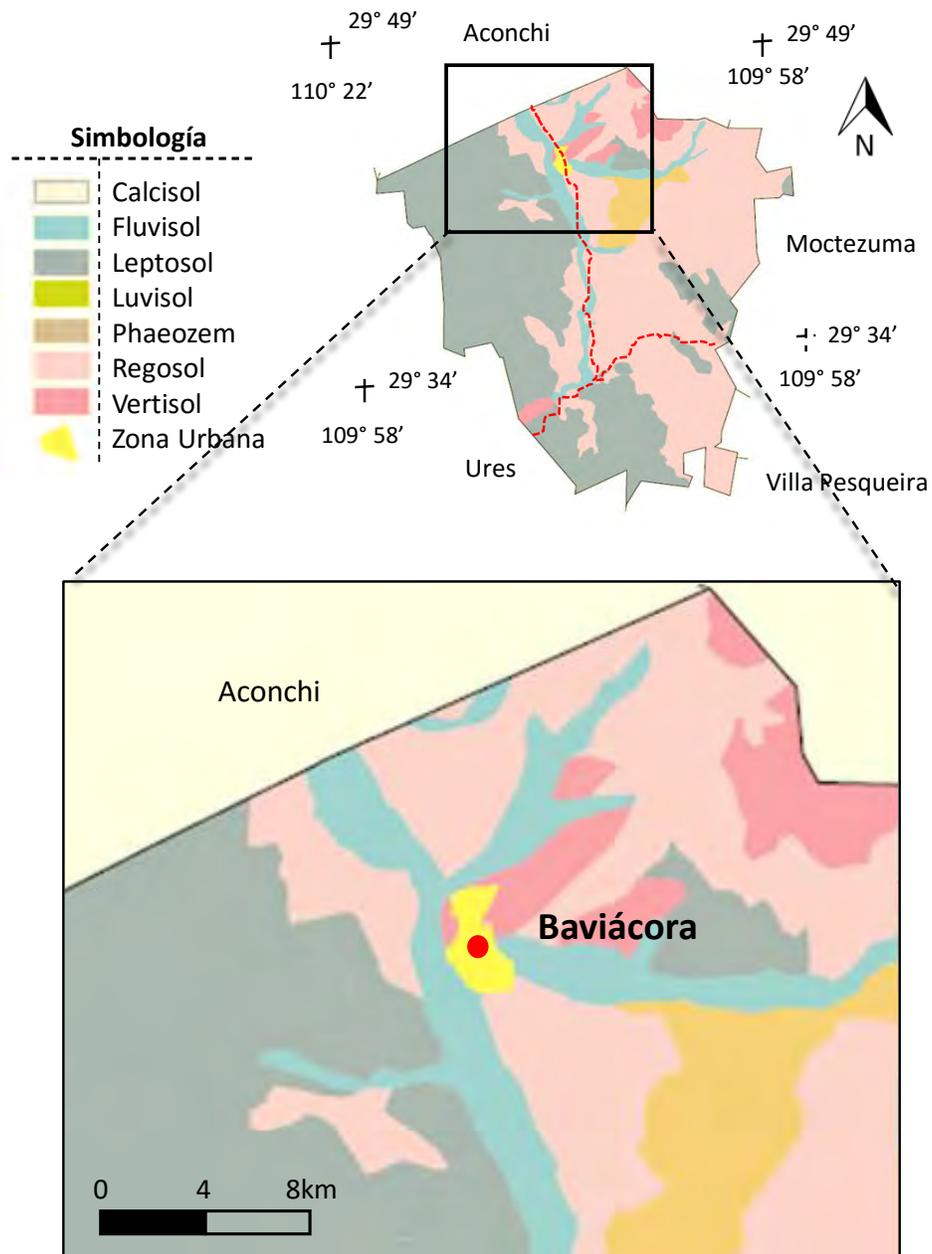


Figura 10. Mapa de localización del municipio y localidad de Baviácora (Figura tomada y modificada de prontuarios INEGI, 2009).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

En la siguiente Tabla 6, se presenta información resumida referente a las localidades de estudio como: Ubicación geográfica, fisiografía, condiciones climáticas, uso de suelo, edafología, geología e hidrografía, en base a prontuarios (INEGI, 2010).

Tabla 6. Resumen de Información fisiográfica de las localidades de estudio.

| Características de las localidades | | | | | |
|---|-----------------|---|--|---|--|
| Localidad | | Baviácora | Huépac | Banámichi | |
| Ubicación geográfica | | 29°42' N y 110°09' O | 29°54' N y 110°12' O | 30°00' N y 110°12' O | |
| Fisiografía | | Sierra alta 71% Valle intermontano 27% Lomerío típico 2% | Lomerío típico 41% Sierra alta 38% Valle intermotano 21% | Sierra alta 62% Valle intermontano 23.5% Lomerío típico 15.5% | |
| Clima | Clima | Seco, semi cálido. | Seco, semi cálido. | Semi seco, semi cálido. | |
| | Temperatura | 16 - 24°C | 14 - 22°C | 14 - 22°C | |
| | Precipitación | 300 a 600 mm | 200 a 600 mm | 400 - 600mm | |
| Uso de suelo | | Agrícola 3% Zona urbana 0.3% Forestal 96.7% | Agrícola 4% Zona urbana 0.15% Forestal 95.85 % | Agrícola 3% Zona urbana 0.21% Forestal 96.8 % | |
| Edafología | Suelo dominante | Regosol, planosol y fluvisol | Regosol, leptsol y Fluvisol | Lepotosol, regosol, calcisol, luvisol | |
| Geología | Periodo | Cretácico 46%, Terciario 42%, Cuaternario 5%, Neógeno 5% | Terciario 72%, Cretácico 15% Cuaternario 12%, Neógeno 1.5% | Terciario 76%, Jurásico 8% Cuaternario 7.5%, Cretácico 4% | |
| | Roca | Ígnea intrusiva: Granito 46% Ígnea extrusiva: riolita-toba 26%, basalto 4%, andesita 1.5 % Sedimentaria: conglomerado 17%, caliza 1.5% Suelo: aluvial 5% | Sedimentaria: conglomerado 37% Ígnea extrusiva: riolita-toba acida 32% andesita-toba intermedia 1.6 %, Ígnea Intrusiva: granito 15% Suelo: aluvial 11% Metamórfica: gneis 0.21% | Ígnea intrusiva: riolita-toba a. 23% toba ácida 19% andesita 3% Sedimentaria: conglomerado 34% limolita-arenisca 8% Suelo: aluvial 6.5% Ígnea intrusiva: granito 2% granodiorita 1.6% diorita 0.3% | |
| Hidrografía | | Río Sonora | Río Sonora | Río Sonora | |

IV. METODOLOGIA.

IV.1. Evaluación de riesgo a la salud por exposición a metales.

Para evaluar el riesgo a la salud se llevaron a cabo los procedimientos establecidos en la “Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgo ambiental de sitios contaminados” (SEMARNAT, 2006). Comenzando con la elección del nivel de estudio según el tipo de área y el tipo de receptor para aplicar una matriz de decisión (Figura 11). En el caso particular de este trabajo se hace referencia a la metodología Nivel 0, Caso B de la guía antes mencionada. Este Nivel y Caso se considera cuando los receptores son los recursos naturales no biológicos además de los seres humanos. El tipo de área puede ser: Urbana industrial y/o comercial; áreas no urbanas con actividad agropecuaria (agrícola/ganadera/piscícola, etc.) y área natural protegida (en cualquiera modalidad). La determinación de la exposición puede llevarse a cabo por los métodos determinístico⁷ y probabilístico. En este trabajo se considerará el método determinístico para la vía de exposición oral (Figura 11).

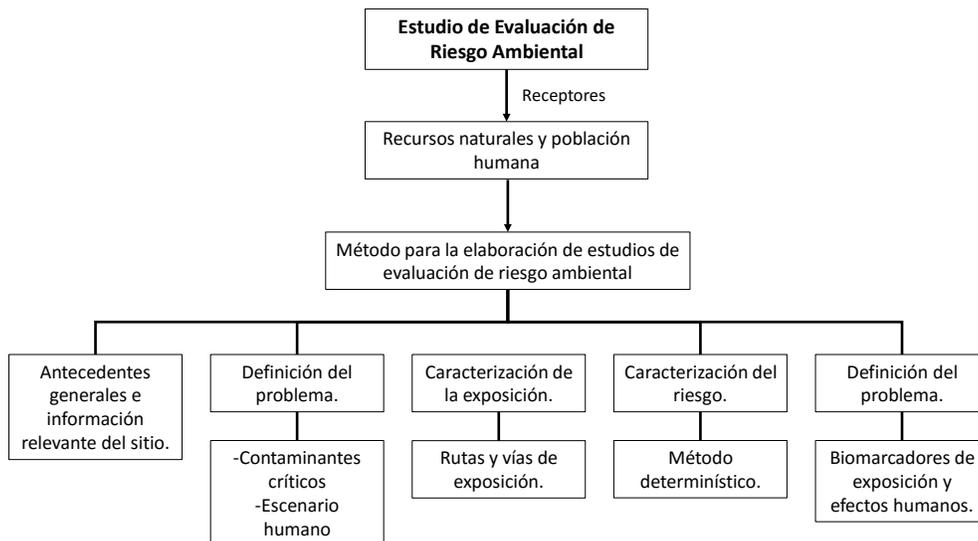


Figura 11. Evaluación de riesgo ambiental cuando los receptores incluyen población humana.

⁷ Método Determinístico: modelo matemático donde las mismas entradas o condiciones iniciales producirán invariablemente las mismas salidas o resultados, no contemplándose la existencia de azar, o incertidumbre en el proceso modelada mediante dicho modelo. Otro modelo es el probabilístico, el cual hace referencia a la forma que pueden tomar un conjunto de datos obtenidos de muestreos de datos con comportamiento que se supone aleatorio.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Para el desarrollo del método determinístico se necesita la determinación de los contaminantes o componentes críticos para los ecosistemas, recursos naturales o los seres humanos, una vez identificados se procede a determinar la dosis de exposición con la cual posteriormente se podrá obtener el índice de riesgo mediante las siguientes fórmulas (SEMARNAT, 2006):

$$DE_{ING} = C_s * TI_{ING} * FBD_{ING} * FC * FCE / PC \quad (\text{Ec. 1})$$

$$FCE = FrE * DuE * TE / PTE_M \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

C_s : Concentración de contaminante en suelo (mg/Kg).

TI_{ING} : Tasa de ingestión (mg/d).

FBD_{ING} : Factor de biodisponibilidad (%).

FC : Factor volumétrico de conversión = 1×10^{-6} .

PC : Peso corporal (kg).

FCE : Factor de corrección de la exposición (-)

FrE : Frecuencia de exposición (d/año).

DuE : Duración de la exposición (años).

PTE_M : Promedio de tiempo de la exposición (d).

TE : Tiempo de exposición (d/año)= 365 (d/año).

$$HQ = DE / RfD \quad (\text{Ec. 3})$$

HQ= Cálculo de riesgo.

DE= Dosis de exposición.

RfD: Dosis de referencia.

IV.1.1. Modelo conceptual para rutas, vías de exposición y receptores.

Una ruta de exposición, es el camino que sigue un agente químico en el ambiente desde el lugar donde se emite hasta que llega a establecer contacto con la población o individuo expuesto (Figura 12). En el caso particular de este trabajo, se consideraron los elementos químicos reportados como presentes en la solución ácida ferrocuprífera derramada por la mina Buenavista del Cobre en agosto del 2014 (Tabla 7).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Tabla 7. Composición química del derrame de solución ácido ferrocuprífera de la mina Buenavista del Cobre.

| Elemento | Concentración (mg/L) |
|----------|----------------------|
| Fe | 1080 |
| Al | 461 |
| Cu | 114 |
| Mn | 98.1 |
| Zn | 51 |
| As | 42.7 |
| Ni | 11 |
| Cd | 7.76 |
| Pb | 2.5 |
| Cr | 1.54 |
| Ba | No detectado |
| Hg | No detectado |
| Sb | No detectado |

Nota: Tabla tomada y redibujada de la Tesis de maestría “Evaluación de la contaminación residual del riesgo ambiental en suelos y sedimentos afectados en la cuenca del río Sonora. (Ramos – Pérez, 2017). Datos obtenidos por la CONAGUA.

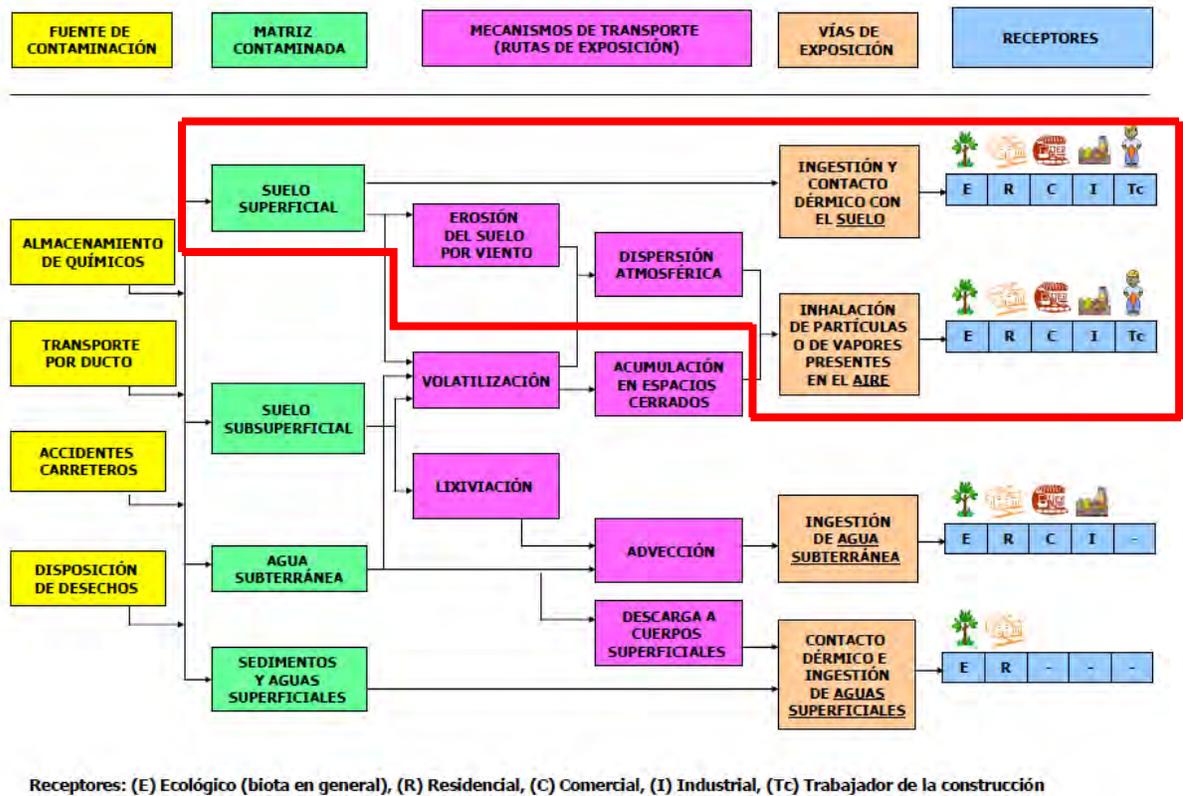


Figura 12. Representación esquemática de las rutas y vías de exposición en un sitio contaminado. Fuente: Anexo J, Guía para orientar los estudios de evaluación de riesgo (SEMARNAT, 2006).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Las vías de exposición, son los caminos por los cuales el contaminante puede establecer contacto e ingresar al organismo. Las principales vías de exposición para tóxicos y patógenos son el tracto gastrointestinal (ingestión), tracto respiratorio (inhalación), y piel (absorción dérmica) (Sipes y Badger, 2001). Imperato *et al.*, (2003) también hace mención que las principales vías de exposición a metales son a través de la inhalación, absorción dérmica e ingesta de alimentos, suelos y polvos. En estas etapas, se lleva a cabo a la absorción de sustancias solubles a través de las membranas del cuerpo, por difusión pasiva

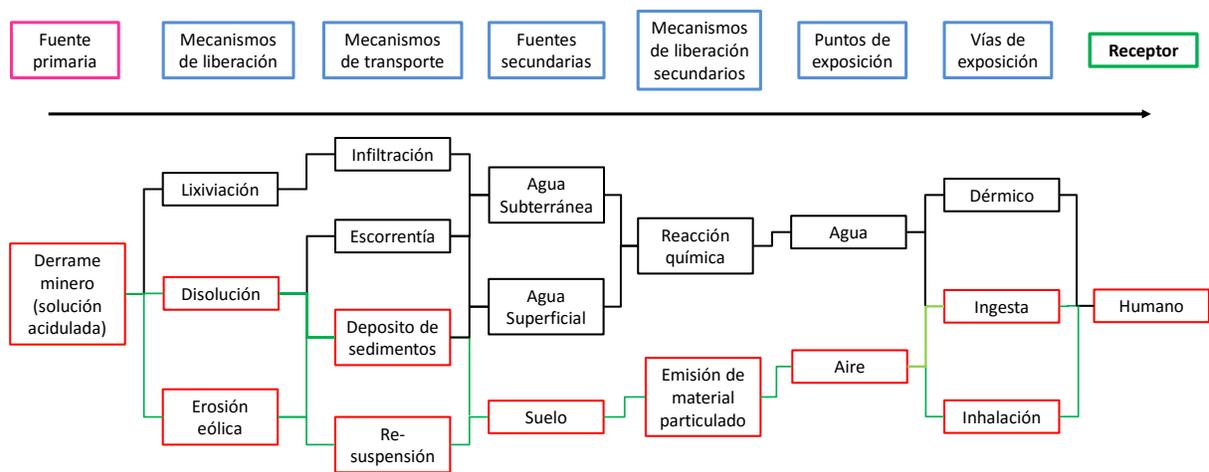


Figura 13. Modelo conceptual con rutas y vías de exposición para el presente trabajo de investigación.

IV.1.2. Contaminantes críticos, criterio de selección.

En los sitios contaminados generalmente existe una gran variedad de sustancias o compuestos tóxicos. Sin embargo, debido a los altos costos en tiempo y dinero que esto implica, es imposible poder evaluar la totalidad de ellos. Por esta razón debe hacerse una

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

selección de los contaminantes que serán los evaluados, y que serán denominados como contaminantes críticos (Figura 14).

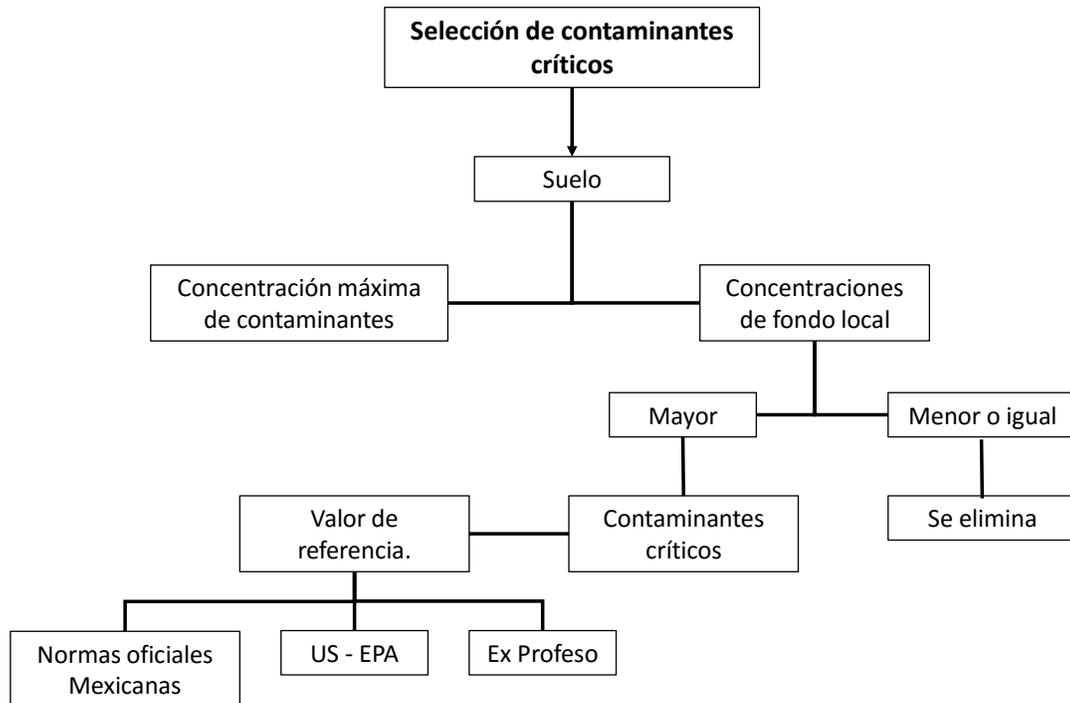


Figura 14. Esquema del proceso de selección de contaminantes criterio, basado en SEMARNAT (2006).

En la selección de contaminantes críticos se consideró el siguiente proceso de selección:

1. Comparar las concentraciones máximas de contaminantes presentes en las matrices afectadas (agua, suelo y sedimentos) con las concentraciones de fondo. La selección de los contaminantes de acuerdo a sus concentraciones en el sitio se hará a través de los siguientes criterios:
 - Se eliminarán del estudio de riesgo aquellos contaminantes cuya concentración en las matrices sean menores o iguales a las concentraciones de fondo.
 - Serán considerados como contaminantes críticos aquellos cuyas concentraciones sean superiores a las concentraciones de fondo. Los

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

contaminantes que cumplan con esta característica deberán continuar con los pasos de selección indicados en los siguientes puntos

2. Comparación de la concentración de los contaminantes presentes en el sitio con las concentraciones de una tabla de valores de referencia.

Comparar las concentraciones de contaminantes presentes en las matrices afectadas (agua, suelo y sedimentos) con las Concentraciones de Referencia o Límites Máximos Permisibles. Se podrán considerar como Concentraciones de Referencia aquellas indicadas en las siguientes fuentes (Tabla 8):

- Normas Oficiales Mexicanas, como por ejemplo hidrocarburos o metales.
- Tabla de valores de referencia de US-EPA, por ejemplo, los Niveles de Remediación Preliminares (PRG's por sus siglas en ingles) de la región 9.
- En su defecto, concentraciones calculadas ex profeso para su comparación con las concentraciones de los contaminantes (SEMARNAT, 2006).

Tabla 8. Concentraciones de referencia totales (CrT) por tipo de suelo, establecidas en la NOM-147-SEMARNAT_SSA1-2004.

| Contaminante | Uso agrícola/residencial/comercial (mg/kg) | Uso industrial (mg/kg) |
|-------------------|---|------------------------|
| Arsénico | 22 | 260 |
| Bario | 5400 | 67000 |
| Berilio | 150 | 1900 |
| Cadmio | 37 | 450 |
| Cromo Hexavalente | 280 | 510 |
| Mercurio | 23 | 310 |
| Níquel | 1600 | 20000 |
| Plata | 390 | 5100 |
| Plomo | 400 | 800 |
| Selenio | 390 | 5100 |
| Talio | 5.2 | 67 |
| Vanadio | 78 | 1000 |

Nota: a. en caso de que se presenten diversos usos de suelo en un sitio, deberá utilizarse el que predomine; **b.** cuando en los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano no esten establecidos los usos de suelo, se usara el valor residencial.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Criterio de selección de acuerdo a las Concentraciones de Referencia:

- Se eliminarán de la evaluación aquellos contaminantes cuyas concentraciones en los medios sean menores o iguales a las concentraciones de referencia ecológica,
- Se consideran como contaminantes críticos aquellos contaminantes cuyas concentraciones sean superiores a las concentraciones de referencia ecológica. Para la realización de estudio se considerarán valores medidos de fondo geoquímico naturales por cuenca.

El resto de los contaminantes deberán seguir el proceso de selección que se indica en el paso 3.

3. Los contaminantes no considerados inicialmente para la evaluación de riesgo con base en los criterios anteriores se revisarán con base en los siguientes aspectos o características:

- Información histórica
- Toxicidad, movilidad, persistencia y bioacumulación
- Rutas de exposición específicas
- Problemas de tratabilidad de la sustancia
- Toxicidad equivalente de la clase de químicos por ejemplo CDD (clorodibenzodioxinas) /CDF's (clorodibenzofuranos) HPA's, (hidrocarburos policíclicos aromáticos)
- Frecuencia de detección
- Importancia de la sustancia
- Comparación con concentraciones de fondo.

Criterio de selección de acuerdo a las Concentraciones de Referencia:

- Si algún contaminante presenta varias características, se deberá considerar para la evaluación de riesgo.

IV.2. Muestreo de suelo superficial.

El muestreo de suelo se realizó en base a lo establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006 “Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra”. En esta norma se describe paso a paso los procedimientos para realizar un muestreo de suelo con posible contaminación por metales, desde el diseño del muestreo, procedimiento, hasta el traslado de la muestra. El tipo de muestreo que se llevó a cabo fue del tipo exploratorio en áreas urbanas, con el objetivo de obtener muestras de suelo representativas para establecer la presencia de contaminación y en su caso la distribución horizontal de la misma, y valorar su posible migración vertical. El muestreo del tipo exploratorio consiste en obtener muestras representativas de suelo expuestos con el fin de determinar la presencia de contaminación y en su caso la distribución horizontal de la misma. Detalle completo sobre la estructuración de muestreo en NMX-AA-132-SCFI-2006.

Para la obtención del número de puntos de muestreo de cada sitio de estudio, se utilizó la siguiente fórmula con la cual se determina este parámetro, en función del área urbana de cada localidad; entonces se tiene:

$$Y = (X)^{0.3} . \quad \text{(Ec. 4)}$$

Donde:

Y = es el número de puntos de muestreo.

X = es la superficie del suelo de la localidad de estudio expresada en hectáreas.

Para determinar la superficie de suelo de cada localidad, se utilizó el programa de Google Earth, en el cual se trazó un polígono de la zona urbana y se obtuvo el área en hectáreas, de esta manera se obtuvo los siguientes puntos de muestreo para cada localidad (Tabla 9).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Tabla 9. Números de puntos a muestrear para cada localidad.

| Localidad | Puntos a muestrear |
|------------------|---------------------------|
| Bavíacora | 53 |
| Huépac | 51 |
| Banámichi | 47 |

Una vez obtenido el número de puntos de muestreo, se procedió a distribuirlos sistemáticamente, apoyándose en una retícula cuadrada, de tal manera que no conduzca a errores por sesgo. De esta manera se asegura y/o procura que los puntos de muestreo incluyan parques, jardines públicos, cajetes, jardineras, banquetas, calles pavimentadas y no pavimentadas, cumpliendo lo establecido en el apartado de “Muestreo Sistemático” de esta misma norma (Figura 15).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

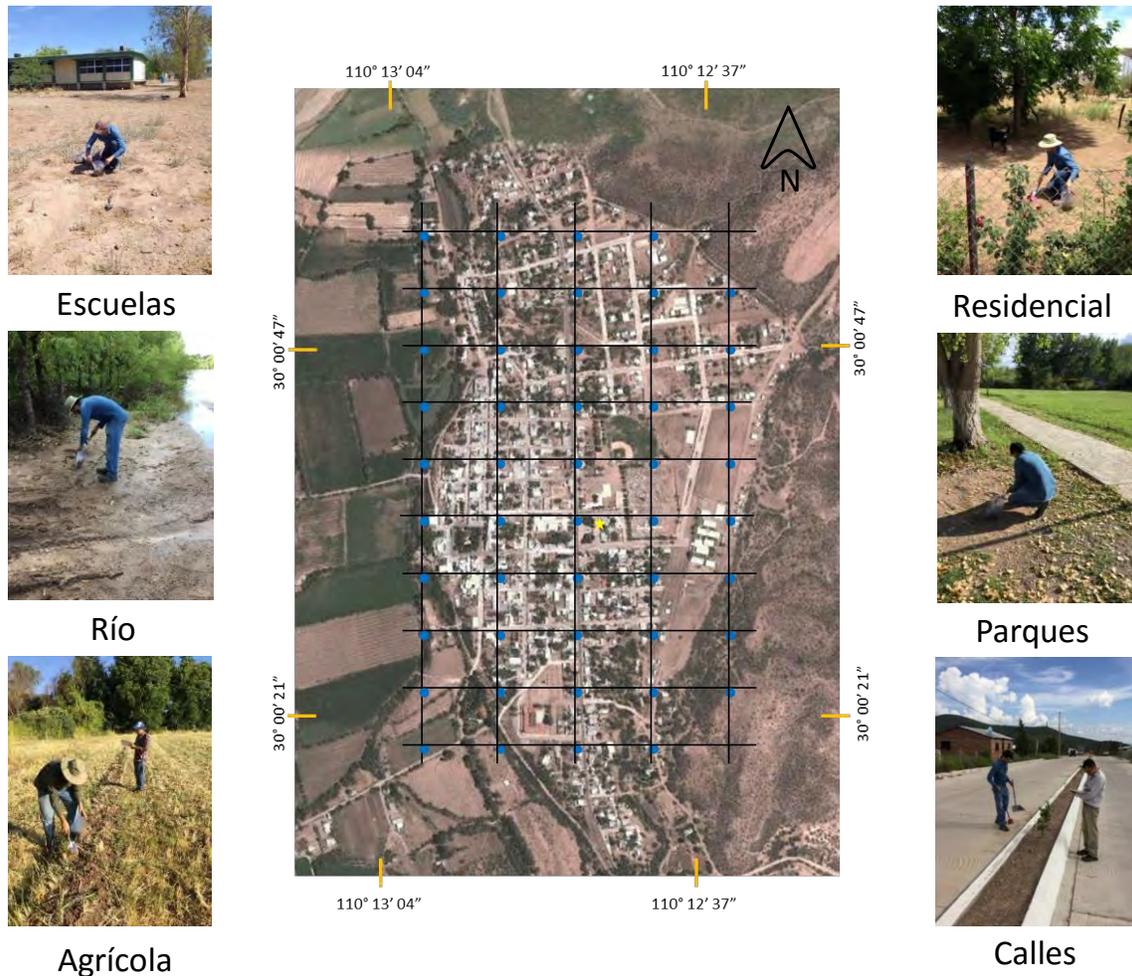


Figura 15. Ejemplo de distribución sistemática de puntos de muestreo, así como diversidad de zonas de muestreo dentro de una localidad.

Una vez en campo, los puntos de muestreo fueron tomados siguiendo los patrones establecidos en las retículas elaboradas, pero ya en la práctica esto no fue muchas veces posible debido a la accesibilidad de cada punto. Cada punto de muestreo fue georeferenciado, obteniéndose las siguientes plantillas de muestreo para las tres poblaciones trabajadas Banámichi – Huépac - Baviácora (Figuras 16, 17 y 18).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

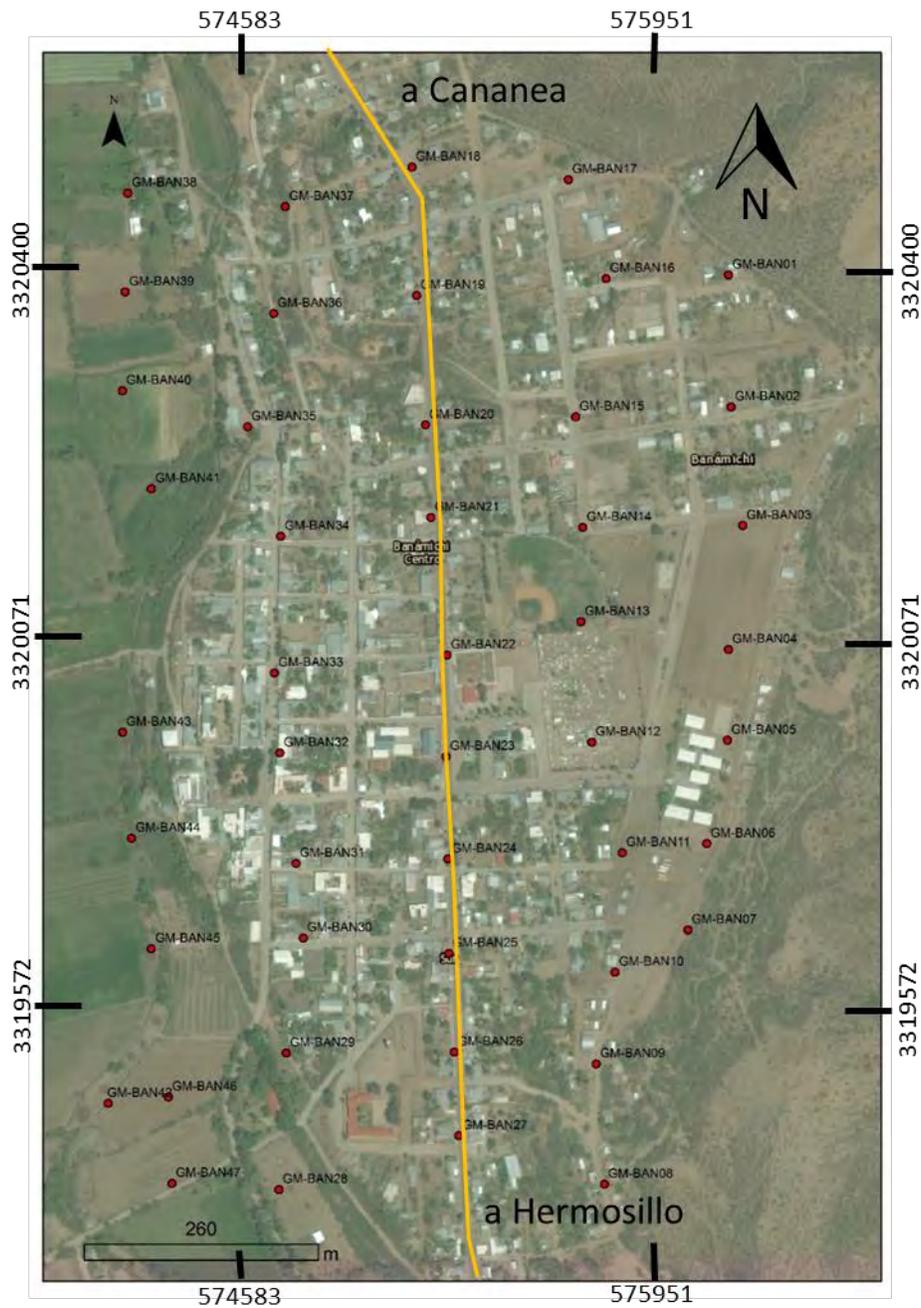


Figura 16. Localización geográfica de los puntos muestrados para la localidad de Banámichi.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

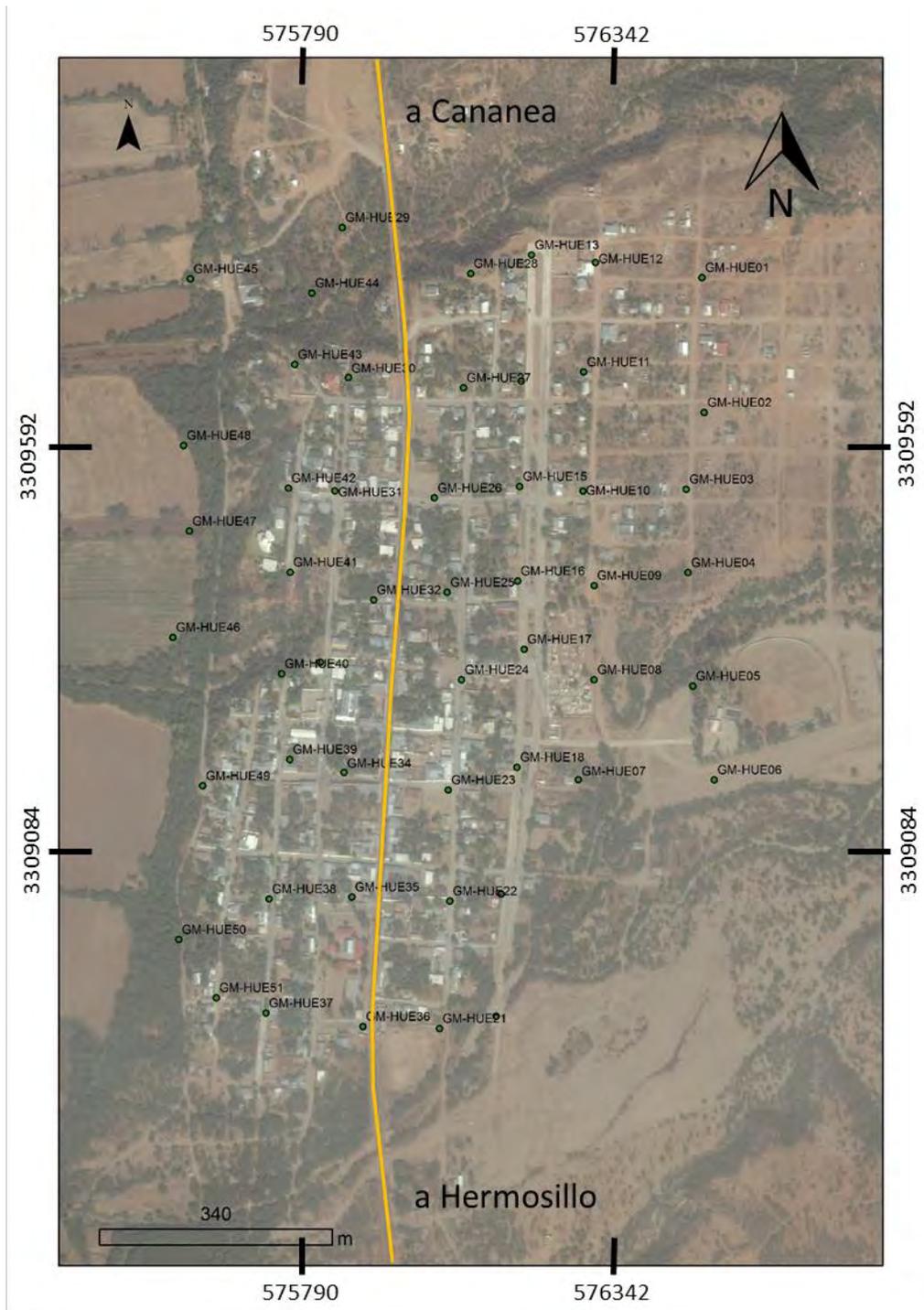


Figura 17. Localización geográfica de los puntos muestreados para la localidad de Huépac.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

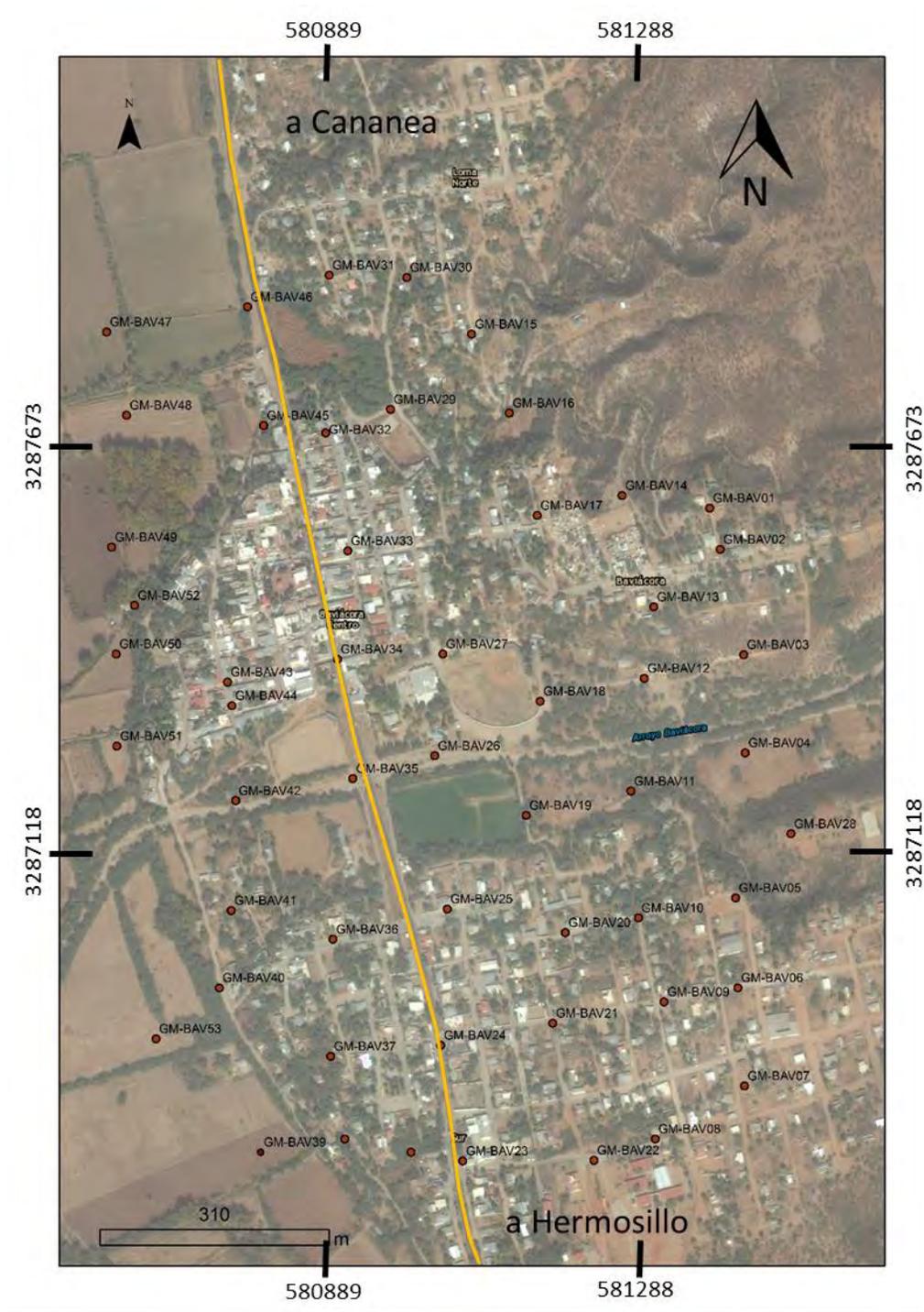


Figura 18. Localización geográfica de los puntos muestrados para la localidad de Baviácora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

La colecta de muestra de suelo se llevó a cabo de dos maneras debido a la naturaleza de las mismas muestras: 1. Muestras en calles pavimentadas: la muestra fue colectada realizando un barrido de una sección de la calle utilizando escoba y recogedor de plástico (procedimiento descrito en la misma norma). 2. Para las muestras de suelo, se utilizó una pala de jardinero. Las muestras se colectaron tomando el suelo superficial (0 cm a 5 cm) utilizando el método de tresbolillo (Figura 19), el cual consiste en tomar 5 muestras simples para formar una muestra compuesta. Las muestras colectadas se colocaron en bolsas de polipropileno previamente rotuladas con información referente al punto. Para evitar contaminación de las muestras durante la colecta, el equipo de muestreo se limpió entre muestra y muestra utilizando una brocha de cerda fina, además de “precontaminar” el equipo con suelo antes de tomar cada muestra (NMX-AA-132-SCFI-2006).

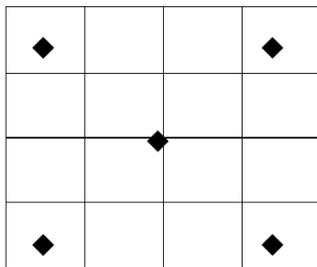


Figura 19. Método de muestreo utilizado para la toma de muestras “tresbolillo”, en un área de 1m²

Se retiraron restos de plantas y piedras mayores a 2 cm antes de tomar la muestra. Para el muestreo se utilizó el siguiente material: Pala de jardinero de acero inoxidable, bolsas de polietileno de alta densidad con cierre hermético, brocha de cerda fina, cinta métrica, marcadores permanentes de punto fino, cámara fotográfica y geoposicionador global (gps) marca Garmin modelo Oregon.

Durante el muestreo de suelos superficiales, se tomaron diversos cuidados y precauciones para el aseguramiento de calidad del muestreo. Para cada punto de muestreo, se tomó una fotografía y se georeferenció el punto. Para el traslado de las muestras y aseguramiento de calidad, se llenó una cadena de custodia, con el fin de resguardar la integridad de las muestras y su información de campo durante su traslado al laboratorio (Anexo 1)

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

IV.3. Preparación de muestra y análisis granulométrico.

Una vez obtenidas las muestras, se procedió a trabajarlas en laboratorio, lo cual consistió en lo siguiente. De cada una de las muestras se tomó aproximadamente 500 gramos, los cuales se pusieron a secar en un horno convencional marca VWR Scientific Products, HAFO Series 1600, durante un periodo de 24 horas a una temperatura no mayor de 36°C de temperatura. Una vez seca la muestra, se pesó en una báscula marca Ohaus. Después se procedió a tamizar la muestra utilizando un equipo Ro-TAP HAVER & BOECKER durante un periodo de 10 minutos, utilizando los siguientes tamices: mallas #18 (1.000 μm), #35 (0.500 μm), #60 (0.250 μm), #120 (0.125 μm), #230 (0.063 μm), #325 (0.044 μm) y malla # 635 (0.020 μm), hasta obtener la fracción < a 20 μm (Figura 20). Se buscó obtener esta última fracción, ya que se ha reportado en varios trabajos que la fracción <63 μm , es la que corresponde a un mayor factor de adherencia de suelo en manos (Yamamoto *et al.*, 2006; Siciliano *et al* 2010).



Figura 20. Procedimiento para la preparación de las muestras de suelo en el laboratorio.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

IV.3.1. Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo (ASTM, 2001). Este análisis se emplea de forma muy habitual, y es común para la identificación y caracterización de los materiales geológicos. En el caso de este estudio, la importancia radica en comprender la fracción de adherencia a manos y por lo tanto la vía de exposición oral a humanos. Estudios previos indican que en la estimación de riesgo se han utilizado fracciones de tamaños de partículas en suelos desde $<45 \mu\text{m}$ a $<2000 \mu\text{m}$ (Ruby y Lowney, 2012). Estos autores plantean la importancia del estudio textural para evaluar la bioaccesibilidad oral por exposición a suelos. Ruby y Lowney (2012), concluyen que la fracción recomendable es $<150 \mu\text{m}$ que corresponde a la malla 120. En este trabajo se utilizó una columna de 7 tamices #18, #35, #60, #120, #230, #325 y malla # 635 (que comprende a los tamaños de partícula desde $1000 \mu\text{m}$ a $< 20 \mu\text{m}$) con la finalidad de determinar el contenido de metales por malla y entender la distribución de los contaminantes en función de la fracción adherible a manos.

Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

Granulometría por tamizado es un proceso mecánico mediante el cual se separan las partículas de un suelo en sus diferentes tamaños, denominando a la fracción menor (Tamiz malla # 635) como limo, arcilla, ya que el diámetro de las partículas que pasan son de $20\mu\text{m}$ en adelante. Para obtener este diámetro de partícula, se lleva a cabo utilizando tamices en orden decreciente. La cantidad de suelo retenido indica el tamaño de la muestra, esto solo separa una porción de suelo entre dos tamaños. El análisis granulométrico por tamizado se realiza a las partículas con diámetros superiores a $0,075 \text{ mm}$ (Malla 200); este

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

ensayo se hace con una serie de mallas normalizadas (a cada número de malla le corresponde una abertura estándar), dispuestos en orden decreciente (Figura 21).

| Tamaño de tamiz ASTM | Tamaño de partículas (mm) | USDA | ISSS | CSSC | ASTM |
|--|---------------------------|--------------------|--------------|--------------------|------------------------|
| 635 325 230 120 60 35 18 | 0.0002 | Arcilla | Arcilla | Arcilla fina | Arcillas y limos finos |
| | 0.001 | | | Arcilla gruesa | |
| | 0.003 | Limos | Limos | Limos finos | |
| | 0.02 | | | Limos medios | |
| | 0.04 | | | Limos gruesos | |
| | 0.07 | Arena muy finas | Arenas finas | Arena muy finas | arena fina |
| | 0.1 | Arenas finas | | Arenas finas | |
| | 0.25 | Arenas medias | Arena gruesa | Arenas medias | |
| | 0.5 | Arenas gruesas | | Arenas gruesas | |
| | 0.8 | Arenas muy gruesas | | Arenas muy gruesas | |
| 1.0 | Grava fina | Grava | Grava | Arena gruesa | |
| 1.5 | | | | Grava fina | |
| 2.0 | | | | Grava gruesa | |
| 3.0 | Grava gruesa | Grava | Grava | Grava gruesa | |
| <10 | | | | Grava gruesa | |

Figura 21. Tamaño de partículas con respecto al número de tamiz en relación a los distintos tipos de clasificación de tamaños de partículas. USDA – U. S. Department of Agriculture.; CSSC – Canada Soil Sourvey Commitee. ISSS – International Soil SCI. SOC.; ASTM – American Society for Testing & Materials.

La textura de los suelos estudiados se representa en función de su distribución de tamaño o fracción de masas de partículas, esto en forma de diagramas de distribución acumulativa de tamaño de partícula. En dicho diagrama se expresa el diámetro de partícula con respecto a fracción de masa que pasa cada malla utilizada (Figura 22). Este tipo de representación permite identificar la proporción de fracciones finas contra gruesas, de forma más fácil.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

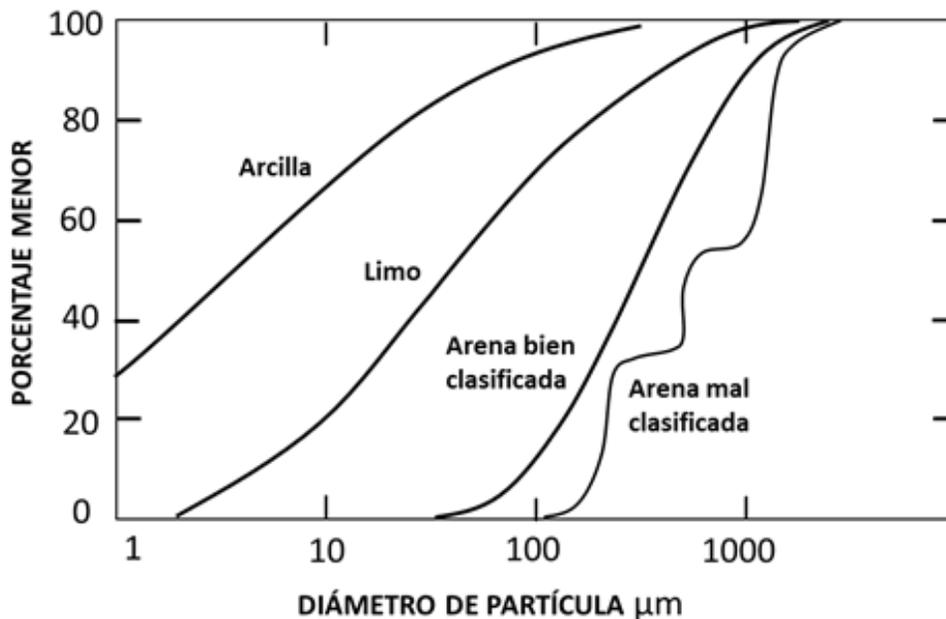


Figura 22. Diámetro de partícula con respecto a la fracción de masa que pasa por la malla. (Tuller y Or, 2004).

IV.4. Técnicas analíticas en análisis de metales.

IV.4.1. Fluorescencia de rayos x con tubos miniaturizados y control de calidad.

Las concentraciones totales de metales se determinaron siguiendo el método 6200 US-EPA (2007), para equipos portátiles de Fluorescencia de Rayos X, utilizando un analizador portátil NITTON XLt3 de Thermo Scientific del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía LANGEM, del laboratorio de geoquímica de la Universidad de Sonora (Figura 23). Los procedimientos de calibración y control de calidad se realizaron de acuerdo a los procedimientos estandarizados en el Método 6200 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA, 2007). Actualmente, este método ya se encuentra validado para matrices de suelo (Martínez - Zatarain *et al.*, 2015). El control de calidad incluye análisis de blancos, material de referencia (exactitud) y análisis de estándares certificados con siete réplicas (precisión). Se anexa tabla con límites de detección del equipo (Anexo 2).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Las limitaciones de este equipo se centran principalmente en la detección de elementos ligeros como Si, Al, Li, Be, P, B, C. También en el cuidado del operador al momento de colocar la muestra en el lector (ventana), ya que este solo analiza la porción que se encuentre en el área del lector.



Figura 23. Equipo de Fluorescencia de rayos x, utilizado para la obtención de las concentraciones de metales.

En el presente trabajo se calculó la precisión, la cual consiste realizar un análisis de estándares certificados (NIST 2709^a, 2710^a y 2711) por 60 segundos, con 7 réplicas (Tabla 10). Los elementos analizados son: Zr, Sr, U, Rb, Th, Pb, Se, As, Hg, Zn, W, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Ti, Sc, Ca, K, Sb, Cd, Ag. Las concentraciones se expresaron en miligramo por kilo (mg/kg) ó porcentaje en peso (wt%), obteniéndose la desviación estándar relativa (RSD) del elemento medido utilizando la ecuación 5. Los valores de RSD deben de ser menores al 20% para casi todos los elementos, excepto para el cromo, el cual debe de ser menor a 30%, según método 6200 US-EPA (2007).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Ecuación para el cálculo del RSD

$$\text{RSD} = (\text{SD}/\text{Concentración media}) \times 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

RSD = Desviación estándar relativa para la precisión medida de cada elemento.

SD = Desviación estándar de la concentración del elemento.

Concentración media = Concentración media del elemento.

La exactitud es calculada mediante el porcentaje de diferencia D (%D), esto es obtenido a partir del análisis de un estándar (NIST 2709^a, 2710^a y 2711) por 60 segundos y 7 réplicas (Tabla 10) US-EPA (2007). Se hace la comparación del promedio obtenido para cada elemento con los valores del estándar certificado usado, y se calcula el %D utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación para obtención del porcentaje de diferencia %D

$$\%D = ((C_s - C_k) / C_k) \cdot (100) \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

%D = Porcentaje de diferencia.

C_k = Valor de concentración del estándar certificado.

C_s = Valor del promedio medido del estándar.

Los resultados del programa de control de calidad durante el análisis de fluorescencia de Rayos X, se pueden apreciar en la Figura 24. Teniéndose los siguientes elementos dentro del rango de porcentaje de diferencia (%D): Fe, Cu, Mn, Cr, Zn, As, Pb, Zr, Sr, Rb, W, Ti, Ca y K.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

1 **Tabla 10.** Recuperación de metales en los estándares certificados en matrices de suelos (NIST: 2709^a, 2710^a, 2711).

| Estándar Método Elemento | Valor real (mg.kg ⁻¹) | NIST SRM 2709a | | | | | | Valor real (mg.kg ⁻¹) | NIST SRM 2710a | | | | | | Valor real (mg.kg ⁻¹) | NIST SRM 2711 | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------------|-------|------|--------------|-------|-----|--------------------------------------|----------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------------------------------|---------------|--------|-------|--------------|------|-------|
| | | Soils | | | Test All Geo | | | | Soils | | | Test All Geo | | | | Soils | | | Test All Geo | | |
| | | Mean | RSD | %D | Mean | RSD | %D | | Mean | RSD | %D | Mean | RSD | %D | | Mean | RSD | %D | Mean | RSD | %D |
| Zr | 195 | 150.82 | 0.84 | -23 | 162.05 | 0.83 | -17 | 200 | 232.70 | 0.64 | 16.35 | 228.55 | 1.03 | 14.28 | - | - | - | - | - | - | - |
| Sr | 239 | 227.60 | 0.98 | -5 | 226.71 | 0.72 | -5 | 255 | 251.60 | 0.88 | -1.33 | 251.34 | 0.40 | -1.43 | 242 | 227.78 | 1.19 | -5.88 | 225.33 | 0.52 | -6.89 |
| U | 3.2 | 3.15 | 85.49 | 0.27 | 3.94 | 71.14 | 25 | 9.11 | 7.38 | 56.18 | -39 | 9.65 | 19.96 | 5.93 | 3.01 | 1.68 | 106.69 | -44 | 1 | 0 | 67 |
| Rb | 99 | 86.87 | 1.67 | -12 | 85.99 | 1.01 | -13 | 117 | 112.21 | 1.04 | -4.09 | 111.43 | 1.50 | -4.76 | 120 | 112.49 | 1.13 | -6.26 | 112.30 | 1.09 | -6.42 |
| Pb | 17.3 | 6.75 | 23.15 | -61 | 14.94 | 7.52 | -14 | 5520 | 5778.61 | 0.55 | 4.69 | 5775.46 | 0.28 | 4.63 | 1400 | 1467 | 0.87 | 4.77 | 1430 | 0.51 | 2.16 |
| As | 10.5 | 9.41 | 15.70 | -10 | 9.20 | 14.78 | -12 | 1540 | 1685 | 1.06 | 9.38 | 1679.15 | 1.62 | 9.04 | 107 | 119.24 | 5.72 | 11.44 | 121.95 | 6.12 | 13.97 |
| Zn | 103 | 72.73 | 1.31 | -29 | 92.80 | 3.57 | -10 | 4180 | 4305.62 | 0.59 | 3.01 | 4279.42 | 0.54 | 2.38 | 414 | 371.80 | 1.40 | -10 | 372.94 | 1.65 | -9.92 |
| W | N.R. | - | - | - | - | - | - | 190 | 163.89 | 7.4 | -14 | 199 | 6.54 | 4.73 | - | - | - | - | - | - | - |
| Cu | 33.9 | 35.41 | 9.65 | 4.45 | 37.13 | 6.53 | 10 | 3420 | 3662.35 | 0.54 | 7.09 | 3659.09 | 0.39 | 6.99 | 140 | 128 | 1.61 | -8.57 | 130.16 | 4.30 | -7.03 |
| Fe | 33600 | 29357 | 0.51 | -13 | 28987 | 0.31 | -14 | 43200 | 46433 | 0.58 | 7.48 | 46064 | 0.45 | 6.63 | 28200 | 23694 | 0.40 | -16 | 23997 | 0.26 | -14.9 |
| Mn | 529 | 468.01 | 4.92 | -12 | 488.97 | 4.68 | -8 | 2140 | 2124.29 | 1.33 | -0.73 | 2088 | 1.36 | -2.43 | 675 | 407.82 | 4.66 | -40 | 429.91 | 4.39 | 36.31 |
| Cr | 130 | 101.39 | 2.48 | -22 | 101.40 | 4.79 | -22 | 23 | 38.19 | 10.72 | 66.04 | 39.44 | 9.07 | 71.48 | 52.30 | 48.61 | 7.84 | -7.06 | 48.10 | 5.35 | -8.04 |
| V | 110 | 113.36 | 5.17 | 3.06 | 115.80 | 5.13 | 5 | 82 | 99.25 | 11.33 | 21.03 | 98.04 | 5.64 | 19.57 | 80.70 | 82.71 | 6.22 | 2.49 | 82.10 | 6.33 | 1.73 |
| Ti | 3360 | 3663 | 1.34 | 9.02 | 3678.63 | 0.47 | 9 | 3110 | 3053.72 | 1.48 | -1.81 | 3080 | 1.37 | -0.97 | 3170 | 2622.70 | 0.94 | -17 | 2709.94 | 0.44 | 14.51 |
| Ca | 19100 | 20804 | 0.56 | 8.92 | 20791 | 0.42 | 9 | 9640 | 8245.60 | 0.73 | -15 | 8376 | 0.77 | 13.12 | 24200 | 22207.55 | 0.70 | -8.23 | 22391.49 | 0.28 | -7.47 |
| K | 21100 | 19486 | 0.55 | -8 | 19693 | 0.70 | -7 | 21700 | 20574 | 0.65 | -5.19 | 20812 | 0.52 | -4.09 | 25300 | 21983.56 | 0.56 | -13 | 22033.83 | 0.33 | 12.91 |

2
3 Nota: De los elementos químicos asociados al derrame no se midieron por esta técnica el Al y el Cd. El método 6200 USEPA considera como aceptable un
4 %D entre -20 a +20, excepto para el Cr con un %D entre -30 a +30. El límite de cuantificación del método para Cr es de 52 mg.kg⁻¹ NR: No reportado. Nota:
5 El límite de cuantificación del método para cromo se estimó en base a la recuperación del estándar NIST 2711. Para valores menores a 40 mg.kg⁻¹, no se
6 puede obtener una recuperación aceptable (caso del estándar NIST SRM 2710 a): Soil y Test All Geo = modo de análisis de equipo de fluorescencia de rayos
7 x. US- EPA, Metodo 6200 (2007).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

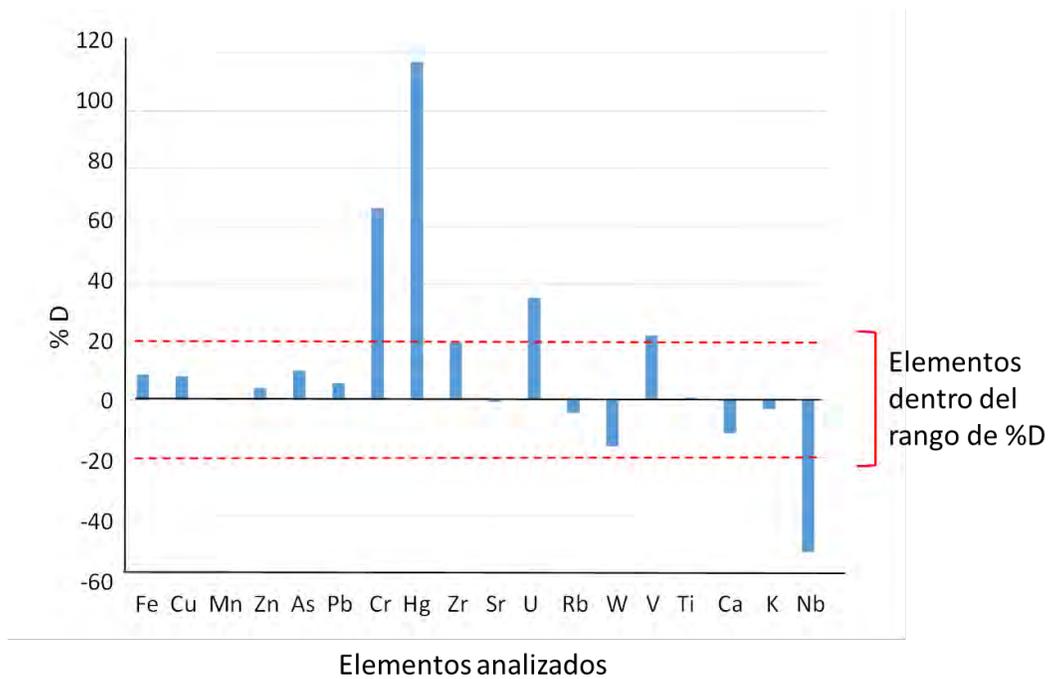


Figura 24. Análisis de precisión y exactitud (porcentaje de diferencia %D), utilizando como ejemplo el estándar NIST 2710a Montana Soil. Los elementos que se encuentran dentro del rango $\pm 20\%$, (Método 6200 US-EPA) serán los que se utilizarán en el presente estudio.

IV.4.2. Bioaccesibilidad.

Se realizaron las pruebas de bioaccesibilidad gástrica en laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología Universidad Nacional Autónoma de México y que forma parte del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía. Se seleccionó la fracción granulométrica que pasa la malla #60 ($< 250 \mu\text{m}$) y se aplicó el método analítico para determinar la bioaccesibilidad descrito en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. De esta manera, se determinó la bioaccesibilidad de elementos críticos, como por ejemplo los asociados a eventos como el derrame del río Sonora en las tres localidades de estudio. El método de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 describe un procedimiento de laboratorio in vitro que permite predecir la bioaccesibilidad de elementos

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

potencialmente tóxicos como As, Pb, Zn y Cd contenidos en una matriz sólida de naturaleza inorgánica. Este método establece parámetros representativos del tracto gastrointestinal de los seres humanos tales como pH del estómago, temperatura, composición química y tiempo de residencia, similares a los procesos de digestión humana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1, 2004).

El método llamado TCLP (siglas en inglés para: Procedimiento para Caracterización de Toxicidad) involucra el empleo de un equipo extractor, el cual consiste en un motor con una volanta, una caja de plexiglás, en el interior gira una placa del mismo material, con 10 agujeros de 5 cm (cada uno de estos agujeros, está diseñado para sostener frascos de plásticos de HDPE herméticos) y sujetadores de acero inoxidable (Figura 25). La caja se llena con agua hasta que los frascos queden sumergidos, la temperatura dentro del baño es mantenida a 37 °C mediante un calentador tipo resistencia y termostatos (NOM-147-SEMARNAT/SSA1, 2004).

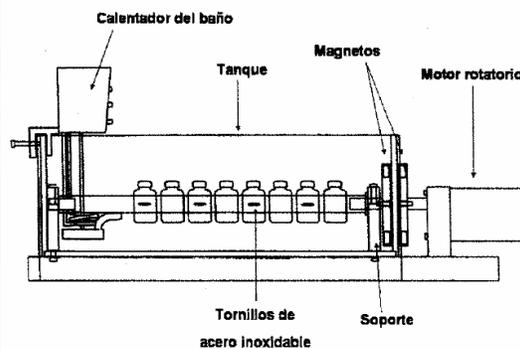


Figura 25. Equipo utilizado en realización de pruebas de bioaccesibilidad gástrica (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004), localizado en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental de la Universidad Autónoma de México.

El fluido dentro del reactor se compone de una mezcla gástrica de agua destilada con glicina 100mL (base libre, ultra sigma o equivalente), ajustada a un pH de 1.50 ± 0.05 utilizando HCl 12, 1 N. Se le agrega 1 gramo del sustrato a analizar ($<250 \mu\text{m}$) al frasco, asegurando que no haya estática, para que las partículas del sustrato no se adhieran a la

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

boca del frasco. Se agita en busca de fugas y para que no queden grumos, los frascos son puestos en el equipo de extracción y se ajusta la temperatura del agua a 37°C. Después de una hora de agitación en el equipo, se extrae una alícuota de 10 ml y se filtra en membrana de 0.45 µm. Se determina la concentración de metales en el extracto gástrico a la que se denomina “concentración del extracto gástrico in vitro” mg/L; ésta es utilizada para el cálculo de la bioaccesibilidad gástrica. La concentración de metales en el extracto se determinó por medio de la técnica de Espectroscopia de Masas con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES) en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, localizado en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. A partir de estos resultados, se calcula la bioaccesibilidad gástrica BAF utilizando la formula siguiente.

$$\text{Bioaccesibilidad gástrica} = \frac{\text{Concentración del extracto gástrico in vitro, mg/L} \times 0.1\text{L}}{\text{Concentración en sólido, mg/Kg} \times 0.001 \text{ Kg}}$$

IV.4.3. Estimación del riesgo.

La evaluación de riesgo a la salud humana es un proceso utilizado para estimar los efectos a la salud que pudiesen resultar de la exposición a elementos químicos carcinogénicos o no-carcinogénicos, (US-EPA, 2001). La evaluación de riesgo a salud humana es un proceso creado para evaluar los siguientes puntos: identificación de riesgos, evaluación de la exposición, evaluación de la toxicidad (dosis-respuesta) y caracterización del riesgo. De esta manera, el propósito de la evaluación a la exposición es calcular o estimar la intensidad, frecuencia y duración de la exposición humana a ambientes contaminados (Wang *et al.*, 2005; Kamunda *et al.*, 2016). La caracterización del riesgo predice el potencial de riesgo a la salud, cancerígeno y no-cancerígeno (US-EPA, 2004).

Para llevar a cabo la evaluación de riesgo en el análisis de suelos, se utilizaron las vías de exposición (ingestión) a metales pesados utilizada en diversas publicaciones (Kamunda *et*

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

al., 2016), donde se obtendrá la dosis diaria promedio de ingestión ADD (siglas en inglés o Average Daily Dose) utilizando la siguiente formula:

$$ADD = [C^{soil} \times IR \times EF \times ED] / [AT \times BW] \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

ADD = es la dosis diaria promedio de ingesta, se expresa en mg/kg.día;

C^{soil} = es la concentración en mg/kg del metal o metaloide de interés en la fracción de suelo que pasa la malla 60 (menor a 250 micras de diámetro aerodinámico);

IR = es la tasa de ingestión por día (mg/día) obtenida de bibliografía y de las encuestas a la población, calculada por cohorte poblacional.

EF = es la frecuencia de exposición en día/año;

ED = es la duración de la exposición en años (edad por cohorte) expresada en años;

AT = es la esperanza de vida en días.

BW = es el peso corporal en promedio por cohorte por poblado.

La tasa de ingesta diaria se calculó en 200 mg/día para niños y 100 mg/día en adultos. Como dato relevante, según la Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgo ambiental de sitios contaminados (SEMARNAT, 2006), no existe un valor confiable en la literatura para el cálculo de la ingesta de polvo. Según la US-EPA (1998), se reporta que la población en general tiene una ingesta de suelo y partículas de polvo aproximado en el rango de los 100 mg/día para niños y para adultos de 50 mg/día. Estas tasas de ingesta pueden variar considerablemente debido a condiciones climatológicas, desarrollo económico, tipo de urbanización, etc. De esta manera, los valores de ingesta se pueden incrementar considerablemente hasta valores de 50,000 mg/día en personas con geofagia. (US-EPA, 2011).

El cálculo de riesgo HQ (Hazard Quotient) es un término o número que no presenta unidades, es solo un número, el cual si es mayor a 1 ($HQ > 1$) existe la probabilidad de que

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

un individuo sufra un efecto adverso. El cálculo de riesgo se estima con la siguiente ecuación:

$$\text{HQ} = (\text{ADD} / \text{RfD}) \cdot (\text{BAF}) \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

HQ = es el cociente de riesgo (Hazard Quotient).

RfD = es la dosis oral de referencia. (Tabla 11)

BAF = bioaccesibilidad para metales y metaloides en muestras de suelos, obtenida a partir de pruebas in vitro según especificaciones de la NOM-147-SEMARNAT_SSA1-2004.

Tabla 11. Contaminantes criterio y dosis de referencia.

| Contaminante crítico | Criterios | DdR | Referencia |
|----------------------|----------------------|-------|------------|
| Arsénico (As) | Asociados al derrame | 3E-04 | USEPA |
| Cobre (Cu) | Asociados al derrame | 4E-02 | USEPA |
| Manganeso (Mn) | Asociados al derrame | 2E-02 | USEPA |
| Plomo (Pb) | Asociados al derrame | | |
| Cromo (Cr) | Asociados al derrame | | |
| Zinc (Zn) | Asociados al derrame | 3E-01 | USEPA |

*Tomado de US EPA – IRIS, (2017) list of chemicals.

Finalmente, se obtiene el cálculo de riesgo integrado HI (Hazard Integrated) el cual no presenta unidades, es solo un número, si es mayor a 1 ($HI > 1$) existe la probabilidad de que un individuo sufra un efecto adverso a la salud en un tiempo de exposición prolongado. El cálculo de riesgo integrado se estima con la sumatoria de la contribución de cada cálculo de riesgo HQ para cada metal analizado y se expresa con la siguiente ecuación:

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

$$HI = \Sigma (HQ \cdot BAF)_i \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

HI = es el cociente de riesgo integrado (Hazard Integrated).

HQ = es el cociente de riesgo (Hazard Quotient)

BAF = bioaccesibilidad para metales y metaloides en muestras de suelos, obtenida a partir de pruebas in vitro según especificaciones de la NOM-147-SEMARNAT_SSA1-2004.

i = metal analizado.

IV.4.4. Estimación de riesgo por exposición a plomo (Modelo IEUBK).

El modelo IEUBK (Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model), es un modelo de simulación recomendado como herramienta en la estimación del riesgo a la salud de niños por exposición a plomo. Este modelo se alimenta con datos sobre la exposición a plomo que se tiene de los diversos medios; de esta manera, el programa modela un estimado sobre los niveles de plomo en sangre en niños. El plomo es un elemento no esencial que ocurre naturalmente y por acción humana, siguiendo diferentes rutas de forma similar a metales como el calcio (nutriente). En el escenario humano, las rutas de exposición transfieren el plomo de fuentes como los alimentos, el agua de consumo, aire, suelo y polvo, al cuerpo humano por medio de la ingestión o inhalación. Para la implementación del modelo se utilizaron datos de bioaccesibilidad gástrica para las muestras con los valores máximos de plomo, esto proporciona un escenario conservador para la evaluación del riesgo en niños por exposición a plomo.

El modelo calcula la probabilidad de que los niveles de plomo en sangre de niños expuestos excedan el valor de 10 µg/dL. Este valor se relaciona con efectos adversos a la salud de niños (US-EPA, 1986, 1994). Los resultados en este trabajo se expresan en una curva de distribución para poblaciones de niños de 0 a 7 años de edad expuestos a valores máximos de Pb encontrados en matrices de suelo, siendo este escenario el más conservador, es decir

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

el de riesgo máximo posible. Para estimar el riesgo por exposición a través de la ruta de ingestión, se consideraron los valores de bioaccesibilidad gástrica obtenidos por el método in vitro de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Para generar los mapas, se utilizó el software modelador IEUBK (Integrated Exposure Uptake Biokinetic) versión 1.1 build11 desarrollado por la EPA (1994) (Environmental Protection Agency) y el Centro de Investigación Syracuse Research Corporation, con el cual se modela y calcula niveles de plomo en sangre para niños que se presume han estado expuestos a concentraciones de este metal. Para modelar los escenarios, se va alimentando el programa con datos de exposición a plomo en suelo, aire, agua y alimentos.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la finalidad de simplificar la presentación de los resultados, éstos se discutirán en la misma sección, ya que la información generada se integrará para las tres localidades estudiadas.

V.1. Análisis textural de suelos y relación con adherencia a manos.

En esta sección se trabaja una comparación de la fracción que se adhiere a manos descrita en Ruby & Lowney (2016) en base a trabajos realizados por Yamamoto *et al.* (2006) y Siciliano *et al.* (2010). Estos investigadores desarrollaron sus trabajos en base al tamaño de partículas que se adhieren a las manos [Yamamoto *et al.* (2006), trabajaron con partículas adheridas a manos de niños en edad pre-escolar; Siciliano *et al.*, (2010), estudiaron partículas adheridas a manos de voluntarios de diversas edades, los cuales estuvieron en contacto con suelos agrícolas y suelos de zonas industriales]. En los trabajos consultados, las partículas fueron obtenidas lavando las manos de los individuos mediante diversas técnicas, para después ser analizadas por un equipo analizador del tamaño de partículas. Al respecto, se reportan resultados similares en ambos estudios (Figura 26). Para Yamamoto *et al.* (2006), y su estudio en 9 niños, se obtuvo que el diámetro de partículas que se adhieren a manos fluctúa aproximadamente entre 15 – 90 μm , para el trabajo de Siciliano *et al.*, (2010), se obtuvo que el diámetro de partículas que se adhieren a manos se encuentra aproximadamente entre 34 – 105 μm . Lo que concuerda con otros estudios realizados (Duggan *et al.*, 1985, Kissel *et al.*, 1996, Choate *et al.*, 2006) sobre el tamaño de partícula que se adhiere a manos (Ruby & Lowney, 2016).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

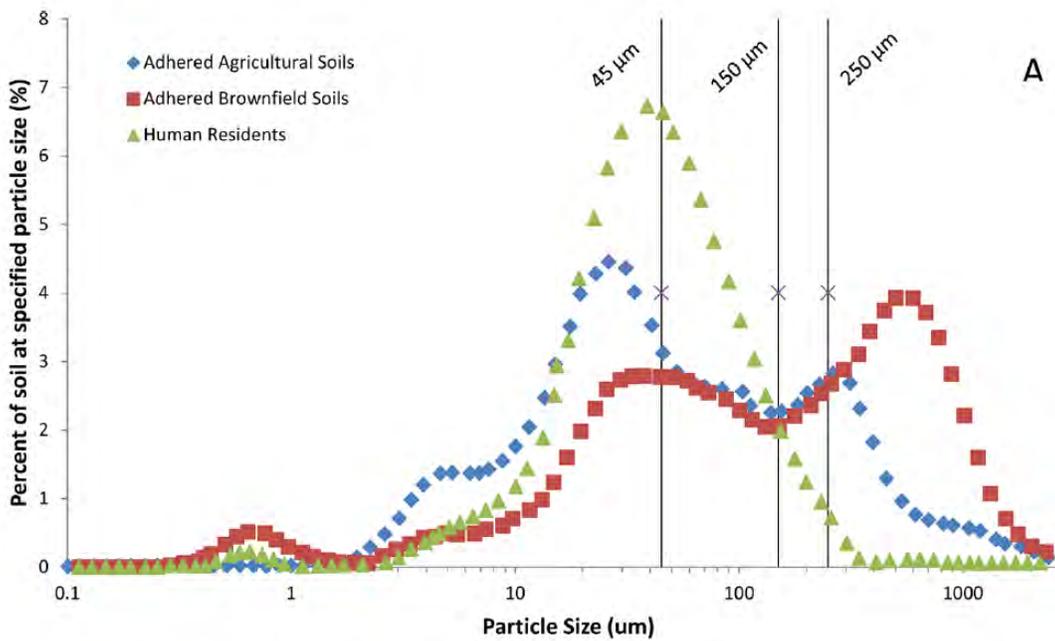
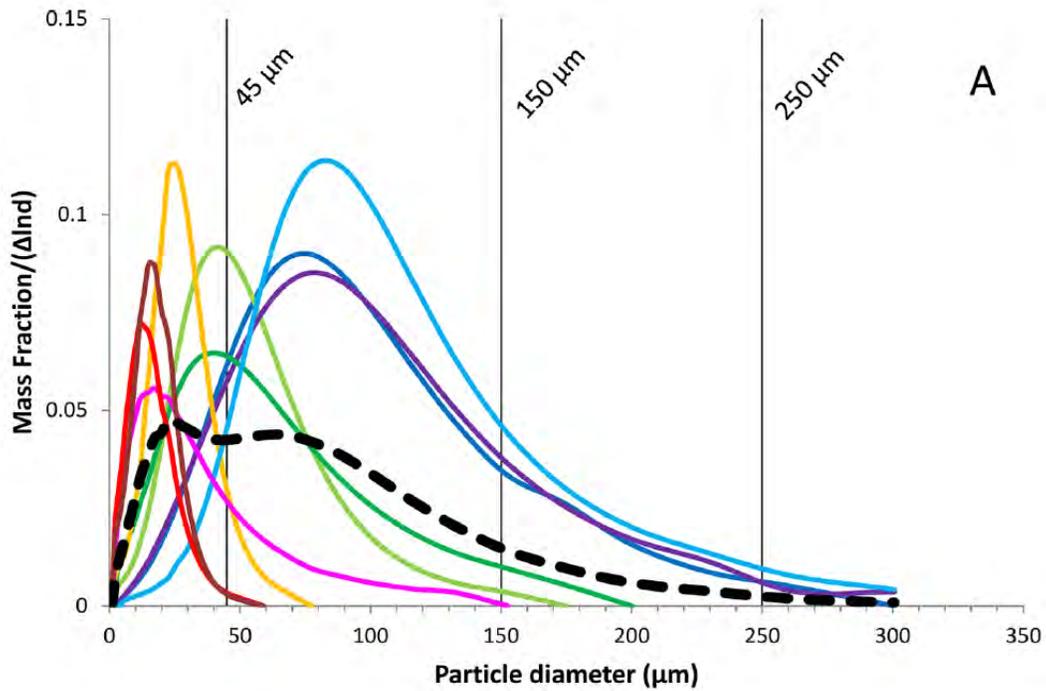


Figura 26. Resultados obtenidos por Yamamoto *et al.*, (2006) y Siciliano *et al.*, (2010) respectivamente, sobre la distribución del tamaño de partícula adherida a manos. *Figuras tomadas de: Ruby et al (2016).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

En el presente estudio, se encontró que las muestras de suelo para las tres localidades son muy similares en el análisis granulométrico (textura) (Figuras 27, 28, 29 y 30). La mayoría de las muestras están compuestas principalmente por arenas finas (0.25mm) y arenas gruesas (> a 1mm), en 65% del total de la muestra para esa fracción aproximadamente. La fracción fina representa un porcentaje importante, siendo aproximadamente el 25%; esta fracción se encuentra compuesta por partículas de arenas muy finas (0.250 – 125µm, malla # 60 a mallas # 120). Sin embargo, se tiene que la porción de partículas más finas (limos y arcillas) corresponde a un 15% aproximado de la muestra (<0.125 – 0.02 µm, malla # 120 a malla # 635). Correlacionando este trabajo de investigación con el de otros autores, se puede ver como las muestras de suelo procesadas en este trabajo están compuestas por un 15% aproximadamente de partículas finas, las cuales según Yamamoto *et al.* (2006) y Siciliano *et al.* (2010) son partículas de suelo que se encuentran dentro de los rangos de potencialmente adheribles a manos.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

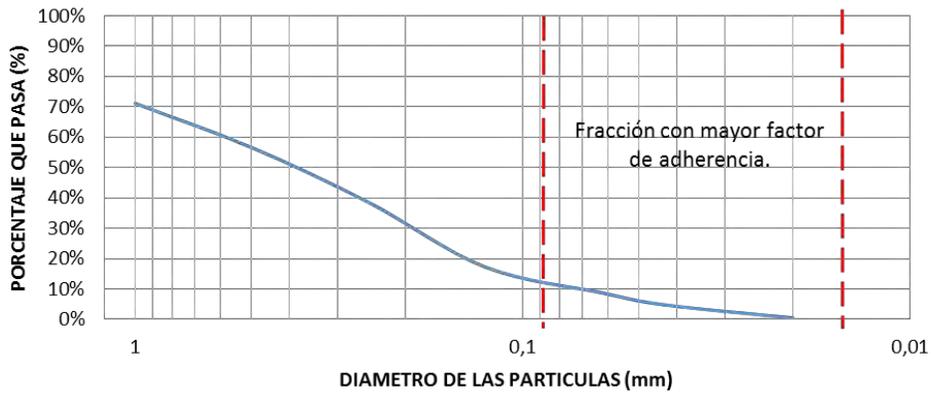


Figura 27. Curva de distribución granulométrica para la localidad de Banámichi.

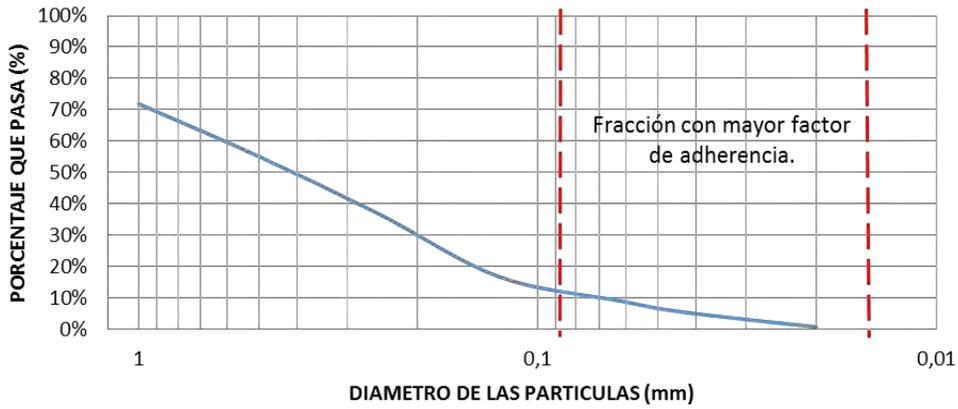


Figura 28. Curva de distribución granulométrica para la localidad de Huépac.

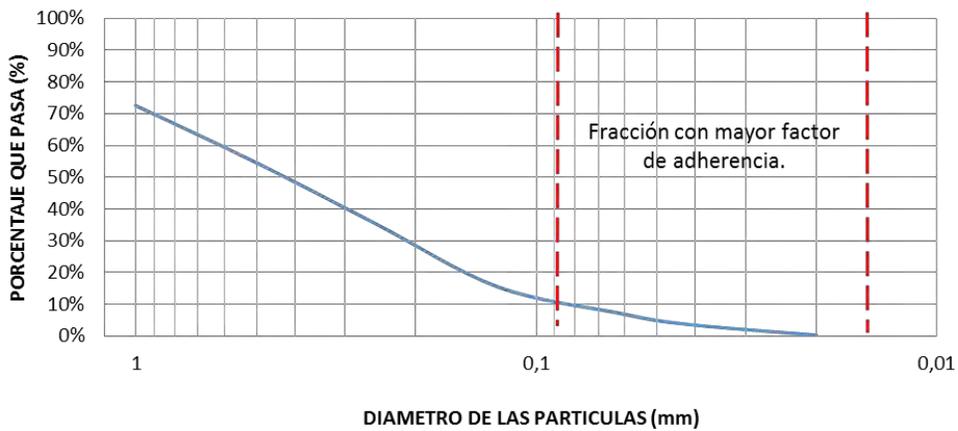


Figura 29. Curva de distribución granulométrica para la localidad de Baviácora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

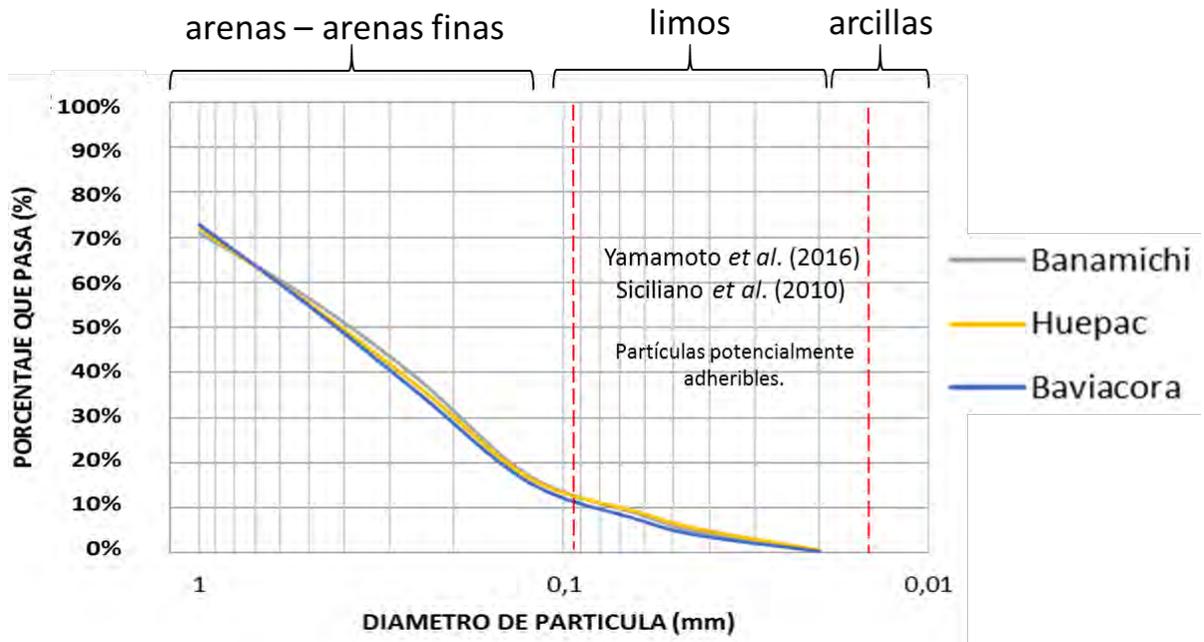


Figura 30. Comparación de análisis textural entre localidades estudiadas, se observa una tendencia a suelos mayormente arenosos.

De las tres poblaciones estudiadas, Huépac presenta el mayor porcentaje en fracción granulométrica adherible a manos (aunque los valores son muy similares a Banámichi), mientras que Baviácora presenta el menor porcentaje. En la Figura 30, se puede observar que aproximadamente el 15% del total de la granulometría de la muestra, corresponde a las partículas más finas y potencialmente adheribles a manos, las cuales se encuentran en las fracciones 0.125 - 0.02 μm (correspondientes a las mallas #120 a # 635 aproximadamente). Dentro del 15% de suelo que supone estar dentro del rango de adherencia, se tiene las siguientes concentraciones de metales correspondientes a la fracción <635 (correspondiente a 0.02 μm) (Figura 31). Se toma la fracción más fina, ya que se ha encontrado en diversos estudios (Jiao *et al.*, 2015) y en este trabajo, que hay una tendencia en el incremento de las concentraciones de metales en fracciones más finas.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

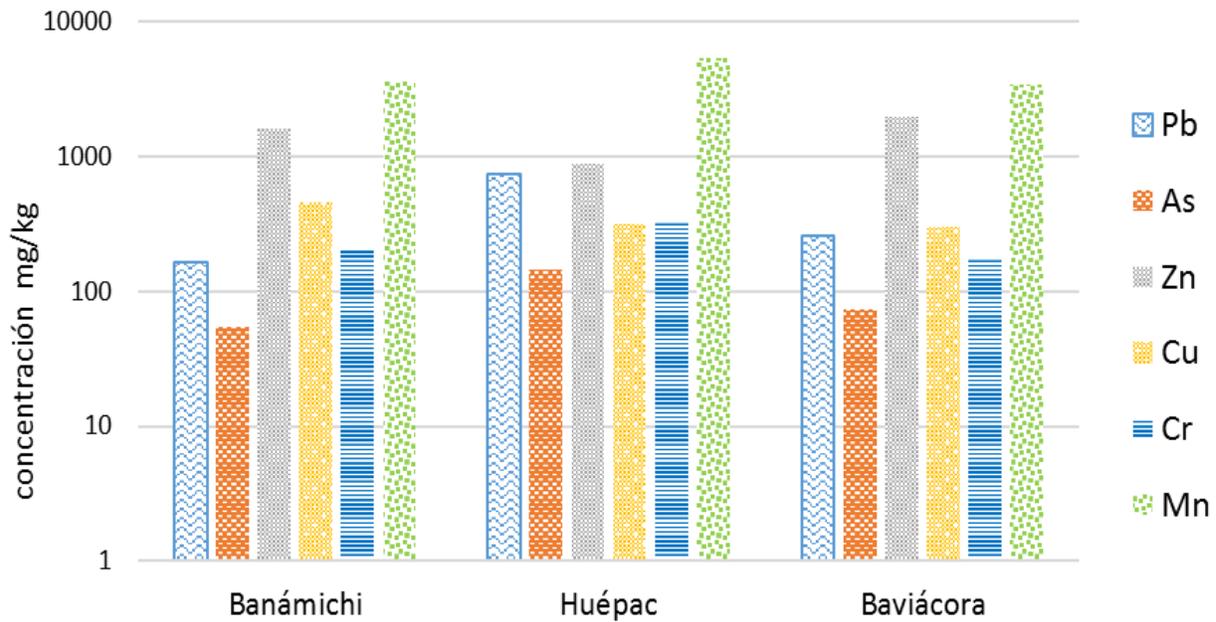


Figura 31. Concentración de metales obtenida en fracción menor a 20 μm (partículas potencialmente adheribles a manos).

V.2. Metales y metaloides en suelos

A partir del análisis de precisión (%RSD) y exactitud (%D) por la técnica PXRF se seleccionaron los elementos que cumplieron con los parámetros de control de calidad indicados en el método 6200 USEPA (2007), y que se encontraban presentes en la solución derramada en Agosto de 2014. En base a esto los elementos seleccionados para la interpretación y discusión son: Pb, As, Zn, Cr, Cu y Mn. Las siguientes tablas (establecen un comparativo con valores de fondo locales (suelos no impactados por actividad urbana o el Río Sonora) (Tablas 12, 13 y 14). La intención de estas tablas no es la determinación del contaminante crítico sino comprender el contexto geoquímico y la posible fuente, sin embargo, el tema de esta investigación se centra en la estimación del riesgo, sin distinguir la asociación con alguna fuente en particular.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Tabla 12. Comparativo de valores de los elementos analizados en Banámichi. NR: no reportado

| Banámichi | | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|
| Elementos con valor certificado | Concentración promedio mg/kg | Valores de fondo mg/kg | Mayor a valor de fondo | %D dentro de rango | Índice de Peligro <1 No, >1 Si = C.C. | Valores de referencia | | Elementos identificados en derrame |
| | | | | | | NOM 147 mg/kg | US EPA RfD mg/kg día | |
| Zr | 321,60 | 148,55 | Si | Zr | 2,16 | | | |
| Sr | 408,81 | 179,08 | Si | Sr | 2,28 | | | |
| U | 7,10 | 3,07 | Si | | 2,31 | | | |
| Rb | 101,61 | 93,55 | Si | Rb | 1,09 | | | |
| Th | 13,90 | 13,08 | Si | | 1,06 | | | |
| Pb | 42,10 | 8,80 | Si | Pb | 4,78 | 400 | | Pb |
| As | 18,42 | 3,96 | Si | As | 4,65 | 22 | 0.0003 | As |
| Hg | 11,95 | N/D | | | | 23 | | Hg |
| Zn | 141,71 | 47,90 | Si | Zn | 2,96 | | 0.3 | Zn |
| W | 60,98 | 1,66 | Si | W | 36,74 | | | |
| Cu | 49,59 | 17,64 | Si | Cu | 2,81 | | 0.04 | Cu |
| Fe | 41346,04 | NR | | Fe | | | | Fe |
| Mn | 761,23 | NR | | Mn | | | 0.02 | Mn |
| Cr | 75,79 | 26,51 | Si | | 2,86 | 280 | 0.005 | Cr |
| V | 115,45 | 65,35 | Si | | 1,77 | 78 | 0.007 | |
| Ti | 4542,07 | N/D | | Ti | | | | |
| Sc | 49,10 | 8,54 | Si | | | | | |
| Ca | 21878,60 | N/D | | Ca | | | | |
| K | 17220,72 | N/D | | K | | | | |
| Nb | 17,14 | 10,27 | Si | | 1,67 | | | |
| Y | 24,06 | 21,56 | Si | | 1,12 | | | |

Tabla 13. Comparativo de valores de los elementos analizados en Huépac. NR: no reportado

| Huépac | | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|
| Elementos con valor certificado | Concentración promedio mg/kg | Valores de fondo mg/kg | Mayor a valor de fondo | %D dentro de rango | Índice de Peligro <1 No, >1 Si = C.C. | Valores de referencia | | Elementos identificados en derrame |
| | | | | | | NOM 147 mg/kg | US EPA RfD mg/kg día | |
| Zr | 326,00 | 185 | si | Zr | 1,76 | | | |
| Sr | 356,96 | 287,33 | si | Sr | 1,24 | | | |
| U | 7,94 | 6,13 | si | | 1,29 | | | |
| Rb | 121,93 | 167,00 | No | Rb | 0,73 | | | |
| Th | 18,22 | 16,57 | si | | 1,10 | | | |
| Pb | 70,86 | 22,33 | si | Pb | 3,17 | 400 | | Pb |
| As | 24,00 | 16,50 | si | As | 1,45 | 22 | 0.0003 | As |
| Hg | 0,89 | N/D | | | | 23 | | Hg |
| Zn | 153,39 | 206,67 | No | Zn | 0,74 | | 0.3 | Zn |
| W | 44,38 | 5,33 | si | W | 8,32 | | | |
| Cu | 47,26 | 10,00 | si | Cu | 4,73 | | 0.04 | Cu |
| Fe | 34363,39 | NR | | Fe | | | | Fe |
| Mn | 765,47 | NR | | Mn | | | 0.02 | Mn |
| Cr | 62,72 | 20,00 | si | | 3,14 | 280 | 0.005 | Cr |
| V | 100,49 | 38,67 | si | | 2,60 | 78 | 0.007 | |
| Ti | 3867,94 | N/D | | Ti | | | | |
| Sc | 71,04 | 5,67 | si | | | | | |
| Ca | 23062,76 | N/D | | Ca | | | | |
| K | 18854,34 | N/D | | K | | | | |
| Nb | 17,16 | 11,00 | si | | 1,56 | | | |
| Y | 25,96 | 25,67 | No | | 1,01 | | | |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Tabla 14. Comparativo de valores de los elementos analizados en Baviácora. NR: no reportado.

| Baviácora | | | | | | Valores de referencia | | Elementos identificados en derrame |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|
| Elementos con valor certificado | Concentración promedio mg/kg | Valores de fondo mg/kg | Mayor a valor de fondo | %D dentro de rango | Índice de Peligro <1 No, >1 Si = C.C. | NOM 147 mg/kg | US EPA RfD mg/kg día | |
| Zr | 384,52 | 153,95 | Si | Zr | 2,50 | | | |
| Sr | 368,29 | 338,10 | Si | Sr | 1,09 | | | |
| U | 8,49 | 4,38 | Si | | 1,94 | | | |
| Rb | 123,58 | 156,71 | No | Rb | 0,79 | | | |
| Th | 23,03 | 13,85 | Si | | 1,66 | | | |
| Pb | 47,62 | 8,92 | Si | Pb | 5,34 | 400 | | Pb |
| As | 24,45 | 2,82 | Si | As | 8,66 | 22 | 0.0003 | As |
| Hg | 6,59 | N/D | | | | 23 | | Hg |
| Zn | 178,53 | 45,88 | Si | Zn | 3,89 | | 0.3 | Zn |
| W | 64,37 | 17,85 | Si | W | 3,61 | | | |
| Cu | 66,81 | 21,81 | Si | Cu | 3,06 | | 0.04 | Cu |
| Fe | 40050,13 | NR | | Fe | | | | Fe |
| Mn | 748,16 | NR | | Mn | | | 0.02 | Mn |
| Cr | 67,42 | 46,15 | Si | | 1,46 | 280 | 0.005 | Cr |
| V | 110,68 | 89,66 | Si | | 1,23 | 78 | 0.007 | |
| Ti | 3859,20 | N/D | | Ti | | | | |
| Sc | 79,87 | 11,28 | Si | | | | | |
| Ca | 29094,69 | N/D | | Ca | | | | |
| K | 18101,89 | N/D | | K | | | | |
| Nb | 17,14 | 10,15 | Si | | 1,69 | | | |
| Y | 23,94 | 22,85 | Si | | 1,05 | | | |

A partir de lo indicado en las tablas anteriores se seleccionaron los elementos que servirán de base para la discusión de este trabajo, los cuales son: Pb, Cu, As, Zn, Mn y Cr. El elemento Fe no tiene dosis de referencia reportada en la literatura, el elemento Al si cuenta con valores de RfD, pero no pudo ser analizado por el equipo, por lo tanto no se puede estimar el riesgo a la salud humana por exposición a estos elementos, aunque esten reportados como presente en la solución derramada.

V.2.1. Distribución de metales por fracción granulométrica.

Diversos estudios han indicado que algunos metales tienden a concentrarse en la fracción granulométrica de menor tamaño (Jiao *et al.*, 2015). Considerando la adherencia de ciertas fracciones (indicadas en la sección anterior) es importante entender cómo se distribuyen los metales seleccionados por fracción (malla). En las Tablas 15, 16 y 17 se muestra la concentración de metales para Banámichi, Huépac y Baviácora, respectivamente. Se indican los valores máximos, mínimos, promedio y desviación estándar por población.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Tabla 15. Resultados del análisis de elementos (mg/Kg) por fracción granulométrica en Banámichi.

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pb | Máximo | 283,80 | 152,46 | 139,42 | 134,09 | 163,51 |
| | Mínimo | 13,85 | 15,74 | 17,66 | 20,13 | 25,42 |
| | N = 47 Promedio | 37,13 | 37,79 | 42,13 | 45,64 | 65,00 |
| | SD | 42,84 | 26,11 | 23,34 | 24,57 | 34,86 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| As | Máximo | 25,58 | 23,29 | 33,34 | 28,47 | 53,92 |
| | Mínimo | 6,51 | 10,45 | 13,30 | 13,55 | 13,81 |
| | N = 47 Promedio | 13,23 | 16,41 | 19,97 | 20,27 | 29,89 |
| | SD | 3,82 | 3,10 | 4,06 | 3,19 | 9,92 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Zn | Máximo | 478,86 | 343,11 | 446,73 | 488,83 | 1605,85 |
| | Mínimo | 28,02 | 52,11 | 77,81 | 83,84 | 90,32 |
| | N = 47 Promedio | 92,31 | 110,58 | 136,46 | 157,49 | 303,21 |
| | SD | 70,79 | 51,77 | 71,41 | 84,92 | 270,87 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Cu | Máximo | 57,24 | 68,03 | 100,56 | 84,90 | 461,00 |
| | Mínimo | 20,00 | 22,52 | 23,44 | 27,61 | 27,74 |
| | N = 47 Promedio | 34,22 | 35,18 | 43,59 | 48,97 | 107,59 |
| | SD | 8,11 | 9,60 | 13,63 | 13,48 | 83,07 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Cr | Máximo | 77,55 | 112,83 | 144,60 | 129,49 | 199,25 |
| | Mínimo | 28,14 | 45,21 | 55,94 | 58,43 | 84,76 |
| | N = 47 Promedio | 43,67 | 67,59 | 80,65 | 85,38 | 127,95 |
| | SD | 8,83 | 12,21 | 15,94 | 13,53 | 32,84 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Mn | Máximo | 682,27 | 1519,20 | 2127,10 | 1922,67 | 3550,52 |
| | Mínimo | 257,23 | 254,49 | 368,79 | 510,74 | 574,51 |
| | N = 47 Promedio | 487,18 | 550,46 | 673,85 | 748,59 | 1787,42 |
| | SD | 114,72 | 190,13 | 335,79 | 282,04 | 926,62 |

SD = Desviación estándar.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Tabla 16. Resultados del análisis de elementos (mg/Kg) por fracción granulométrica en Huépac.

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pb | Máximo | 447,49 | 616,44 | 586,61 | 706,40 | 733,62 |
| | Mínimo | 22,84 | 29,24 | 29,65 | 31,80 | 38,10 |
| | N = 51 Promedio | 61,80 | 66,96 | 72,96 | 75,01 | 101,36 |
| | SD | 67,28 | 83,54 | 80,12 | 95,69 | 103,74 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| As | Máximo | 29,54 | 38,17 | 64,72 | 59,49 | 146,14 |
| | Mínimo | 7,65 | 10,18 | 11,68 | 13,61 | 19,65 |
| | N = 51 Promedio | 20,46 | 24,24 | 25,75 | 25,04 | 33,96 |
| | SD | 4,85 | 5,58 | 7,40 | 7,06 | 19,08 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Zn | Máximo | 277,95 | 337,92 | 415,94 | 483,71 | 875,13 |
| | Mínimo | 62,02 | 74,56 | 87,23 | 96,81 | 116,78 |
| | N = 51 Promedio | 114,46 | 140,73 | 162,04 | 165,08 | 267,47 |
| | SD | 44,30 | 53,17 | 73,09 | 70,60 | 171,62 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Cu | Máximo | 81,40 | 76,35 | 182,84 | 92,85 | 315,19 |
| | Mínimo | 21,46 | 29,48 | 27,09 | 30,29 | 37,04 |
| | N = 51 Promedio | 39,97 | 44,12 | 47,10 | 49,14 | 70,31 |
| | SD | 9,81 | 9,03 | 22,24 | 11,10 | 53,96 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Cr | Máximo | 60,69 | 87,15 | 115,58 | 87,01 | 326,75 |
| | Mínimo | 10,37 | 46,60 | 55,44 | 60,32 | 61,06 |
| | N = 51 Promedio | 36,07 | 62,93 | 68,75 | 71,51 | 95,47 |
| | SD | 10,10 | 11,31 | 10,34 | 6,24 | 38,59 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|
| Mn | Máximo | 1079,16 | 984,47 | 2293,88 | 928,05 | 5397,14 |
| | Mínimo | 347,67 | 502,63 | 523,19 | 518,21 | 611,53 |
| | N = 51 Promedio | 651,87 | 668,54 | 735,29 | 697,17 | 1317,75 |
| | SD | 148,79 | 101,52 | 281,02 | 83,30 | 940,91 |

SD = Desviación estándar.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Tabla 17. Resultados del análisis de elementos (mg/Kg) por fracción granulométrica en Baviácora.

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|
| Pb | Máximo | 103,64 | 114,83 | 89,64 | 99,49 | 256,69 |
| | Mínimo | 18,92 | 25,83 | 27,55 | 28,94 | 38,65 |
| N = 53 | Promedio | 35,28 | 42,08 | 45,20 | 52,56 | 84,20 |
| | SD | 16,46 | 16,90 | 14,59 | 19,44 | 41,87 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| As | Máximo | 135,52 | 40,42 | 40,03 | 53,18 | 73,76 |
| | Mínimo | 6,94 | 13,73 | 15,28 | 14,72 | 19,50 |
| N = 53 | Promedio | 20,11 | 21,54 | 25,23 | 27,24 | 38,40 |
| | SD | 17,19 | 6,00 | 6,54 | 8,02 | 12,35 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Zn | Máximo | 773,98 | 358,16 | 428,40 | 598,41 | 1946,50 |
| | Mínimo | 34,02 | 60,60 | 75,48 | 93,21 | 119,57 |
| N = 53 | Promedio | 117,75 | 138,70 | 163,03 | 191,43 | 398,94 |
| | SD | 105,40 | 65,15 | 82,61 | 107,79 | 393,28 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cu | Máximo | 158,28 | 180,18 | 163,51 | 183,17 | 300,25 |
| | Mínimo | 25,57 | 26,41 | 30,51 | 26,55 | 32,57 |
| N = 53 | Promedio | 50,35 | 56,31 | 63,74 | 69,43 | 118,94 |
| | SD | 22,22 | 24,66 | 25,09 | 30,58 | 64,93 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cr | Máximo | 130,52 | 108,68 | 104,03 | 132,09 | 177,78 |
| | Mínimo | 23,97 | 40,21 | 47,40 | 57,56 | 70,14 |
| N = 53 | Promedio | 43,43 | 59,82 | 65,82 | 77,11 | 113,50 |
| | SD | 18,81 | 13,98 | 12,22 | 14,12 | 23,16 |

| Elemento | Fracción μm | 125 | 63 | 44 | 20 | <20 |
|-----------|------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Mn | Máximo | 914,55 | 1175,90 | 1887,32 | 2414,77 | 3365,41 |
| | Mínimo | 233,85 | 315,79 | 365,50 | 445,08 | 515,98 |
| N = 53 | Promedio | 514,87 | 560,62 | 650,98 | 718,49 | 1666,42 |
| | SD | 166,79 | 163,15 | 265,21 | 365,94 | 715,46 |

SD = Desviación estándar.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Para consultar los valores por muestra y localización referirse a la sección de Anexos 3. Se puede observar cómo hay una tendencia a incrementar los valores promedio de las concentraciones de metales (mg/Kg) en fracciones más finas, observándose el mismo patrón en las tres localidades para todos los elementos (Figura 32). En esta sección se presenta el análisis de concentraciones en las fracciones granulométricas de $<250 \mu\text{m}$ y $<20 \mu\text{m}$, observándose la tendencia a incrementar las concentraciones en las fracciones finas. Este trabajo concuerda con estudios previos (Jiao *et al.*, 2015) sobre el enriquecimiento de metales en las fracciones finas.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

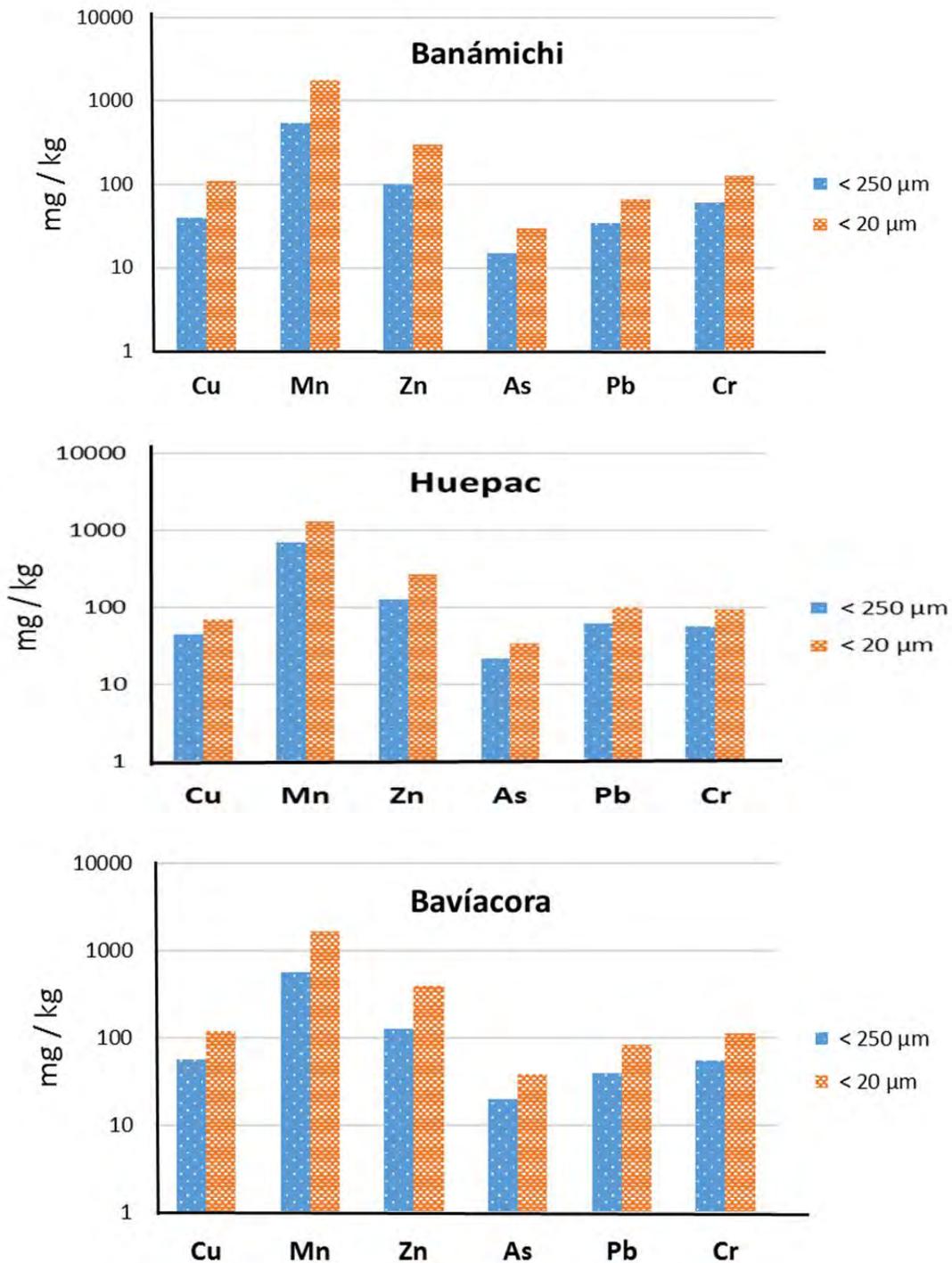


Figura 32. Diferencias en concentraciones (mg/kg) entre el análisis de la fracción < 250 μm y la fracción < 20 μm.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

En la Tabla 18, se presenta un resumen para cada localidad de los “elementos asociados al derrame” y los “elementos no asociados al derrame”, con los valores máximos, mínimos, promedio y desviación estándar. El análisis corresponde a la fracción más fina que se obtuvo, malla # <635 (partículas < 20µm) ya que se tiene reportado en diferentes trabajos que las fracciones menores a 63 µm, se encuentran enriquecidas con metales (Jiao *et al.*, 2015). Además, este tamaño de partícula es potencialmente adherible a manos y representa la ruta de exposición por ingestión en humanos, principalmente en niños (Ruby & Lowney, 2012). Se pudo identificar valores de concentraciones mg/kg de arsénico por encima de los valores permitidos para el uso de suelo residencial, en las tres localidades analizadas. Los elementos no asociados al derrame se muestran como referencia, pero no forman parte de la discusión central del trabajo ya que no se han reportado datos de dosis de referencia, y por lo tanto, no es posible realizar una estimación de riesgo para estos elementos.

Tabla 18. Concentraciones de elementos asociados y No asociados al derrame.

| Banámichi | Elementos asociados al derrame | | | | | | | Elementos no asociados al derrame | | | | | | |
|-----------|--------------------------------|--------|---------|---------|-------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|--------|---------|----------|----------|
| | Fe | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr | Zr | Sr | Rb | W | Ti | Ca | K |
| Máximo | 148794,07 | 461,00 | 3550,52 | 1605,85 | 53,92 | 163,51 | 199,25 | 471,30 | 775,87 | 139,60 | 552,45 | 9808,44 | 78689,60 | 22514,63 |
| Mínimo | 37852,21 | 27,74 | 574,51 | 90,32 | 13,81 | 25,42 | 84,76 | 248,50 | 307,80 | 47,30 | 35,04 | 3657,77 | 10810,55 | 12310,78 |
| Promedio | 79945,33 | 107,59 | 1787,42 | 303,21 | 29,89 | 65,00 | 127,95 | 333,61 | 526,76 | 89,38 | 205,23 | 6061,12 | 27388,96 | 17006,30 |
| SD | 31033,62 | 83,07 | 926,62 | 270,87 | 9,92 | 34,86 | 32,84 | 51,90 | 104,51 | 23,64 | 148,87 | 1599,19 | 13670,22 | 2412,26 |

| Baviácora | Elementos asociados al derrame | | | | | | | Elementos no asociados al derrame | | | | | | |
|-----------|--------------------------------|--------|---------|---------|-------|--------|--------|-----------------------------------|--------|--------|--------|---------|-----------|----------|
| | Fe | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr | Zr | Sr | Rb | W | Ti | Ca | K |
| Máximo | 128354,83 | 300,25 | 3365,41 | 1946,50 | 73,76 | 256,69 | 177,78 | 759,56 | 847,76 | 168,18 | 506,40 | 7205,02 | 124518,76 | 23021,64 |
| Mínimo | 37343,89 | 32,57 | 515,98 | 119,57 | 19,50 | 38,65 | 70,14 | 227,33 | 223,76 | 66,41 | 37,35 | 2611,39 | 8156,42 | 12405,17 |
| Promedio | 69277,48 | 118,94 | 1666,42 | 398,94 | 38,40 | 84,20 | 113,50 | 374,07 | 470,42 | 104,18 | 216,73 | 4824,46 | 37294,18 | 17695,13 |
| SD | 20584,92 | 64,93 | 715,46 | 393,28 | 12,35 | 41,87 | 23,16 | 111,08 | 120,95 | 25,90 | 122,32 | 990,37 | 24099,92 | 2147,75 |

| Huépac | Elementos asociados al derrame | | | | | | | Elementos no asociados al derrame | | | | | | |
|----------|--------------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------------|---------|--------|--------|----------|-----------|----------|
| | Fe | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr | Zr | Sr | Rb | W | Ti | Ca | K |
| Máximo | 198169,54 | 315,19 | 5397,14 | 875,13 | 146,14 | 733,62 | 326,75 | 1066,81 | 1545,36 | 276,67 | 454,58 | 14297,64 | 127829,62 | 55669,25 |
| Mínimo | 33514,02 | 37,04 | 611,53 | 116,78 | 19,65 | 38,10 | 61,06 | 227,36 | 289,68 | 59,86 | 23,09 | 2628,61 | 9116,45 | 16320,88 |
| Promedio | 53417,71 | 70,31 | 1317,75 | 267,47 | 33,96 | 101,36 | 95,47 | 384,52 | 443,08 | 124,27 | 122,27 | 5064,41 | 28309,64 | 20029,84 |
| SD | 25861,63 | 53,96 | 940,91 | 171,62 | 19,08 | 103,74 | 38,59 | 123,31 | 204,57 | 33,15 | 107,76 | 1606,77 | 19527,31 | 5236,89 |

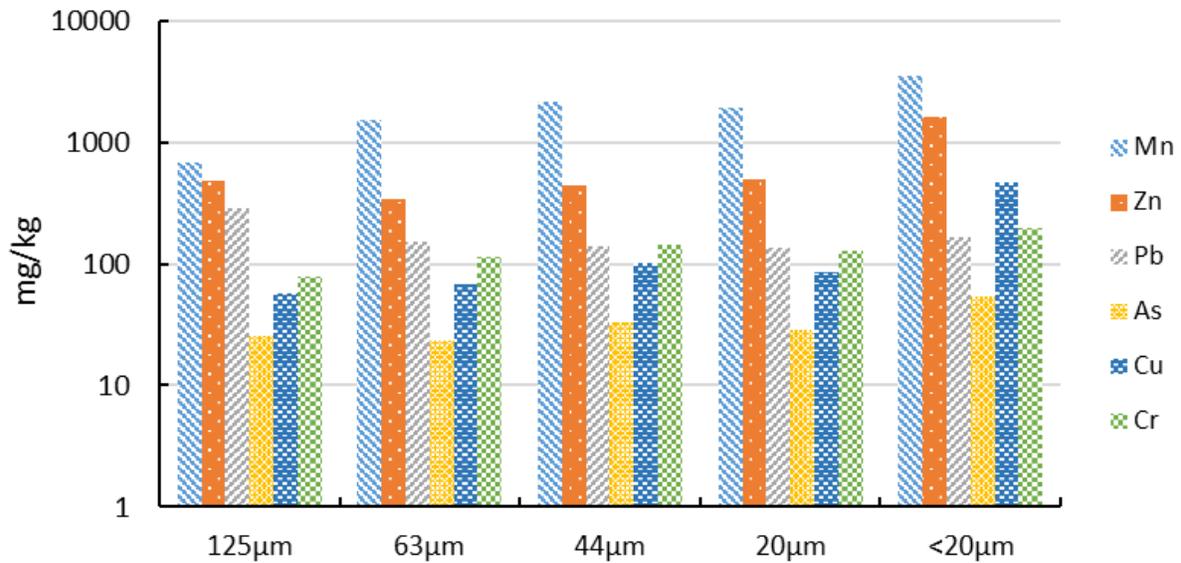
SD = Desviación estándar.

A continuación, se presentan gráficamente las concentraciones de los elementos analizados, para los distintos tamaños de partículas. Se puede observar como las concentraciones se incrementan conforme el tamaño de partícula decrece, siendo esta la tendencia observada en las tres localidades para los seis elementos (Pb, As, Zn, Cu, Mn y Cr).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

En el caso de Banámichi (Figura 33), el Mn y Zn presentan una mayor concentración en la fracción granulométrica más fina, en orden decreciente están: Cu, Cr, Pb, y finalmente As. En la Figura 34, se representan las concentraciones para Huépac, en donde el Mn es el elemento que se encuentra en mayor concentración en todas las fracciones, manteniendo la tendencia de incrementar su concentración hacia las fracciones más finas. En esta localidad, las concentraciones del Pb se encuentran por arriba del Zn en todas las fracciones, excepto en la fracción más fina <20 μm , donde el Zn tiene un repunte y sobrepasa los valores del Pb. También el Pb se encuentra en concentraciones más altas que en las otras dos localidades. Seguidamente para esta fracción se tiene al Cr y Cu con valores muy similares y con valores más bajos se encuentra el As. En el caso de Baviácora (Figura 35) se sigue la misma tendencia, con el incremento de valores hacia las mallas más finas, aunque la curva de incremento es muy suave para los elementos (Mn, As, Cu, Cr y Pb); para el caso de Zn se presenta un incremento considerable para la fracción más fina.

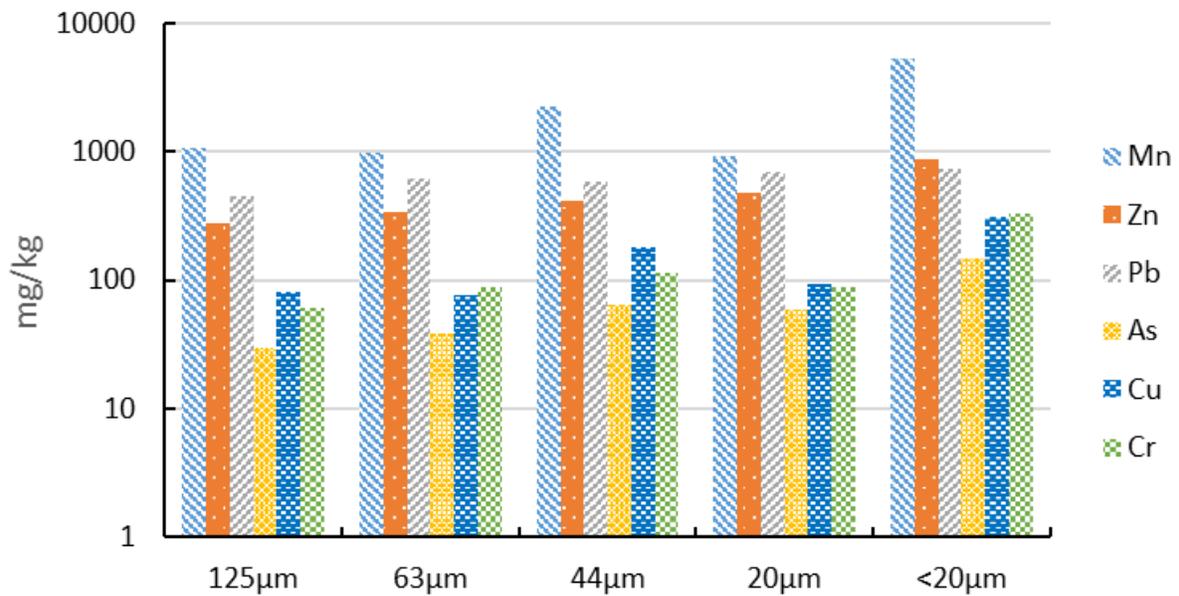
Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



| Elemento | 120 | 230 | 325 | 635 | <635 |
|----------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Mn | 682,27 | 1519,20 | 2127,10 | 1922,67 | 3550,52 |
| Pb | 283,80 | 152,46 | 139,42 | 134,09 | 163,51 |
| As | 25,58 | 23,29 | 33,34 | 28,47 | 53,92 |
| Zn | 478,86 | 343,11 | 446,73 | 488,83 | 1605,85 |
| Cu | 57,24 | 68,03 | 100,56 | 84,90 | 461,00 |
| Cr | 77,55 | 112,83 | 144,60 | 129,49 | 199,25 |

Figura 33. Análisis de tamaño de partícula en referencia a concentración de metales (mg/kg), localidad de Banámichi.

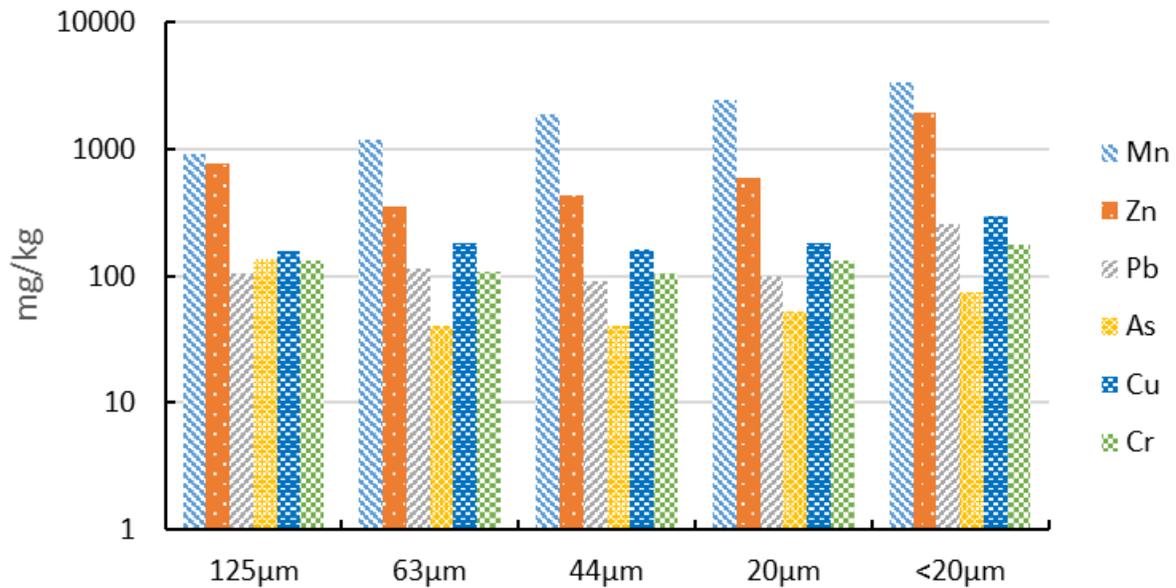
Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



| Elemento | 120 | 230 | 325 | 635 | <635 |
|----------|---------|--------|---------|--------|---------|
| Mn | 1079,16 | 984,47 | 2293,88 | 928,05 | 5793,14 |
| Pb | 447,49 | 616,44 | 586,61 | 706,40 | 733,62 |
| As | 29,54 | 38,17 | 64,72 | 59,49 | 146,14 |
| Zn | 277,95 | 337,92 | 415,94 | 483,71 | 875,13 |
| Cu | 81,40 | 76,35 | 182,84 | 92,85 | 315,19 |
| Cr | 60,69 | 87,15 | 115,58 | 87,01 | 326,75 |

Figura 34. Análisis de tamaño de partícula en referencia a concentración de metales (mg/kg), localidad de Huépac.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



| Elemento | BAVIÁCORA | | | | |
|----------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| | 120 | 230 | 325 | 635 | <635 |
| Mn | 914,55 | 1175,90 | 1887,32 | 2414,77 | 3365,41 |
| Pb | 103,64 | 114,83 | 89,64 | 99,49 | 256,69 |
| As | 135,52 | 40,42 | 40,03 | 53,18 | 73,76 |
| Zn | 773,98 | 358,16 | 428,40 | 598,41 | 1946,50 |
| Cu | 158,28 | 180,18 | 163,51 | 183,17 | 300,25 |
| Cr | 130,52 | 108,68 | 104,03 | 132,09 | 177,78 |

Figura 35. Análisis de tamaño de partícula en referencia a concentración de metales (mg/kg), localidad de Baviácora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

V.2.3. Concentración de elementos analizados por malla, entre localidades.

En esta sección, se discute la concentración de los metales analizados (Pb, Cr, As, Cu, Zn, Mn) y se comparan las concentraciones para cada localidad. Para facilitar la interpretación se separan los resultados en dos tipos de gráficos: (1) concentración por elemento en función del tamaño de partícula y (2) concentración total por elemento para las tres localidades. En la Figura 36 se muestra que el plomo tiene mayores valores para todas las mallas en la localidad de Huépac, mientras que en el caso de Banámichi, hay mayor concentración de Pb en la fracción de 125 μm con respecto a la fracción $<20 \mu\text{m}$; sin embargo, Baviácora tiene mayor concentración de Pb en la granulometría más fina. Esta distribución para el caso de Banámichi es anómala y contraria a lo reportado en la literatura, sin embargo, puede deberse a algún factor local no identificado en el presente trabajo. En el caso del As, la distribución por malla es variable entre las localidades, Baviácora tiene la mayor concentración en las fracciones gruesas, mientras que, en las finas, el comportamiento del As es similar al del Pb, con la mayor concentración reportada para Huépac, en forma significativa y en menor medida sigue Baviácora y Banámichi. En el caso del Cu, Cr, Zn y Mn, de forma general, los valores mayores se asocian a la fracción $<20 \mu\text{m}$, pero se comportan de forma variable por localidad. Por ejemplo, el Cu es más abundante en la fracción $<20 \mu\text{m}$ de Banámichi, mientras que en la misma fracción el Cr y el Mn es mayor en Huépac, y el Zn es mayor en Baviácora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

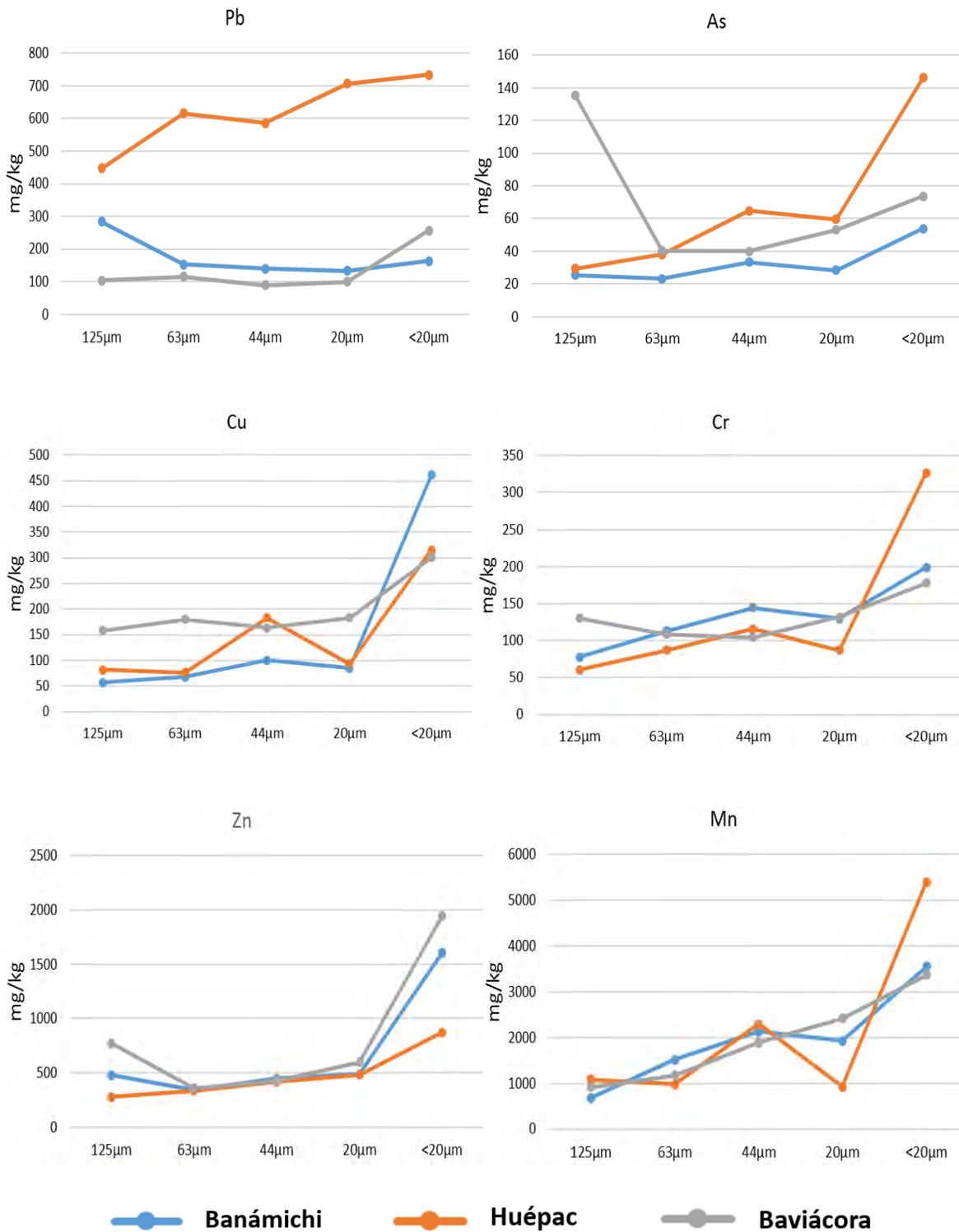


Figura 36. Análisis de la concentración (mg/kg) de elementos para las tres localidades evaluadas.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

La Figura 37 muestra las concentraciones máximas, mínimas y promedio, de la muestra total de suelo por localidad, además se anexa un análisis de sedimentos activos en arroyos cercanos a las localidades muestreadas, cuyo trabajo fue realizado por el Servicio Geológico Mexicano (Aconchi 1998; Baviácora 1998; Banámichi 2007) (SGM, 2012). Para la localidad de Banámichi se tiene una muestra de 180 puntos de un análisis geoquímico completo, para las localidades de Aconchi y Huépac el análisis está dirigido a los elementos comerciales: Au, Ag, Cu, Pb y Zn, siendo la muestra mucho menor, para Aconchi se tienen 75 muestras y para Huépac se tiene solamente entre 21 – 15 análisis (SGM, 2012). En el caso Baviácora el elemento más abundante es el Mn, seguido del Zn, presentando valores similares Cu, Cr y Pb, y en menor concentración se encuentra el As. En Banámichi también el Mn y Zn son los elementos en mayor concentración, seguido del Pb (con bastante diferencia entre valores máximos y mínimos), Cr y Cu similares y finalmente se tienen al As. En Huépac, el elemento más abundante es el Mn, seguido del Pb (con diferencia amplia entre valores máximos y mínimos), seguido del Zn, Cu y Cr presentan valores similares, el As presenta menor concentración, pero una mayor variación entre las concentraciones máximas y mínimas.

Comparando las concentraciones promedio obtenidas en este estudio y las concentraciones obtenidas por el SGM (2012), para los sedimentos de arroyos, se puede apreciar que para la localidad de Banámichi se tienen valores promedios muy parecidos para Zn, As, Pb y Mn. En las localidades de Huépac y Baviácora, los promedios entre sedimentos varían significativamente, quizás derivado de un número de muestras pequeño y a la gran variación entre máximos y mínimos del SGM (2012) (Figura 37).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

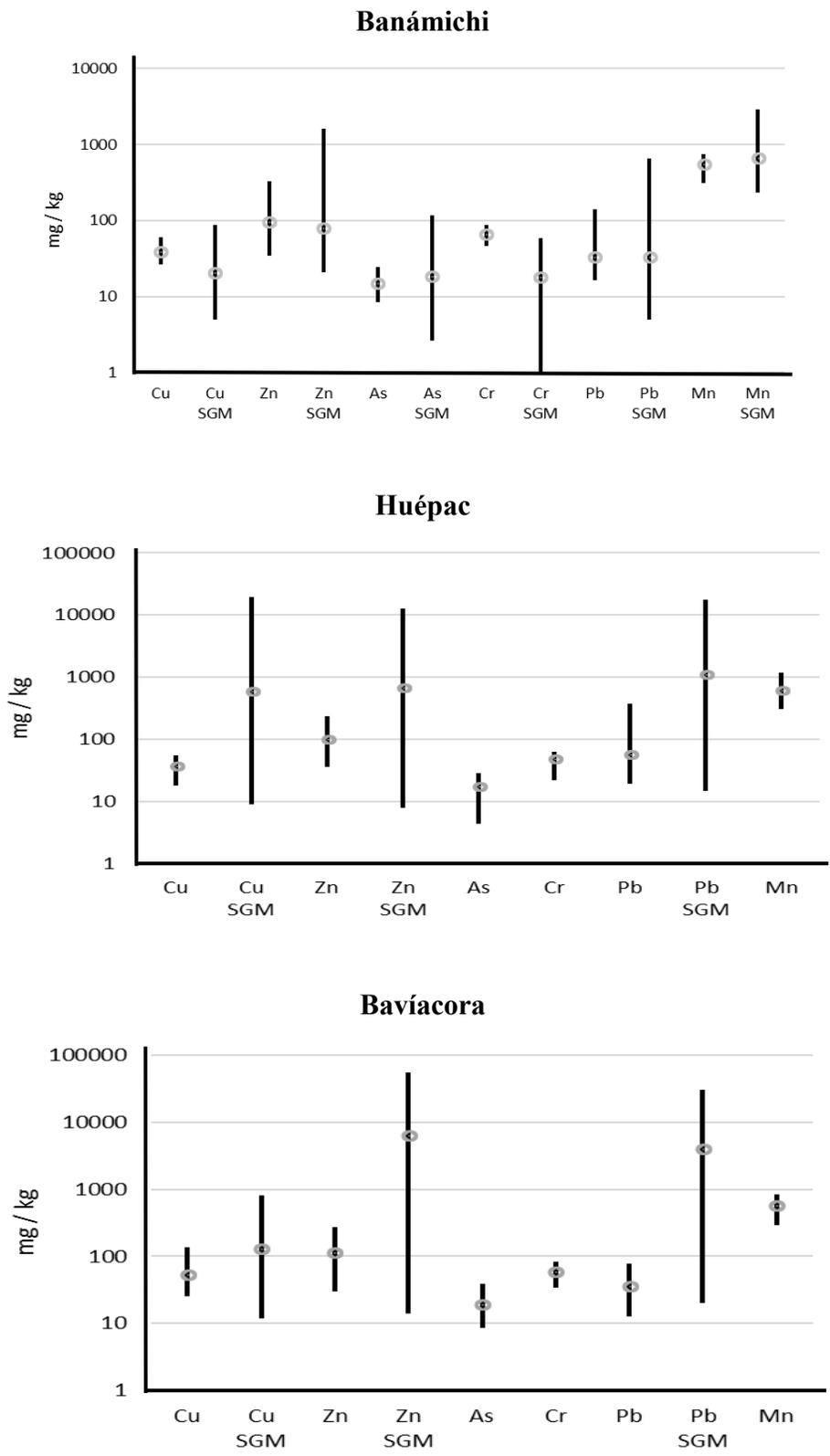


Figura 37. Concentraciones máximas, mínimas y promedio (mg/kg) para las localidades evaluadas.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

La Figura 38 muestra un comparativo de metales totales en suelo total en las tres localidades estudiadas en comparación con el sitio de referencia de Bacoachi, Sonora (indicado en las líneas punteadas horizontales de color anaranjado). La mayor concentración de Cu se presentó en la localidad de Bacoáchi (sitio de referencia), seguido de Baviácora, Banámichi y Huépac. El Zn presenta un comportamiento bastante similar en las tres localidades, teniendo valores apenas superiores el sitio de referencia. En cuanto al As, los valores se encuentran muy similares entre las localidades evaluadas. El Pb, es el elemento que presenta una mayor variabilidad entre máximos y mínimos entre las localidades evaluadas, siendo Huépac el sitio que presenta mayores concentraciones de este metal en suelo. El Cr y el Mn presentan un comportamiento similar (poca variación entre valores máximos y mínimos) para las tres localidades, pero los valores del sitio de referencia si aumentan considerablemente para estos metales.

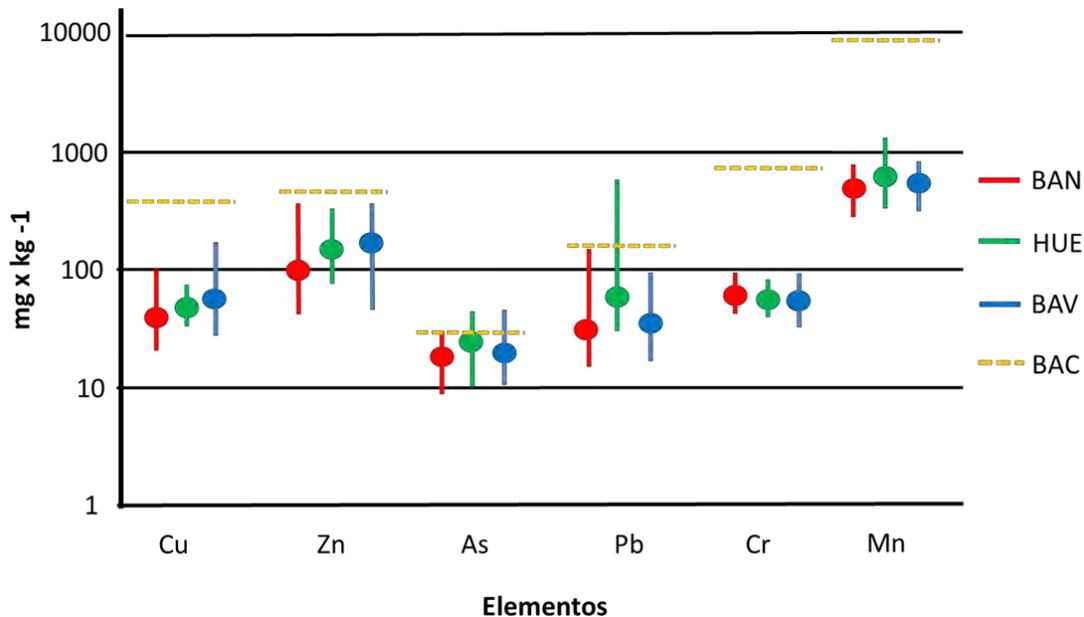


Figura 38. Concentraciones (máximas, mínimas, promedio) y valores máximos del sitio de referencia, de los metales presentes en muestras de suelo total (mg/Kg) para las tres localidades muestreadas. BAN = Banámichi, HUE = Huépac, BAV = Baviácora, BAC = Bacoáchi (sitio de referencia).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Para comprender la distribución espacial de metales en suelos en las localidades estudiadas, se presentan mapas con las concentraciones totales y <60 μm . Estos fueron realizados utilizando los programas de diseño Surfer 12, para la elaboración de isoclinas y Arc Gis 10.3 para la modelación de las concentraciones en cada localidad (Figuras 39, 40 y 41). Anteriormente, y previamente a la publicación de estudios de bioaccesibilidad, la estimación de riesgo se hacía considerando solamente la concentración del metal en suelo total (Guía para orientar los estudios e evaluación de riesgo, SEMARNAT, 2006). De hecho, los valores de referencia para remediación de suelos se basan en suelo total (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004). Sin embargo, de acuerdo a los estudios y resultados publicados sobre el factor de adherencia de suelos a manos, así como el factor de enriquecimiento de metales en fracciones finas (Yamamoto *et al.*, 2006; Siciliano *et al.*, 2010; Ruby & Lowney, 2012; Jiao *et al.*, 2015), es importante considerar la distribución de metales en las fracciones más finas de los suelos, debido al potencial de adherencia de partículas y la tendencia acumulativa en las fracciones finas. Las Figuras 39, 40 y 41 se muestra la distribución espacial de As, Cu, Mn y Zn en suelo total y malla <60 (fracción en la que se realizaron las pruebas de bioaccesibilidad).

Para la localidad de Banámichi, en cuanto al As y al Cu, se muestra diferencia en las concentraciones de las dos fracciones (muestra total y <60), pudiéndose observar variaciones en las concentraciones de estos elementos. Para Mn y Zn, la distribución es relativamente parecida. En la localidad de Huépac, se puede observar como la distribución espacial no cambia mucho entre las dos fracciones analizadas para estos elementos, pudiéndose observar zonas mejor detalladas y con más concentración de elementos en la fracción más fina <60. Finalmente, en la localidad de Baviácora, para el As se observan más zonas con altas concentraciones en la fracción total de suelo, a diferencia de la fracción <60, la cual se observa más agregados en estas zonas. Para Cu, Mn y Zn, los elementos siguen los mismos patrones de zonificación para las dos fracciones, apreciándose más definidas las concentraciones en la fracción fina. Estos resultados indican la importancia de presentar mapas de riesgos que estén sectorizados, incluyendo datos socioeconómicos como las AGEBs (Áreas Geoestadísticas Básicas, INEGI), así como zonas de interés o con

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

alguna importancia (escuelas, parques, centros comerciales, gasolineras, industria, etc). Sería interesante una actualización en la normatividad de evaluación del riesgo (se analicen partículas más finas, ejemplo $<20\mu\text{m}$) debido a la tendencia de los metales a acumularse en las fracciones finas.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

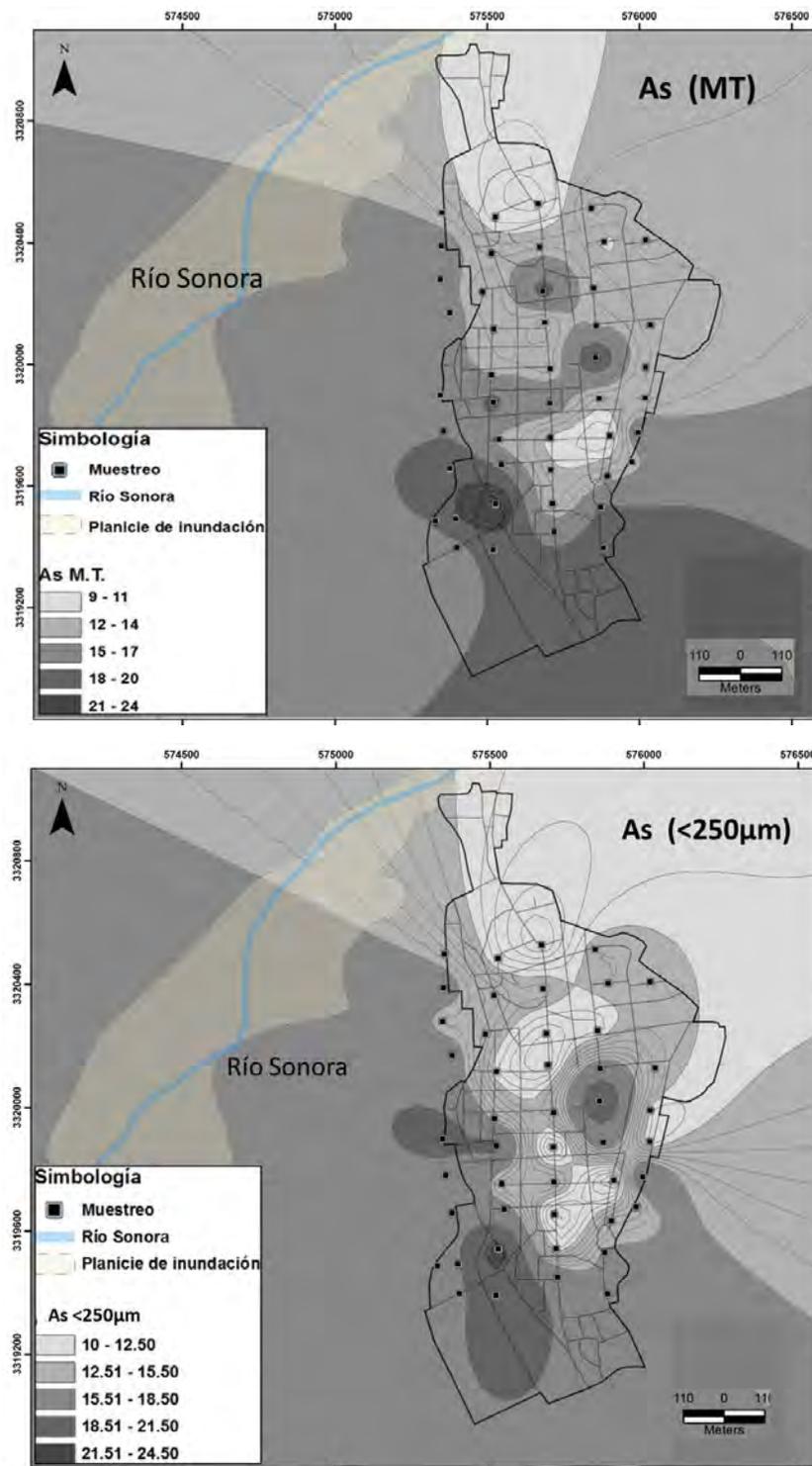
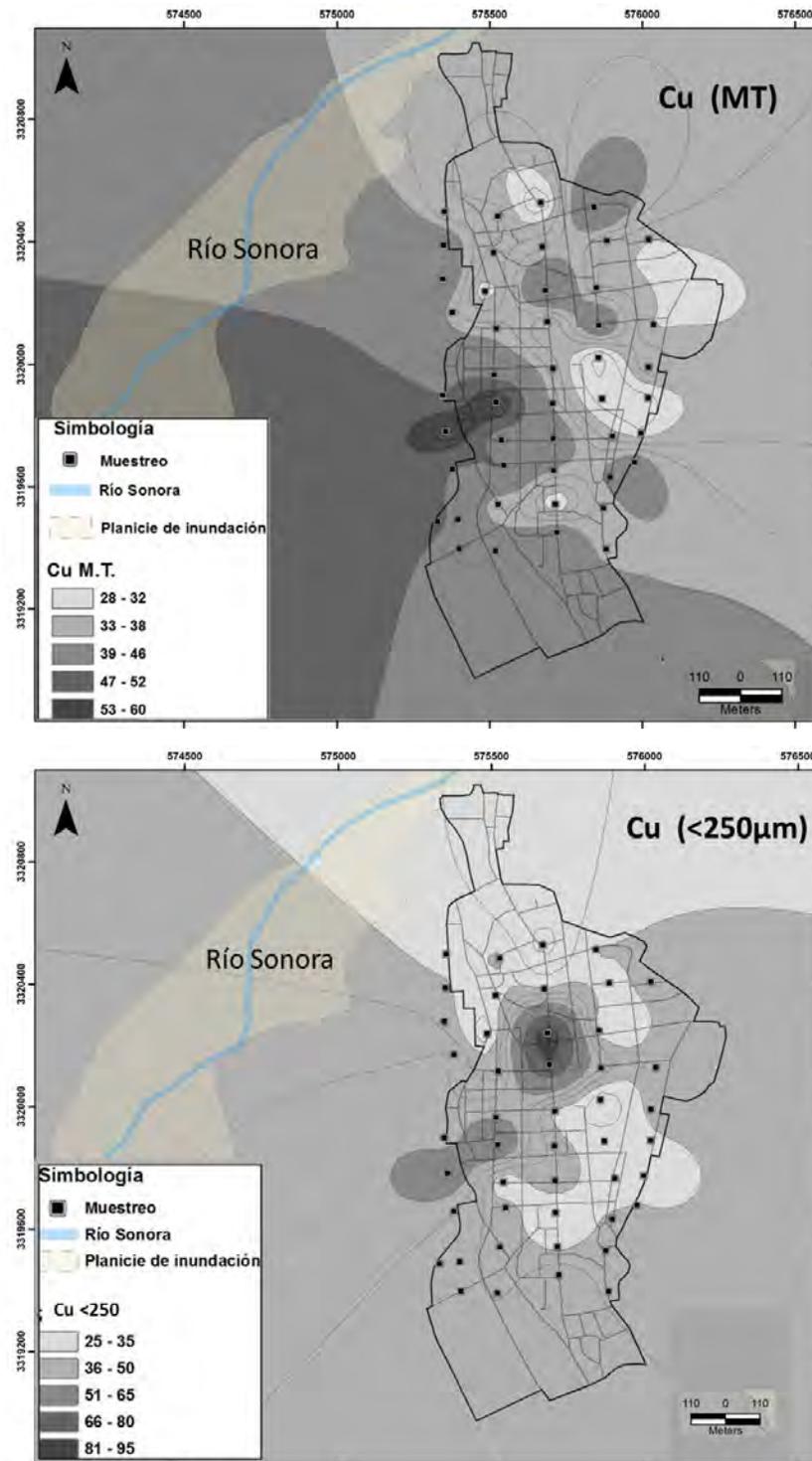


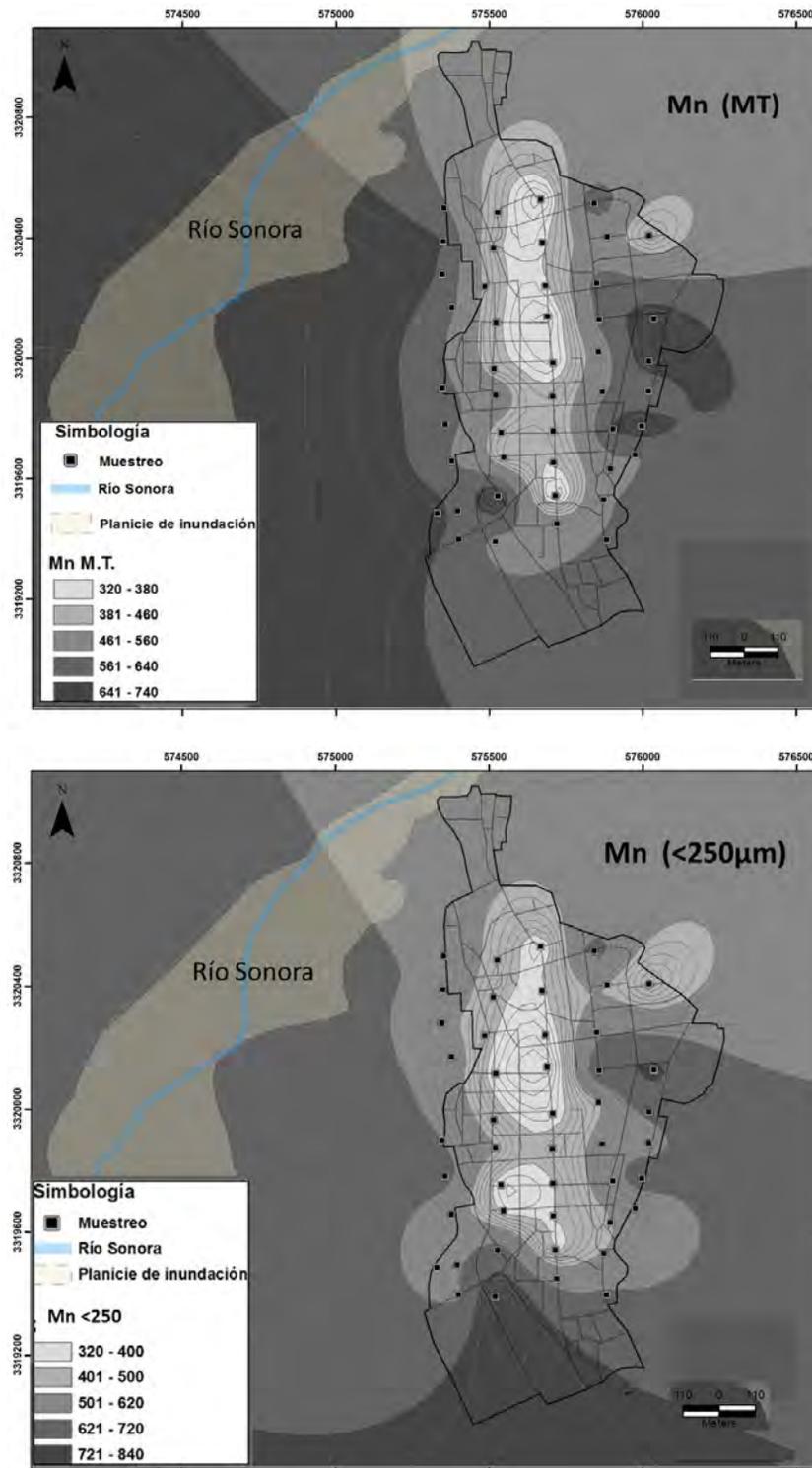
Figura 39. Distribución espacial de arsénico en Banámichi. Muestra total (MT) y fracción <math><250\mu\text{m}</math> (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



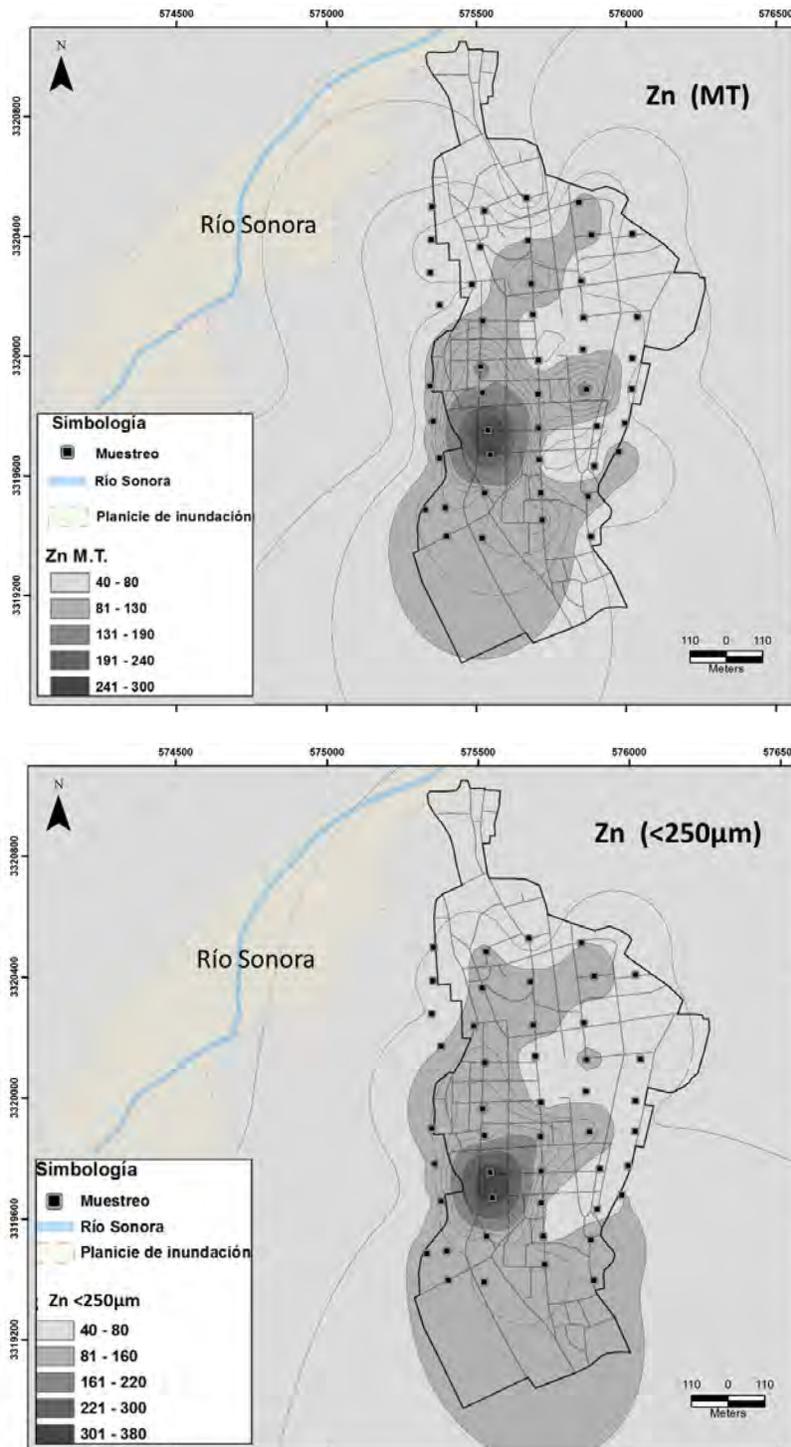
Cont. **Figura 39.** Distribución espacial de cobre en Banámichi. Muestra total (MT) y fracción <250µm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



Cont. **Figura 39.** Distribución espacial de manganeso en Banámichi. Muestra total (MT) y fracción <250µm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



Cont. Figura 39. Distribución espacial de zinc en Banámichi. Muestra total (MT) y fracción <250µm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

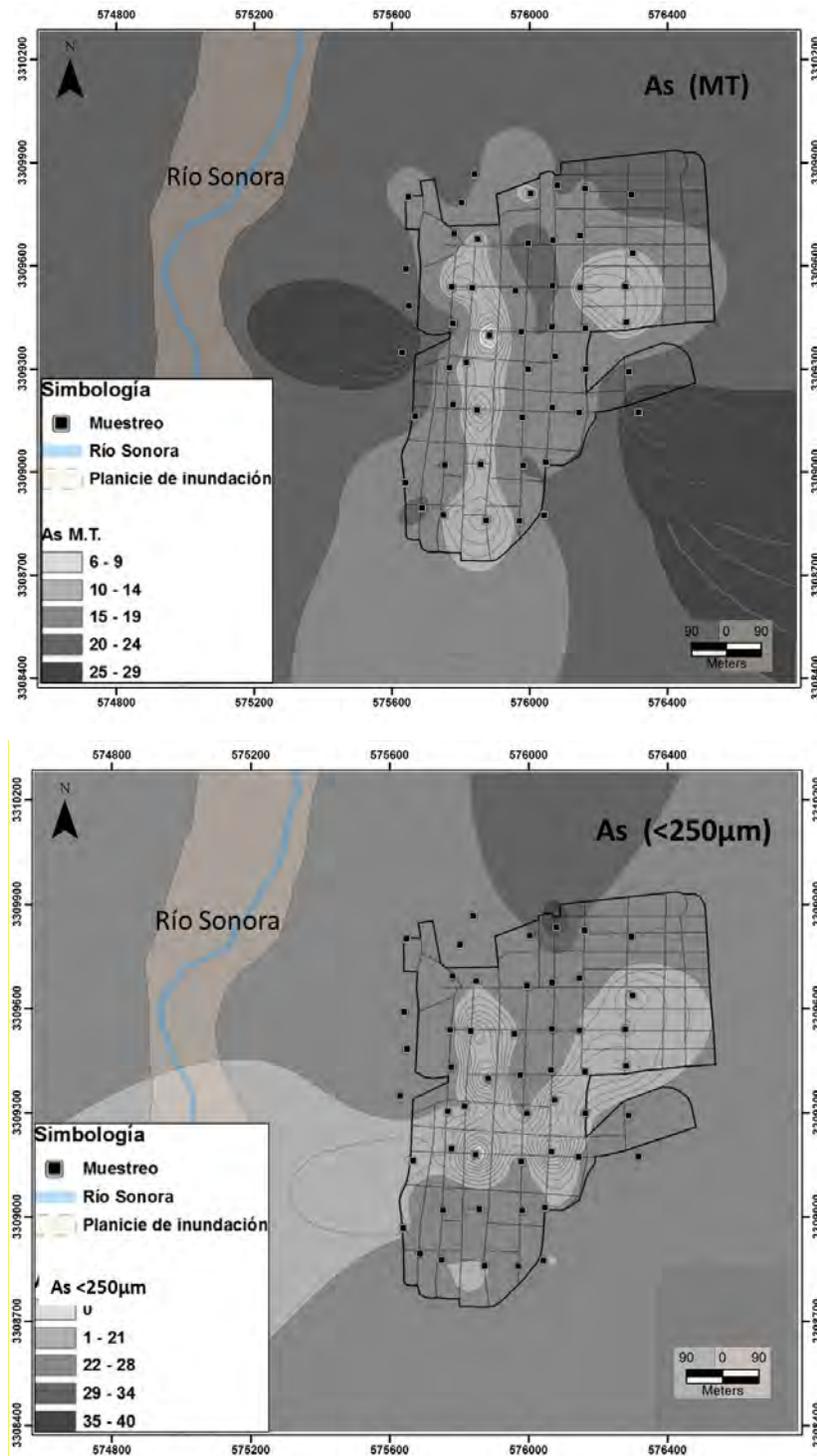
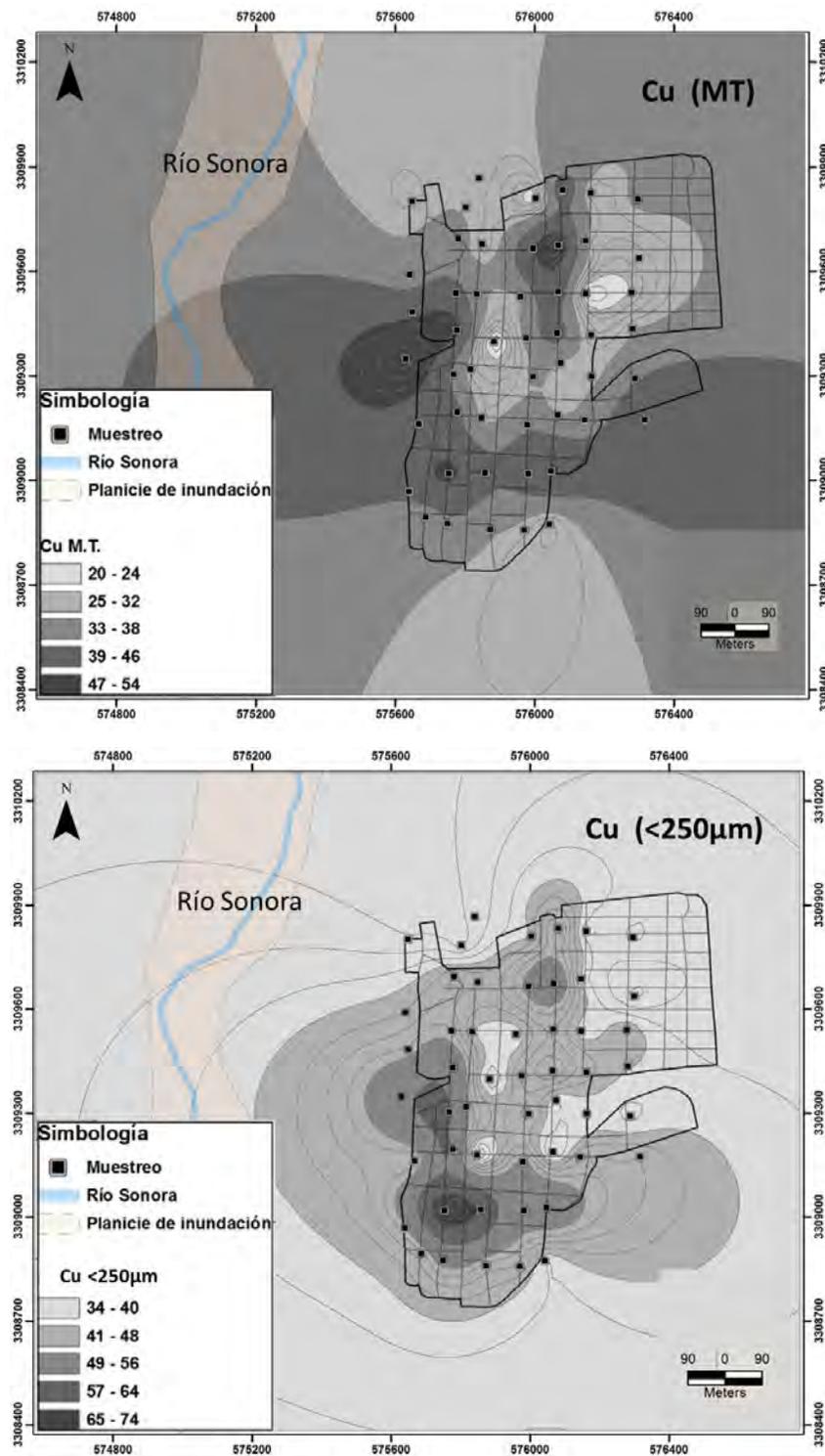


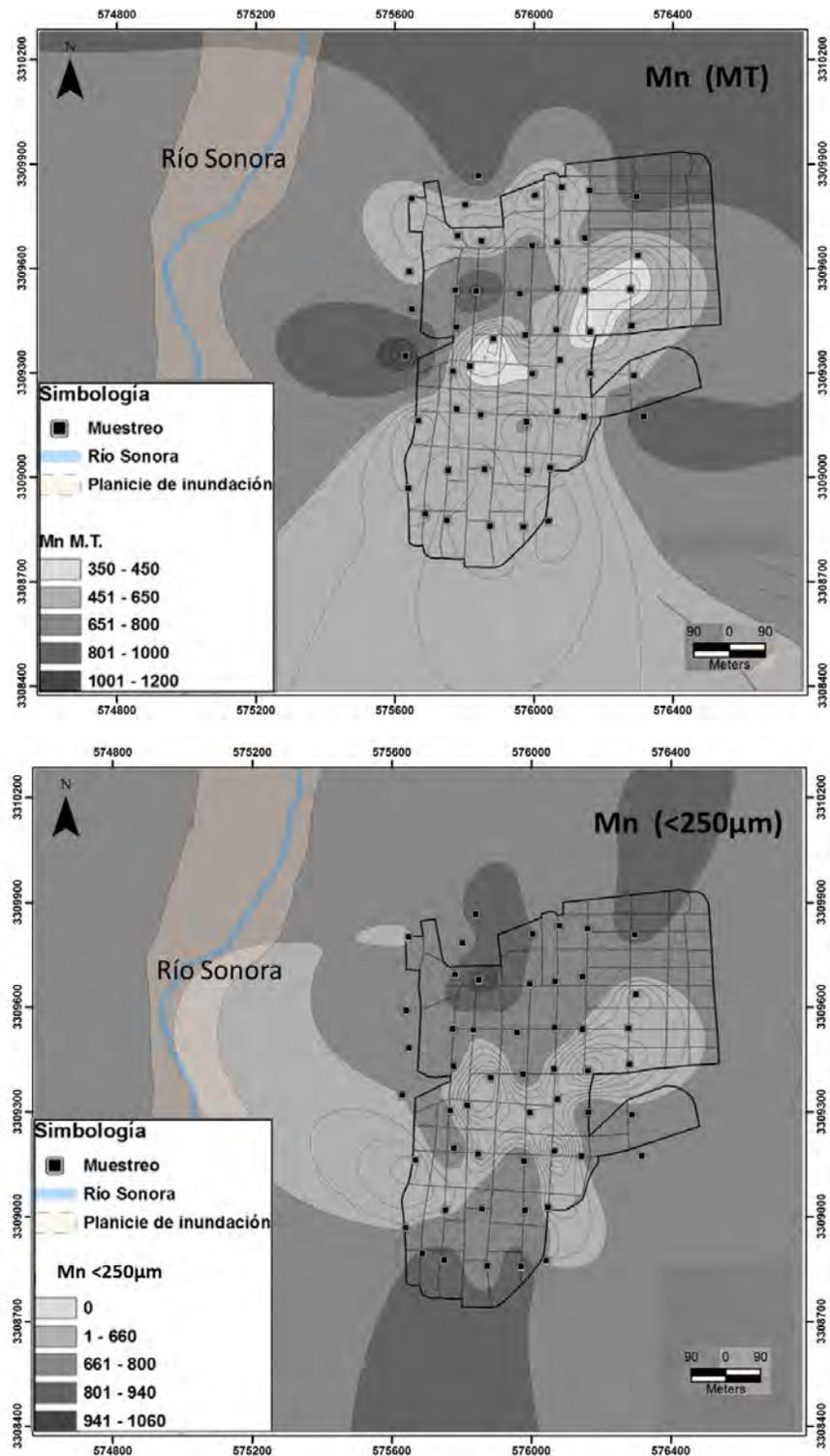
Figura 40. Distribución espacial de arsénico en Huépac. Muestra total (MT) y fracción <250µm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



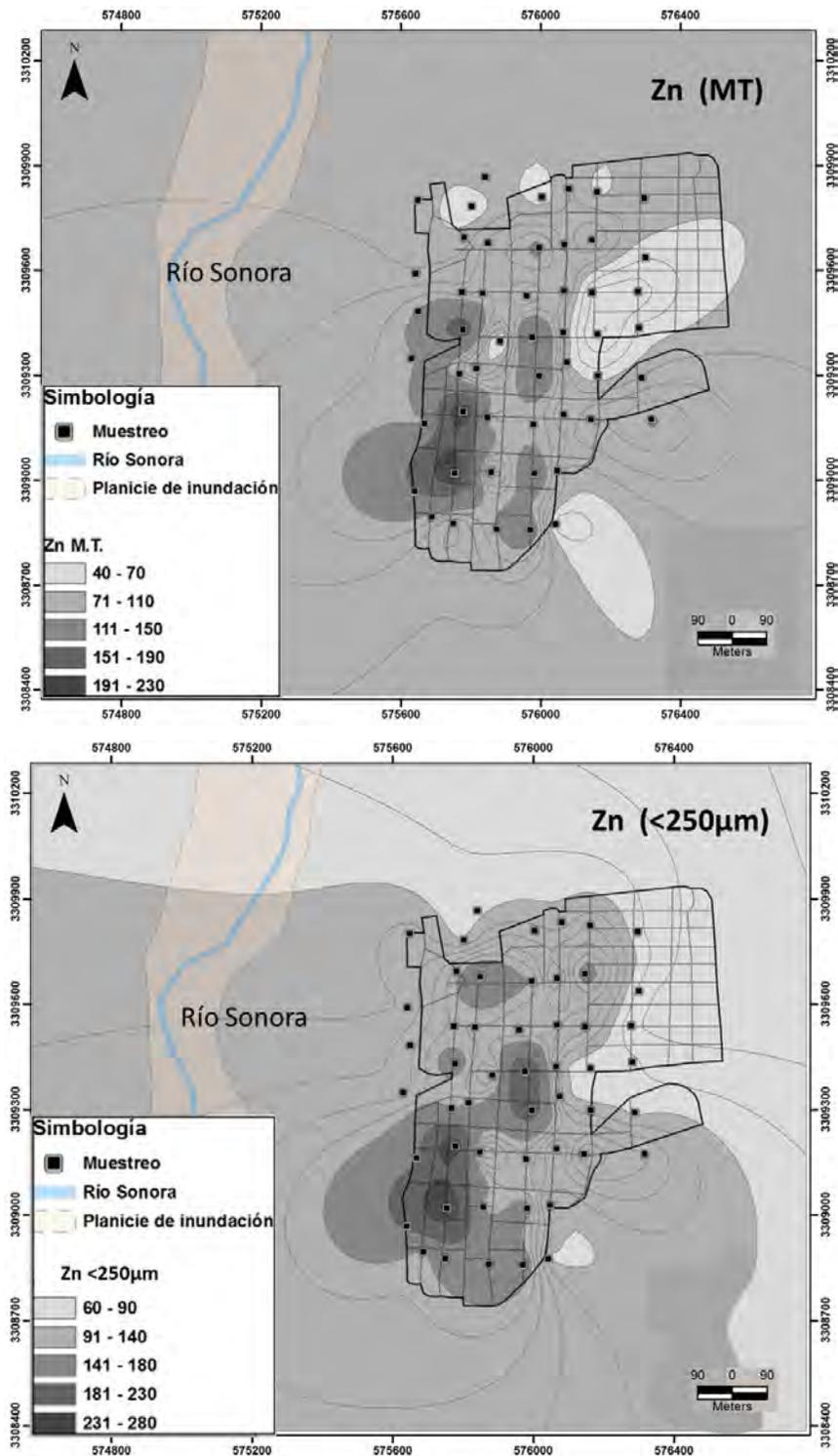
Cont. **Figura 40.** Distribución espacial de cobre en Huépac. Muestra total (MT) y fracción <250µm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



Cont. **Figura 40.** Distribución espacial de manganeso en Huépac. Muestra total (MT) y fracción <250µm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



Cont. Figura 40. Distribución espacial de zinc en Huépac. Muestra total (MT) y fracción <250µm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

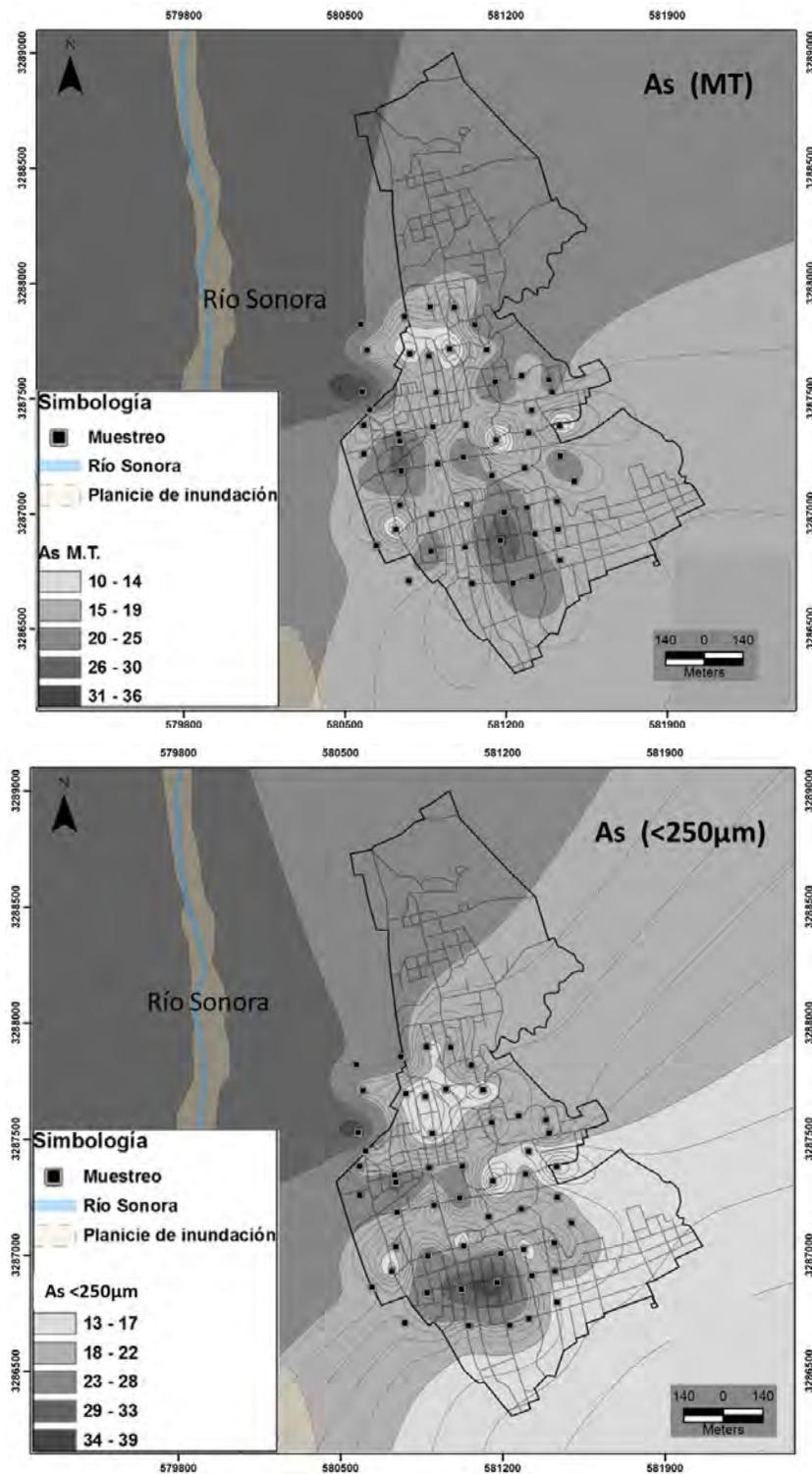
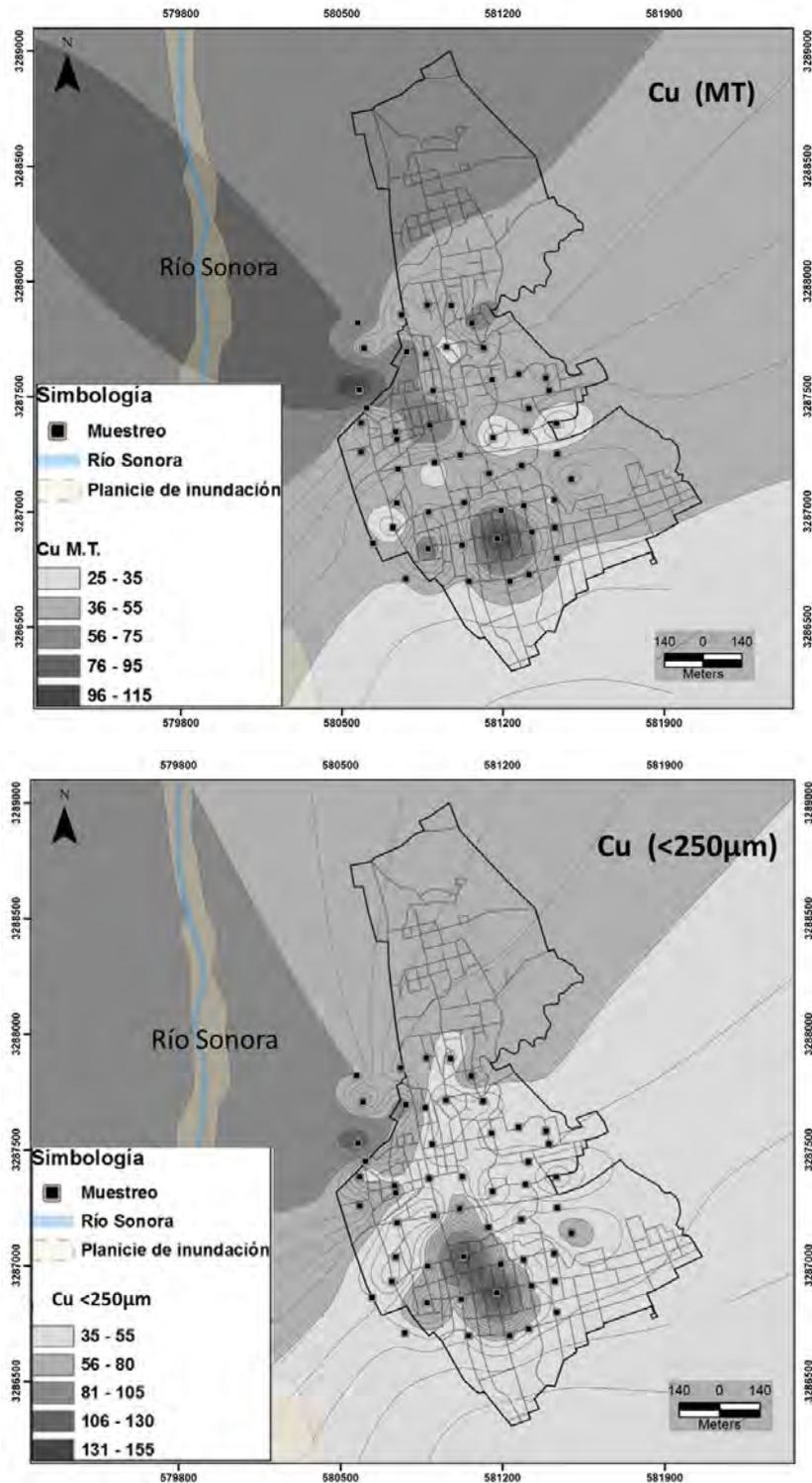


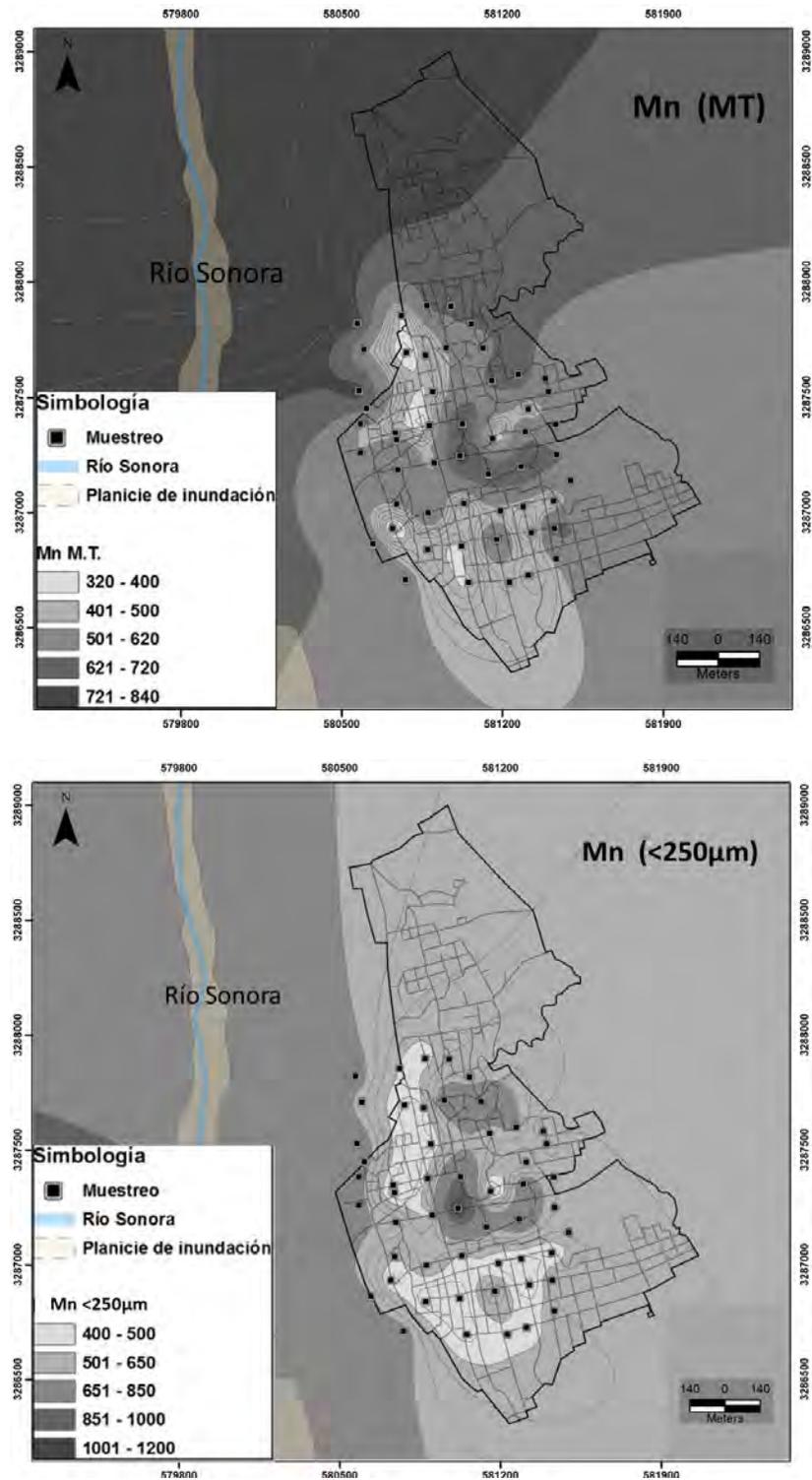
Figura 41. Distribución espacial de arsénico en Baviácora. Muestra total (MT) y fracción <250µm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



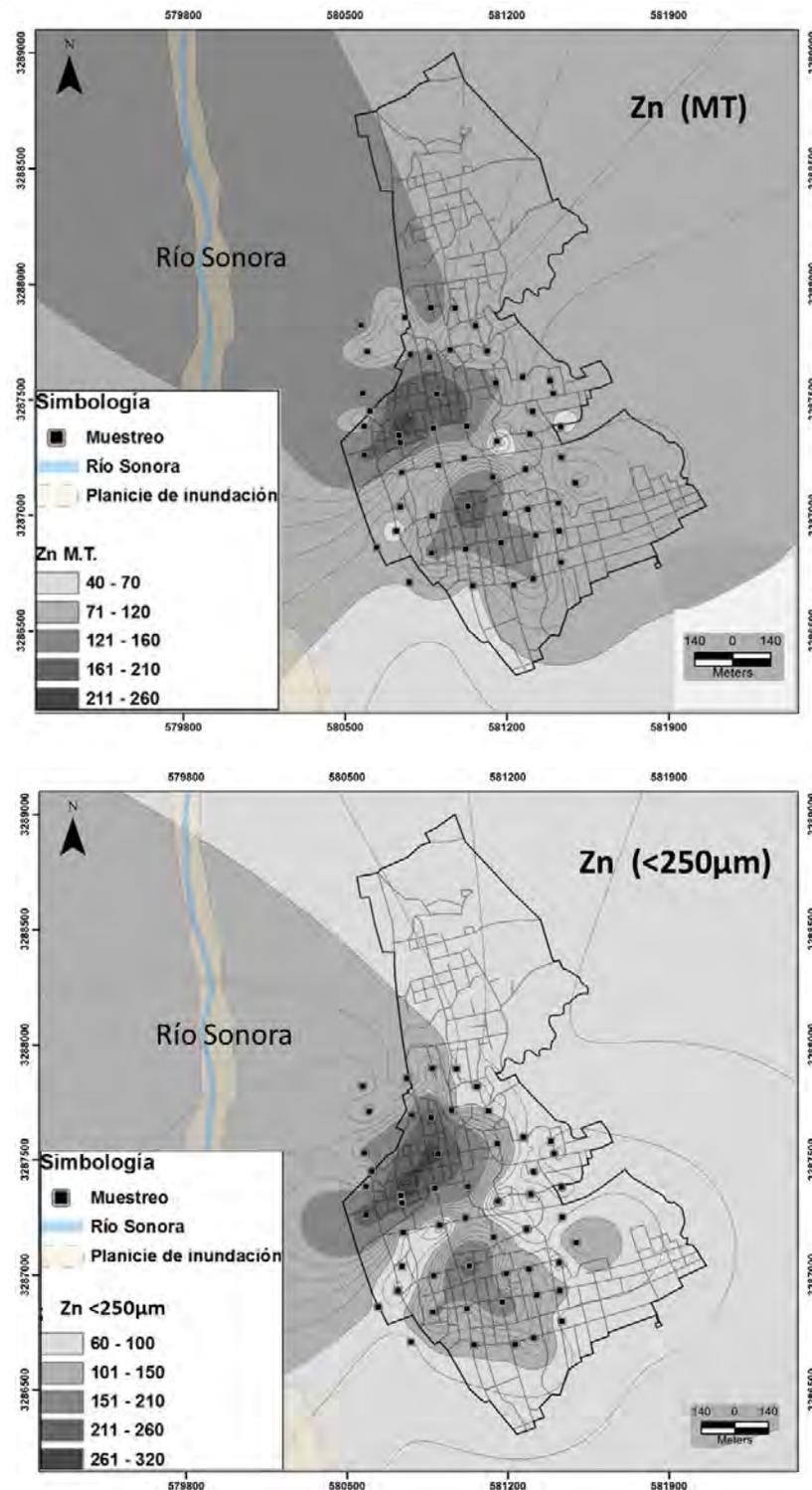
Cont. **Figura 41.** Distribución espacial de cobre en Baviácora. Muestra total (MT) y fracción <250µm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



Cont. Figura 41. Distribución espacial de manganeso en Baviácora. Muestra total (MT) y fracción <math><250\mu\text{m}</math> (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



Cont. **Figura 41.** Distribución espacial de zinc en Baviácora. Muestra total (MT) y fracción <250µm (fracción utilizada en el análisis de la bioaccesibilidad).

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

V.3. Bioaccesibilidad de metales.

En esta sección se muestra el análisis de la bioaccesibilidad para los metales analizados, al comparar y correlacionar los resultados obtenidos entre concentraciones de bioaccesibilidad gástrica y concentraciones de metales en suelos (mg/kg), para las localidades en estudio. Primeramente, se presenta el análisis para la localidad de Banámichi, en la que se puede observar que el Zn presenta una correlación lineal positiva ($R^2 = 0.912$), muestra que Mn, Pb y Cr presentan una R^2 baja, explicado por algunos puntos con concentraciones atípicas. (Figura 42). Para la localidad de Huépac, el Zn y Pb presentan una correlación lineal positiva con $R^2 = 0.8238$ y 0.9564 , respectivamente (Figura 43). Cr no se presenta debido a que el 97% de los resultados quedaron por abajo del límite de detección. Finalmente, la localidad de Baviácora presenta una correlación positiva entre bioaccesibilidad y concentración para los elementos Pb ($R^2 = 0.5363$), Cr ($R^2 = 0.5989$) y Zn ($R^2 = 0.6048$). Cr y Mn presentan una baja linealidad (Figura 44). Los resultados obtenidos indican como la bioaccesibilidad de los elementos analizados es variable, la cual depende de cada elemento y suelo analizado. No se presenta resultados para As en ninguna de las tres localidades, debido a que el 98% de los resultados quedaron por abajo del límite de detección.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Banámichi.

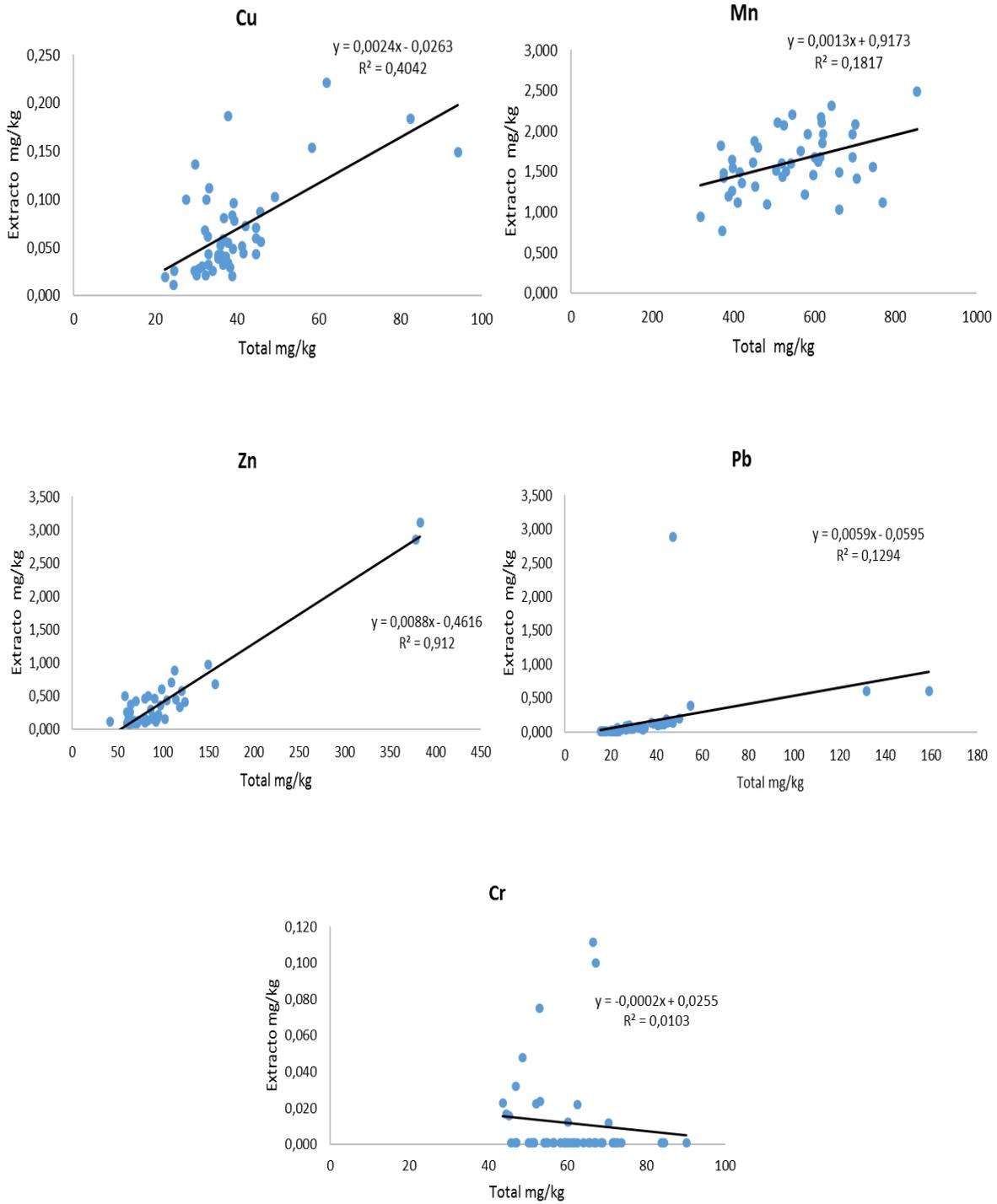


Figura 42. Bioaccesibilidad para cobre, manganeso, zinc, plomo y cromo de Banámichi.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Huépac.

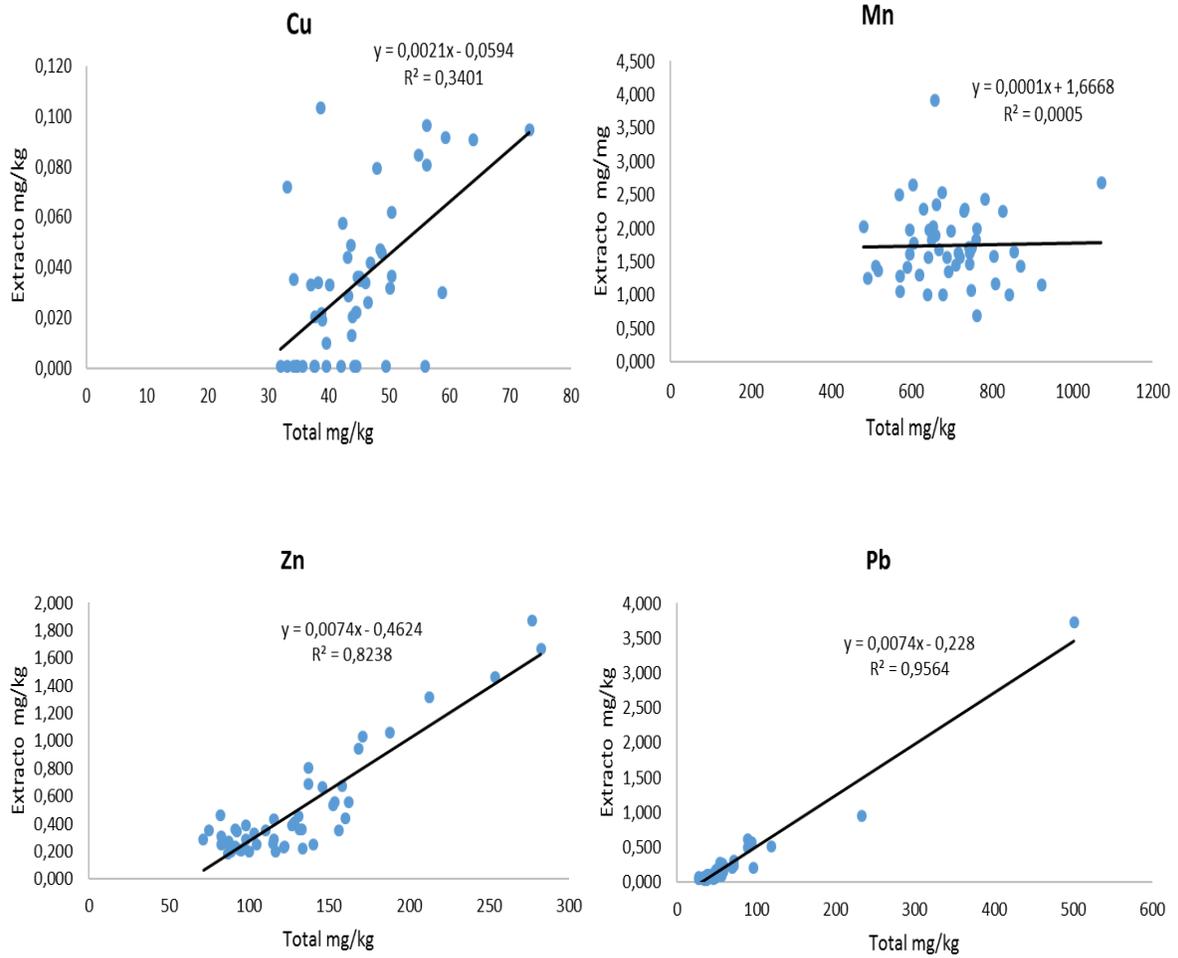


Figura 43. Bioaccesibilidad para cobre, manganeso, zinc y plomo de Huépac.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Baviácora.

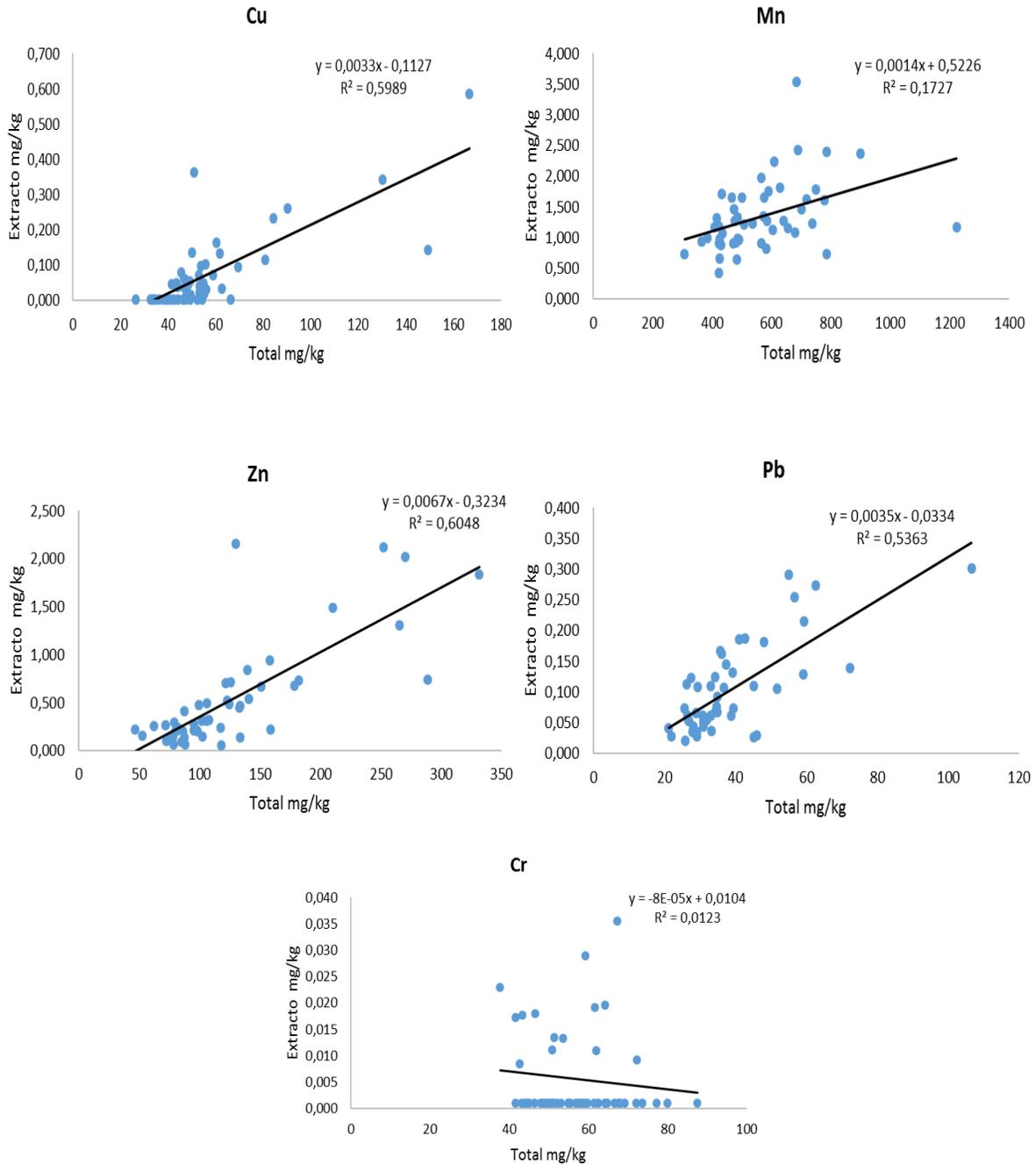


Figura 44. Bioaccesibilidad para cobre, manganeso, zinc, Plomo, cromo de Banámichi.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

V.4. Estimación de riesgo a la salud humana.

V.4.1. Riesgo por exposición a metales en suelos.

En esta sección se muestra el análisis de riesgo, para ello se presentan las tablas de datos de bioaccesibilidad en (Anexos 4). A continuación, se presenta la estimación de riesgo por metal en fracción adherible a manos (Figuras 45, 46 y 47). El estudio incorpora la bioaccesibilidad por muestra, indicando valores máximos, mínimos y promedio. El coeficiente del riesgo con valor superior a 1 indica un efecto adverso a la salud en niños para un tiempo de exposición de 10 años. La tasa de ingestión de suelo para niños que se consideró en este trabajo es de 200 mg por día para la estimación de la dosis diaria promedio. En ninguna de las tres localidades, se presentaron valores que excedan a 1 (marcado en rojo en las figuras) para los metales evaluados (Cu, Mn, Zn y As).

Debido a la fisiología y patrones de comportamiento de los niños (Kamunda *et al.*, 2016), la estimación de riesgo en niños es siempre superior a la de adultos, por esta razón se exponen las gráficas para niños. Se consideró una variación en peso corporal de 16 kg a 60 kg ya que, en un estudio realizado en el estado de Sonora, México en población infantil entre 6 y 12 años de edad se encontraron rangos de sobrepeso del 11 al 23% en comparación con obesidad en un rango del 6 al 16% (Torres *et al.*, 2010), no encontrando diferencias significativas con el sexo (Ramírez *et al.*, 2006). Un estudio publicado por Torres *et al.*, (2010) muestra que un 51.3% de los niños entrevistados en el trabajo tienen un peso normal. En el caso del arsénico, las pruebas de bioaccesibilidad indican que no se encuentra en forma soluble en el tracto digestivo.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

BANÁMICHÍ

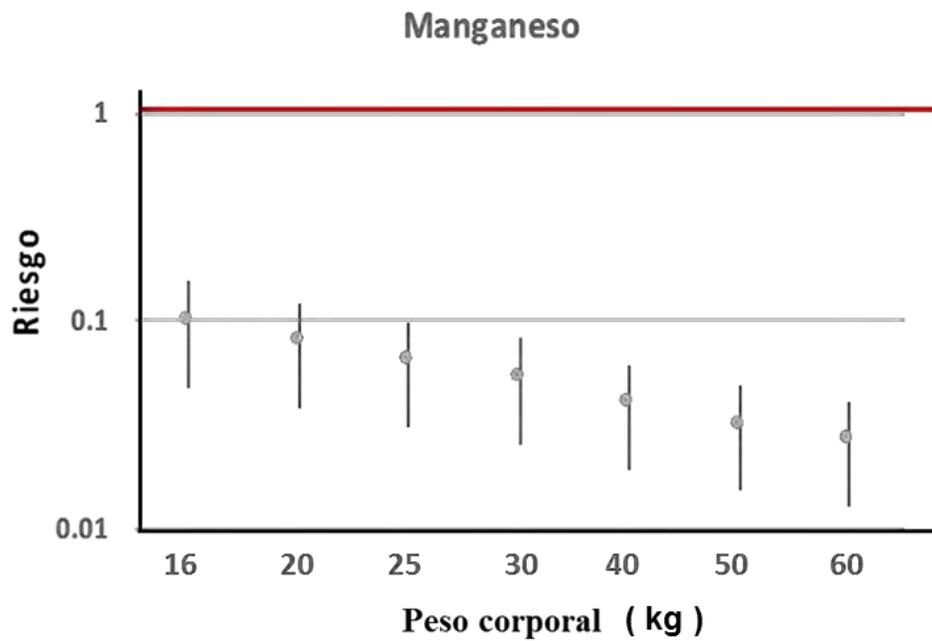
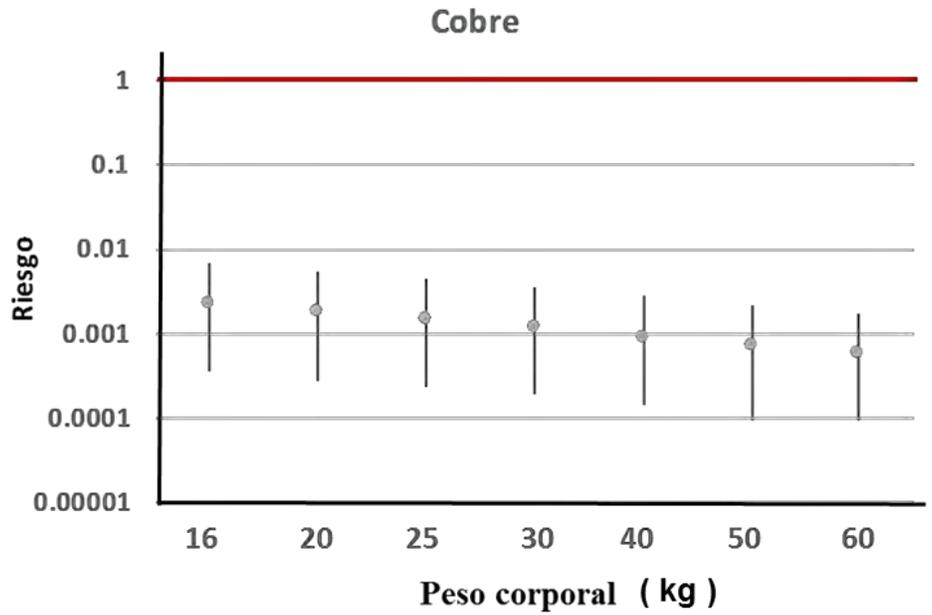
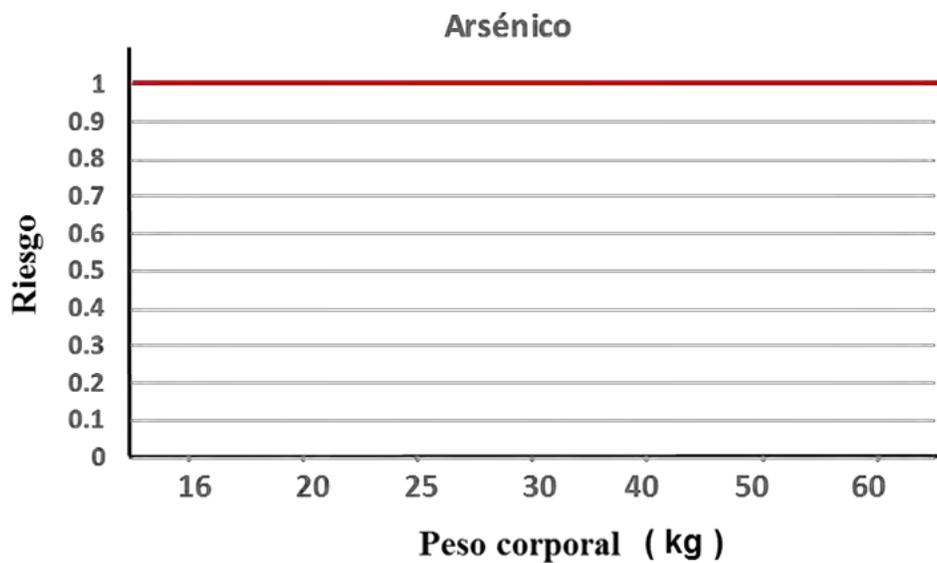
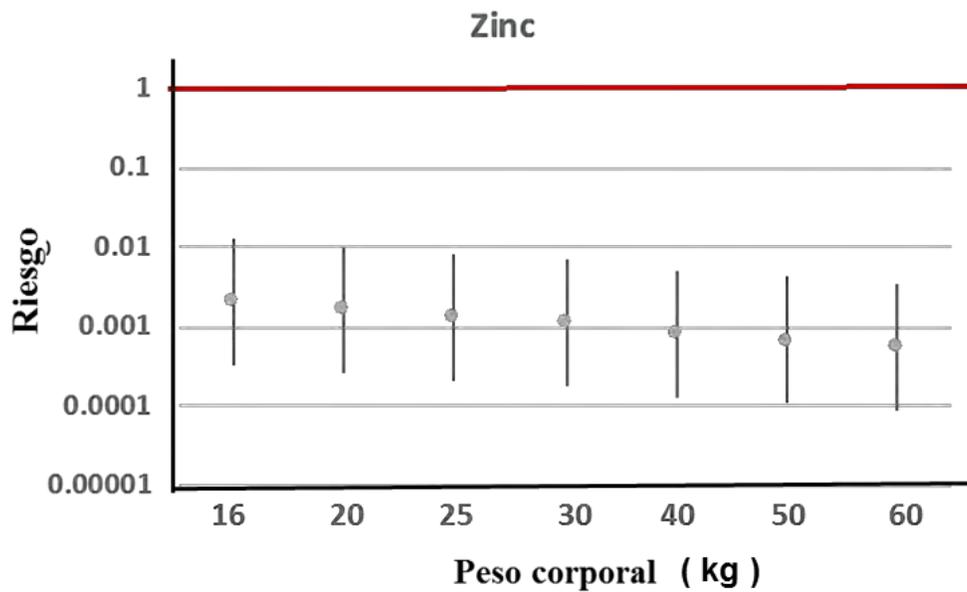


Figura 45. Gráficas de riesgo (HQ) para niños, por exposición a cobre, manganeso, zinc y arsénico en suelos, en fracción adherible a manos, en Banámichi, Sonora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



Continuación Figura 45. Gráficas de riesgo (HQ) para niños, por exposición a cobre, manganeso, zinc y arsénico en suelos, en fracción adherible a manos, en Banámichi, Sonora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

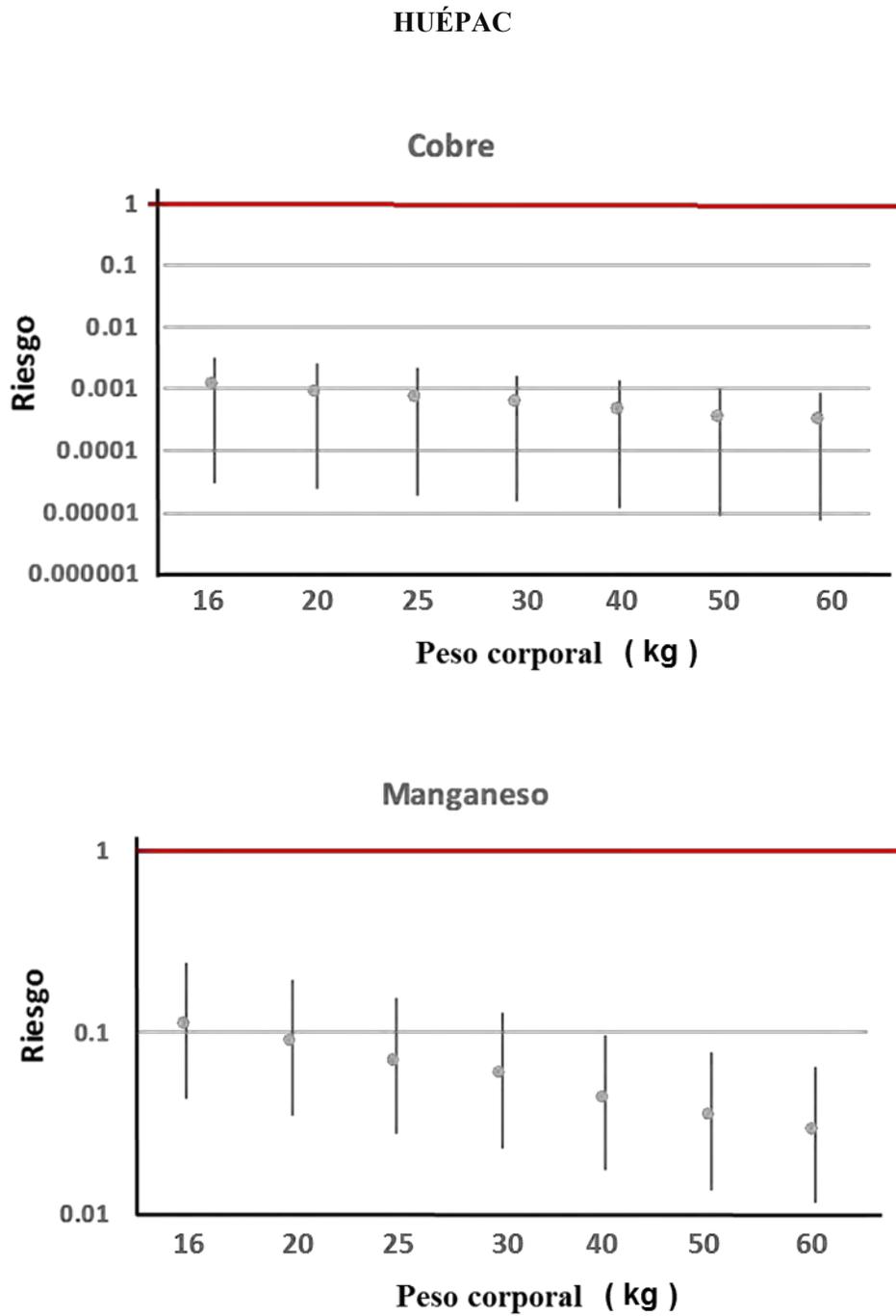
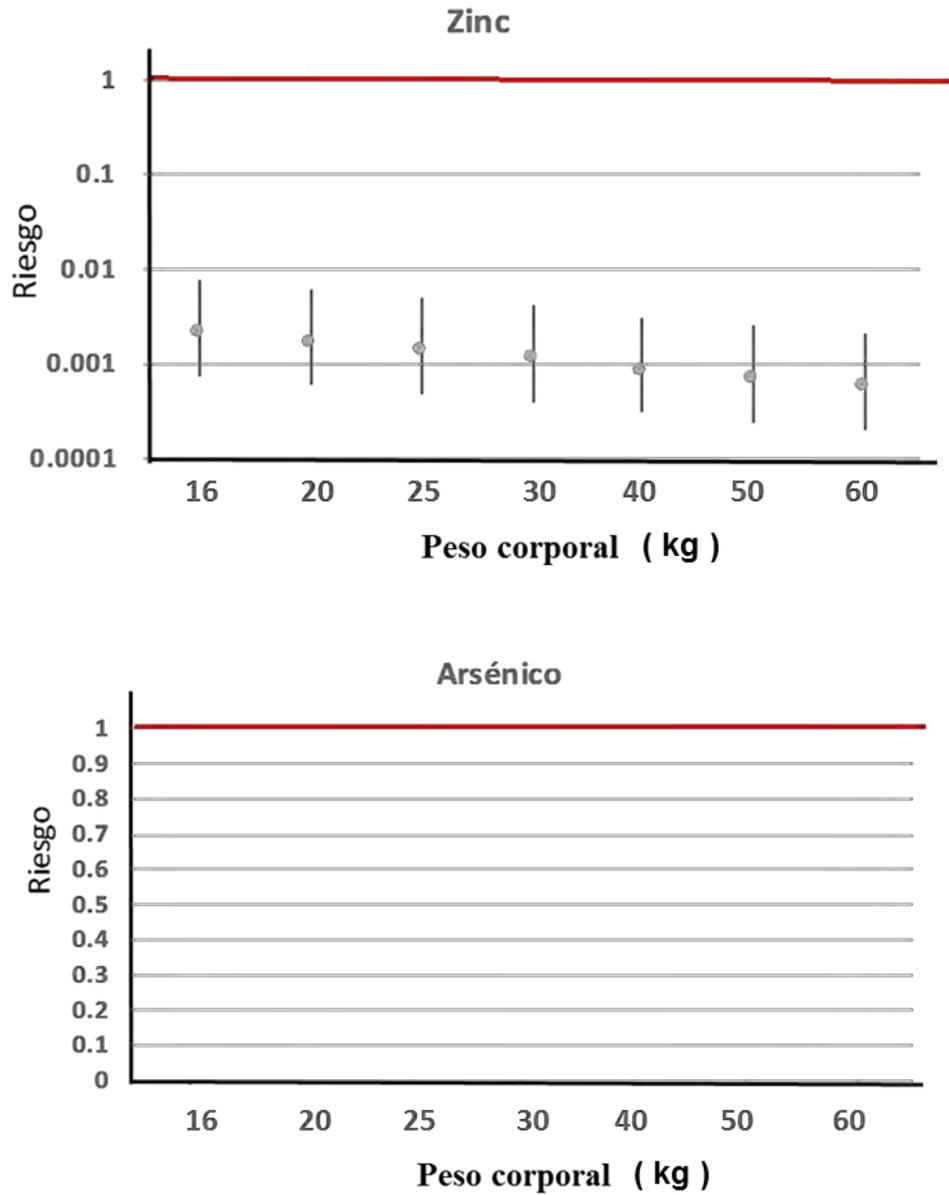


Figura 46. Gráficas de riesgo (HQ) para niños, por exposición a cobre, manganeso, zinc y arsénico en suelos, en fracción adherible a manos, en Huépac, Sonora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



Continuación Figura 46. Gráficas de riesgo (HQ) para niños, por exposición a cobre, manganeso, zinc y arsénico en suelos, en fracción adherible a manos, en Huépac, Sonora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

BAVIÁCORA

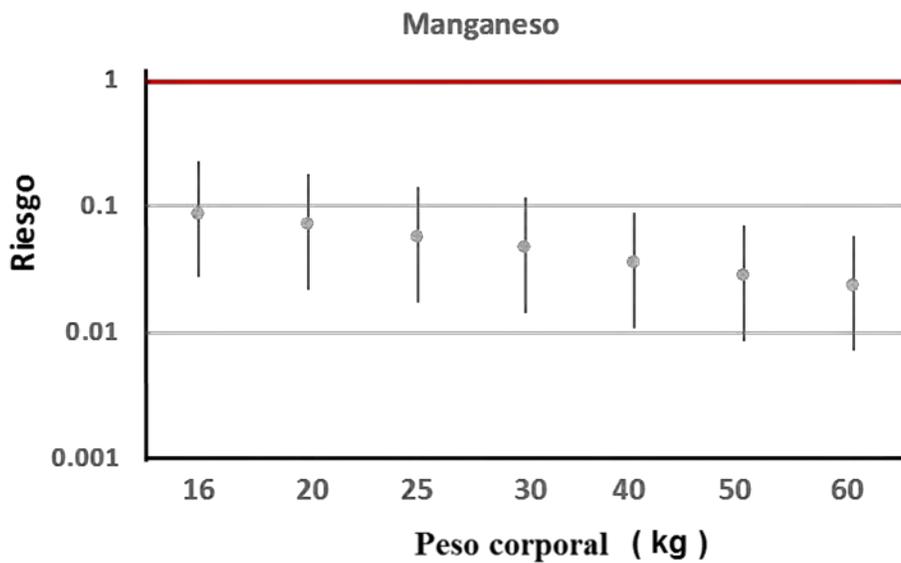
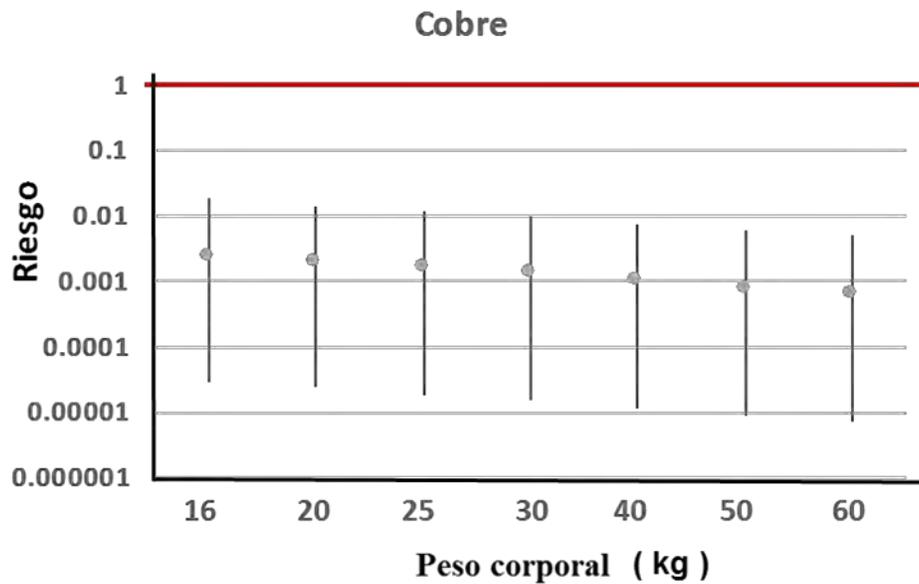
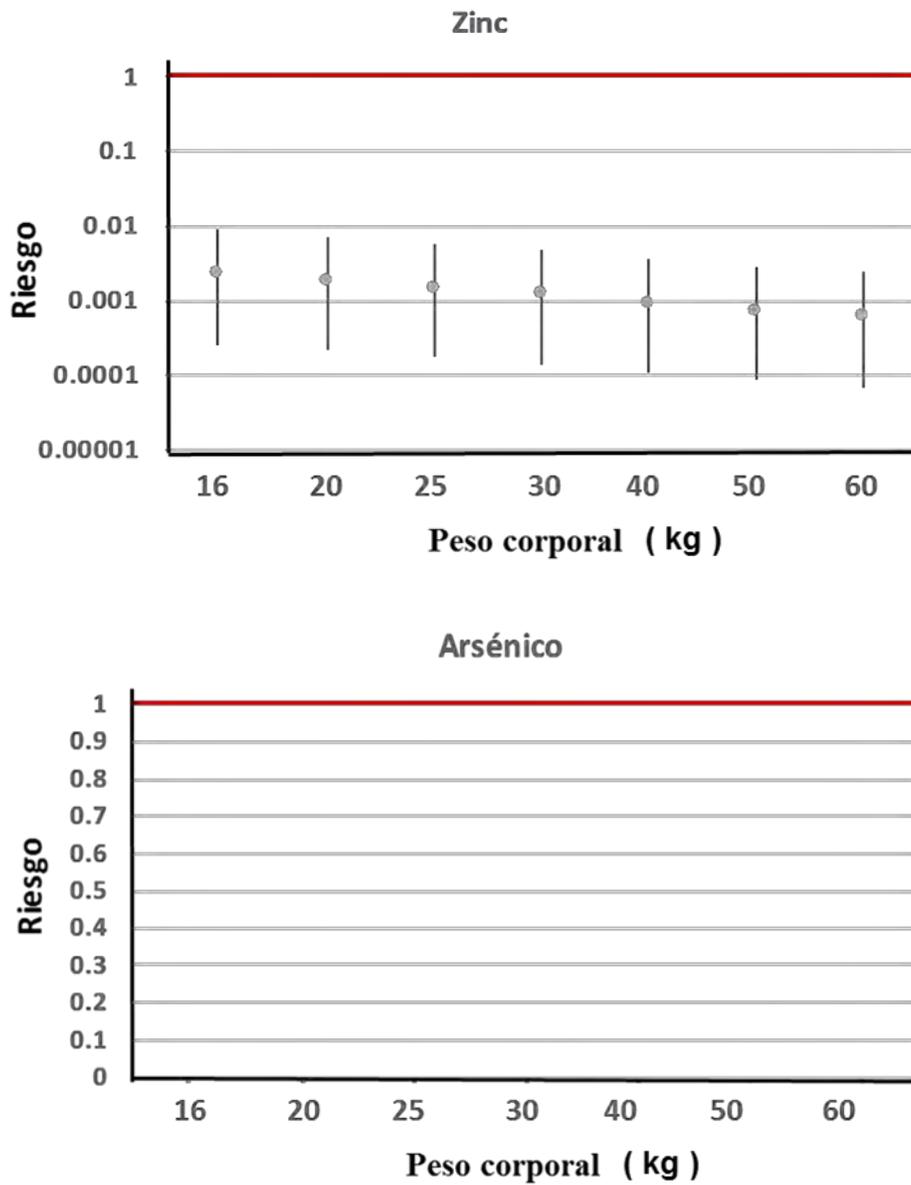


Figura 47. Gráficas de riesgo (HQ) para niños, por exposición a cobre, manganeso, zinc y arsénico en suelos, en fracción adherible a manos, en Baviácora, Sonora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



Continuación Figura 47. Gráficas de riesgo (HQ) para niños, por exposición a cobre, manganeso, zinc y arsénico en suelos, en fracción adherible a manos, en Bavíacora, Sonora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

La estimación del riesgo integrado (mayor a 1 indica valor adverso a la salud en un tiempo de exposición prolongado) que se obtuvo para las localidades fue relativamente bajo, mostrando valores inferiores a 1. En Banámichi y Huépac, se observaron zonas cercanas a 0.3; mientras que en Baviácora se obtuvieron valores de 0.125 (Figuras 48, 49 y 50). En éstas se representan valores altos (riesgo = 1) en tonalidades rojas y en tonalidades verdes (riesgo < a 1) zonas con un menor riesgo para la población.

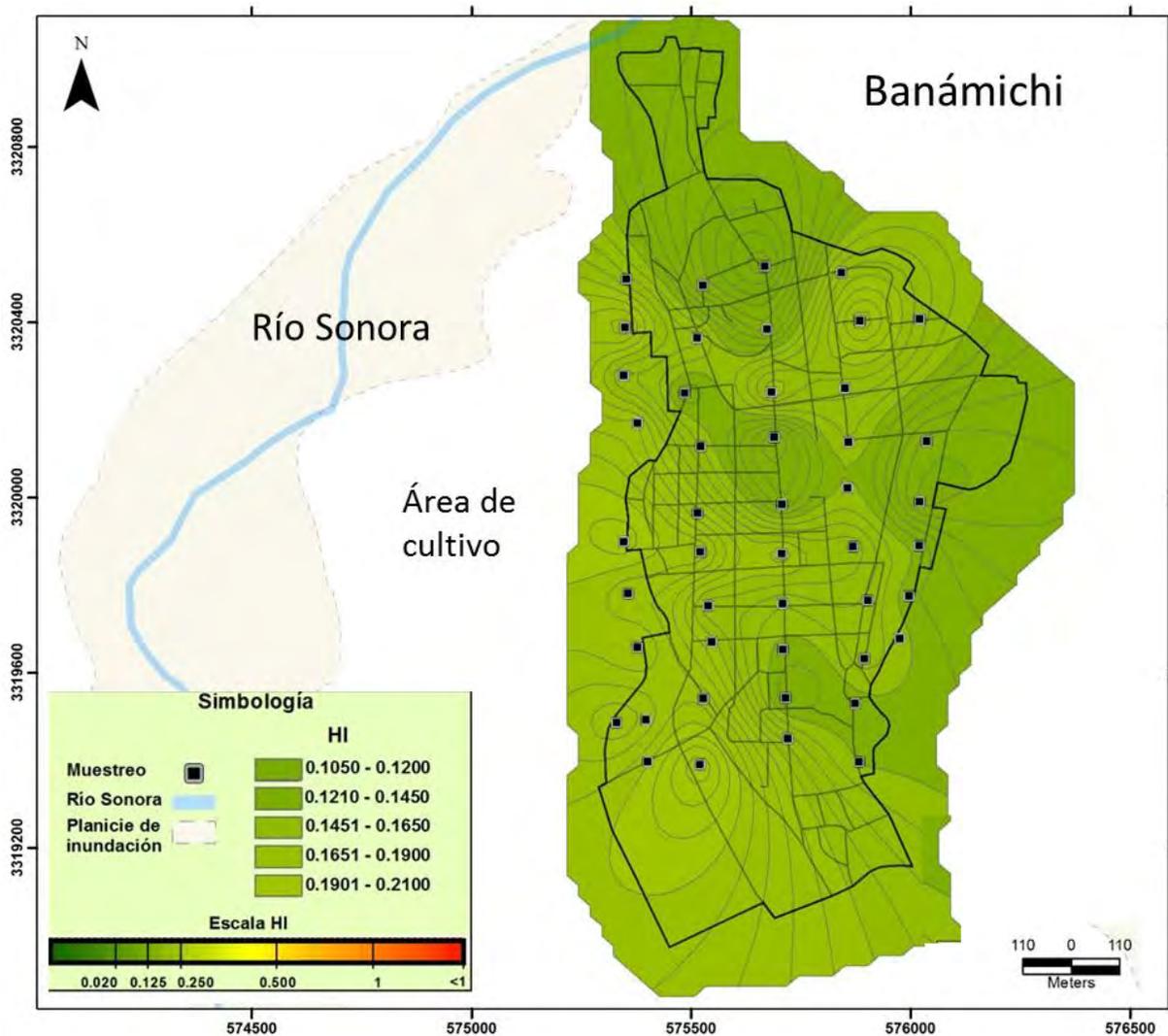


Figura 48. Mapa de riesgo integrado para niños expuestos a Mn, Cu, As y Zn en suelos de Banámichi, Sonora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

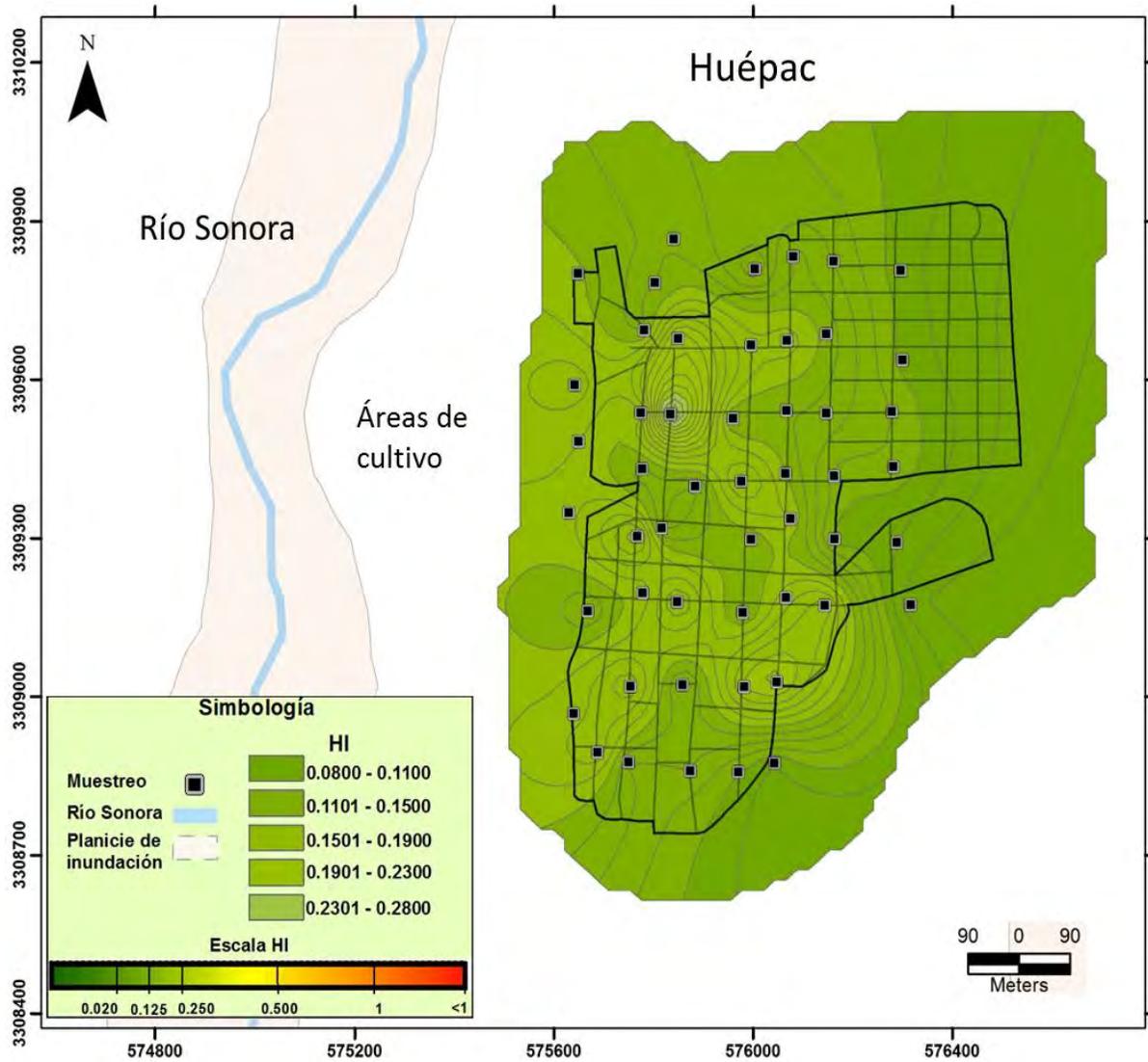


Figura 49. Mapa de riesgo integrado para niños expuestos a Cu, Mn, As, y Zn en suelos de Huépac, Sonora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

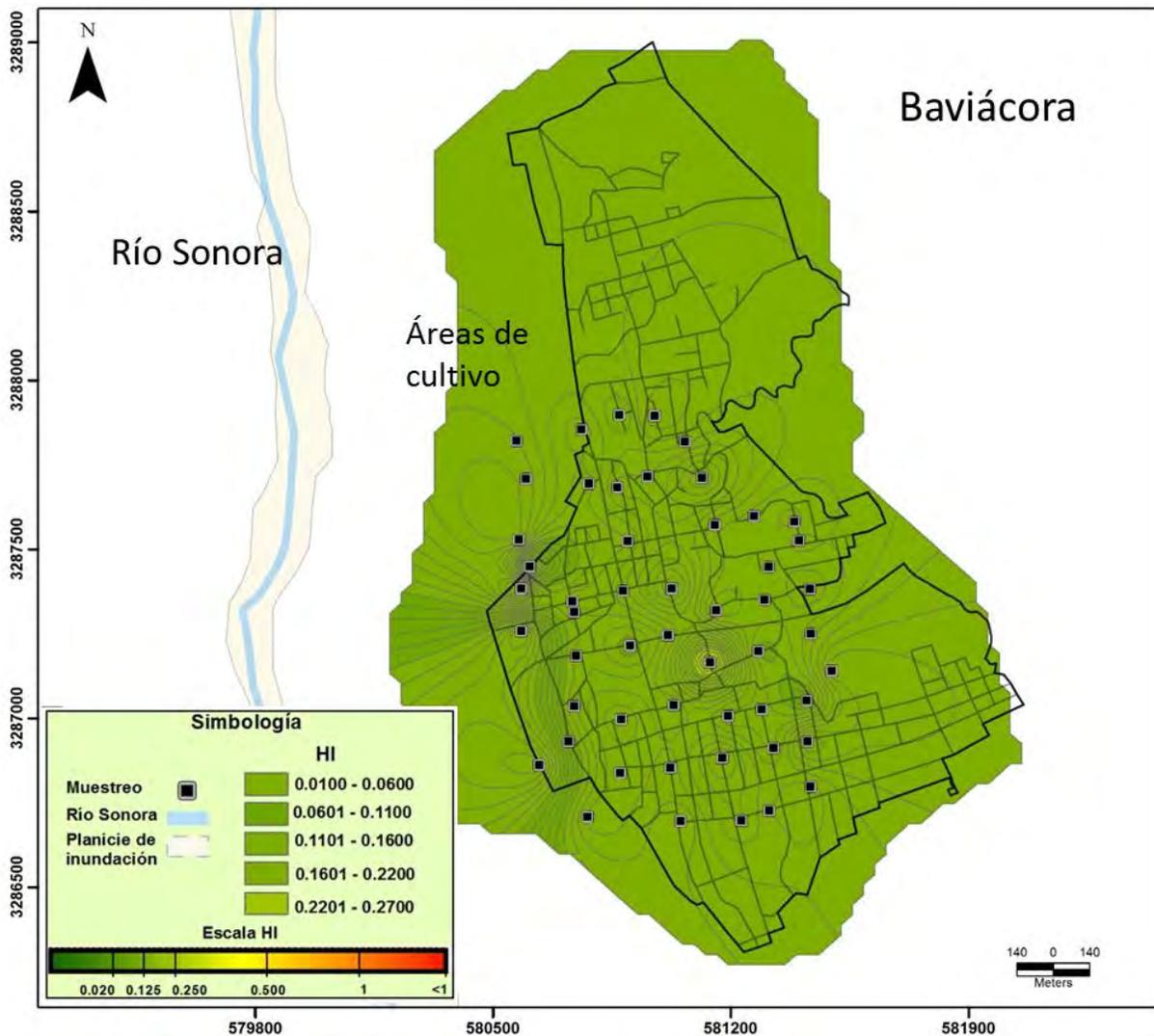


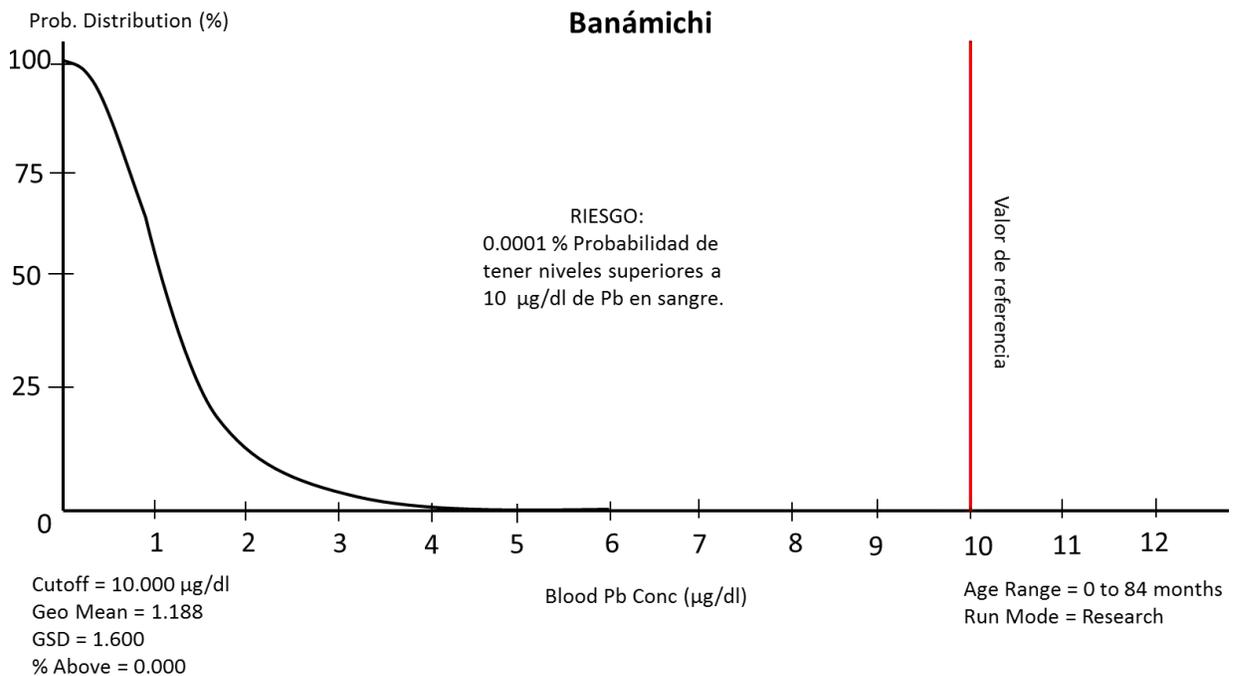
Figura 50. Mapa de riesgo integrado para niños expuestos a Cu, Mn, Zn y As en suelos de Baviácora, Sonora.

V.4.2. Estimación de riesgo por exposición a plomo en base al modelo IEUBK.

En este apartado se muestran los resultados para la estimación de riesgo a la salud en niños por exposición a plomo, en suelos obtenidos con la metodología del sistema biocinético IEUBK de la US-EPA (1994). Esta simulación de riesgo se basa en los datos de concentraciones máximas obtenidos a partir del análisis de la fracción de suelo $<20\ \mu\text{m}</math>. El$

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

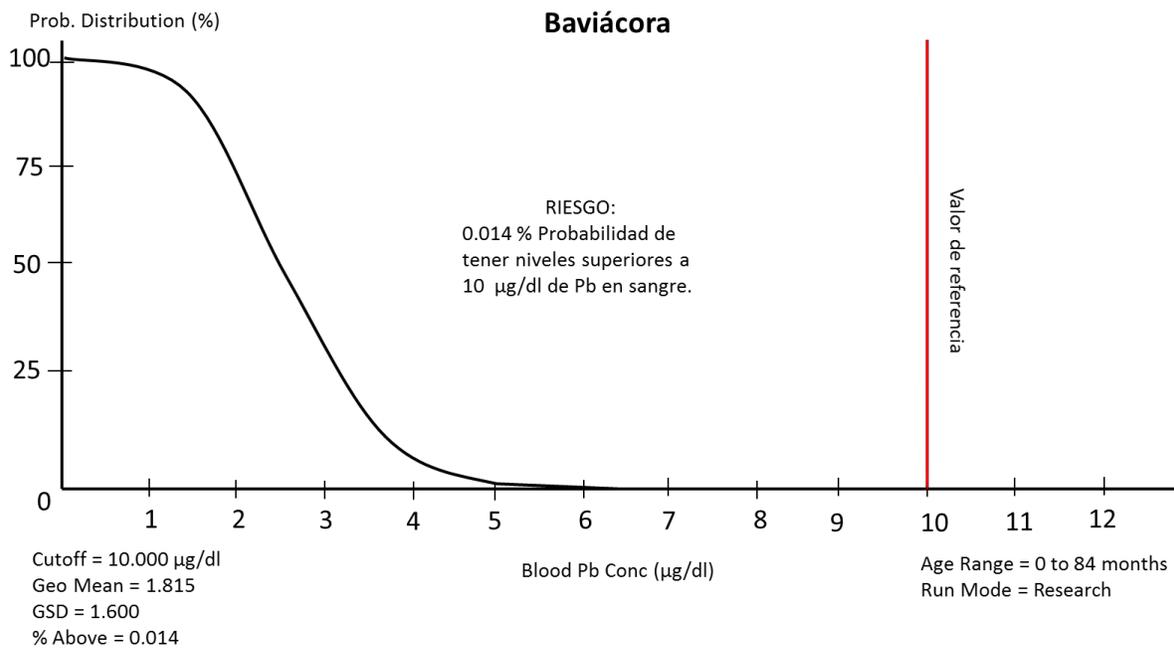
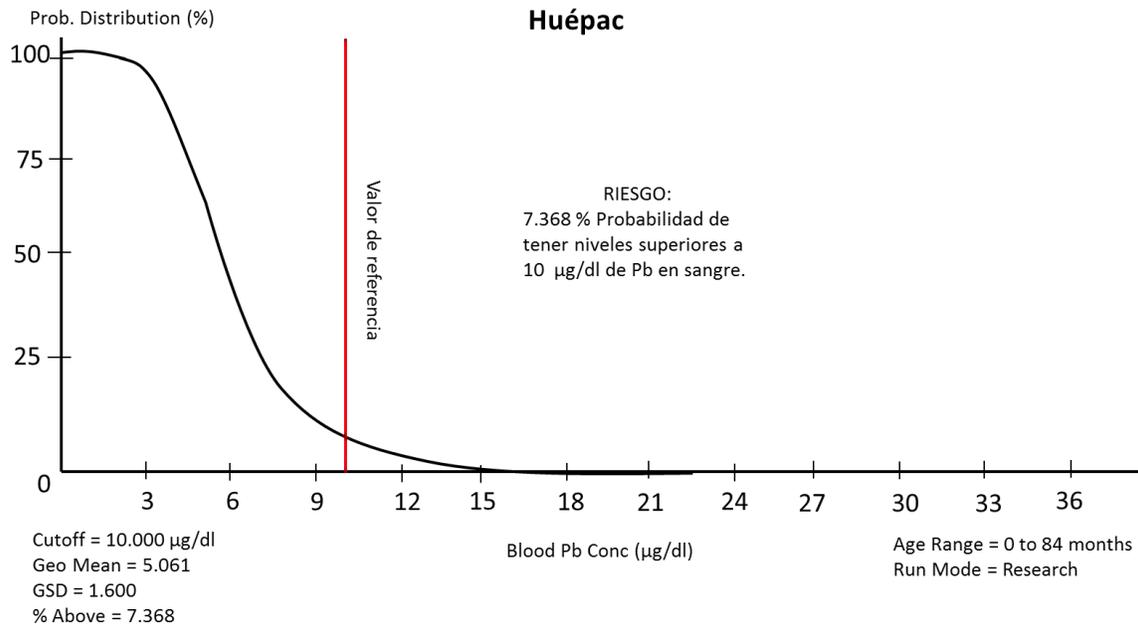
análisis comprende la integración de los valores de concentraciones de suelos obtenidos (mg/kg), también valores obtenidos sobre la bioaccesibilidad gástrica del Pb y adicionalmente se integró información sobre los valores máximos de Pb encontrados en vegetales de la región obtenidos por el Grupo de Investigación en Inocuidad del Instituto de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México (2015) (datos no indicados en este trabajo). Las localidades analizadas, muestran que la probabilidad de riesgo en niños, a tener valores superiores de 10 microgramos por decilitro de plomo en sangre, es mucho mayor en la localidad de Huepac (7.36%) que en Baviácora (0.014%) y Banámichi (0.0001%) (Figura 51). Los valores encontrados para la localidad de Huépac, posiblemente se deban a otra fuente de plomo local y no a la relacionada con el derrame del 2014.



Nota: Figura originada por software IEUBK (Integrated Exposure Uptake Biokinetic) versión 1.1 build11 desarrollado por la EPA (1994).

Figura 51. Riesgo de plomo en sangre para las localidades de Banámichi, Huépac y Baviácora.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.



Nota: Figura originada por software IEUBK (Integrated Exposure Uptake Biokinetic) versión 1.1 build11 desarrollado por la EPA (1994).

Continuación Figura 51. Riesgo de plomo en sangre para las localidades de Banámichi, Huépac y Baviácora.

VI. CONCLUSIONES

-La fracción de suelo de menor tamaño # <635, correspondiente a partículas (< 20 μm) presentan las concentraciones más elevadas de metales, siendo un factor importante ya que estos tamaños de partículas son las adheribles a manos y posteriormente ingeridas por el comportamiento mano-boca.

-Los datos de concentraciones (mg/kg) de elementos de suelos (naturales + antrópicos) reportados en este estudio, reflejan variaciones entre las localidades estudiadas. No se sigue un patrón de disminución o aumento de las concentraciones según su cercanía o lejanía de la fuente reportada (derrame en Mina Buenavista del Cobre).

-Dentro de los metales analizados en el presente estudio, el Mn fue el que presentó valores de concentraciones superiores en todas las localidades, mientras que el As fue el metal que presentó valores de concentración más bajos.

-Al analizar las concentraciones de los metales en las localidades y al compararlas con las obtenidas para el sitio de referencia, se aprecia a ver que este último presenta concentraciones mayores en 4 de los 6 elementos evaluados (Cu, Zn, Cr y Mn). Huépac presentó concentraciones más elevadas en Pb y As. No se presenta una tendencia de disminución en la concentración de metales conforme se aleja de la fuente de estudio (derrame río Sonora, Buenavista del Cobre). Lo que hace suponer que existen otras fuentes potenciales que se encuentran aportando concentraciones de metales a la cuenca del río Sonora.

-La información obtenida del análisis geoquímico de concentración de metales, muestran que hay un incremento significativo en las concentraciones de metales al utilizar una fracción más fina, # <635, (correspondiente al tamaño de partícula < a 20 μm) que al utilizar la malla # 60 (correspondiente al tamaño de partícula de 0.250 μm) establecida en

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para cálculos de riesgo a la salud humana. De esta manera, probablemente la NOM estaría sobreestimando este tipo de análisis.

-La localidad de Huépac fue la que presentó una mayor probabilidad de riesgo por Pb en niños, según los resultados obtenidos en el análisis Biocinético de plomo en sangre IEUBK. Correlacionando estos valores a las altas concentración de Pb en suelo obtenidas para esta localidad, siendo las más elevadas dentro de las tres localidades muestreadas. Se puede suponer que la fuente de este metal no corresponde al derrame de la mina Buenavista del Cobre, si no a otra posible fuente cercana a esta localidad.

-Se encontró que algunos elementos analizados son mayormente bioaccesibles, ya que presentan una correlación positiva entre valores de bioaccesibilidad y concentración, siendo el Zn y Pb los elementos que presentan mayor bioaccesibilidad.

-Los mapas de riesgo obtenidos muestran efectivamente zonas con mayores concentraciones usando escala de colorimetría, además permite ubicar puntualmente las zonas de posibles fuentes de contaminantes.

-Los elementos no asociados al derrame se muestran como referencia, pero no forman parte de la discusión central del trabajo ya que no se han reportado datos de dosis de referencia y por lo tanto no es posible realizar una estimación de riesgo para estos elementos.

VII. RECOMENDACIONES

Sería importante que se promoviese más investigación sobre toxicidad de elementos, así como sus efectos a la salud humana, para establecer parámetros para la obtención de valores de dosis de referencia para elementos que no se encuentran debidamente normados, y que no tienen valores de dosis de referencia (DdR) reportados en literatura. Esto dificulta llevar a cabo una evaluación de riesgo para ciertos metales al no poder estimarse el riesgo a la salud humana, aunque el elemento se encuentre en concentraciones considerables en algún evento de contaminación.

Se recomienda la utilización de mapas del cálculo de riesgo integrado, ya que facilitan la observación de las posibles fuentes de emisión puntualmente, así de esta manera, puede resultar de gran facilidad la utilización de esta herramienta para la toma de decisiones.

Para el cálculo de la estimación del riesgo, se debiese de considerar la utilización de las fracciones granulométricas más finas de los suelos (ejemplo $< 20 \mu\text{m}$), debido a que los resultados obtenidos en el presente estudio sobre el incremento de las concentraciones de metales en las fracciones más finas $< 20 \mu\text{m}$, así como los resultados obtenidos por diversos autores en los que se plantea el potencial de adherencia a manos de partículas finas y el enriquecimiento de metales en fracciones finas. Lo que lleva a replantear un análisis sobre lo descrito en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 sobre el estudio de y evaluación riesgo.

VIII. REFERENCIAS

Argyaki, A., & Kelepertzis, E. 2014. Urban soil geochemistry in Athens, Greece: the importance of local geology in controlling the distribution of potentially harmful trace elements. *Science of the Total Environment*, 482, 366-377.

American Society for Testing and Materials (ASTM Internacional), 2001. Estándar Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Edition C 136 – 01. 2 Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02. United States.

Choate, L. M., Ranville, J. F., Bunge, A. L., & Macalady, D. L. 2006. Dermal adhered soil: 1. Amount and particle-size distribution. *Integrated environmental assessment and management*, 2(4), 385-390.

Connelly, N. G., Damhus, T., Hartshorn, R. M. & Hutton, A. T. 2005. Nomenclature of Inorganic Chemistry. IUPAC Recommendations 2005, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2005. Disponible en línea: <http://media.iupac.org/publications/books/>.

Dao, L., Morrison, L., Zhang, H., & Zhang, C. 2014. Influences of traffic on Pb, Cu and Zn concentrations in roadside soils of an urban park in Dublin, Ireland. *Environmental geochemistry and health*, 36(3), 333-343.

Díaz-Barriga F. 1999. Metodología de identificación y evaluación de riesgos para la salud en sitios contaminados. Lima, Perú. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Metodología, 93 pp.

Duggan, M. J., Inskip, M. J., Rundle, S. A., & Moorcroft, J. S. 1985. Lead in playground dust and on the hands of schoolchildren. *Science of the Total Environment*, 44(1), 65-79

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Faiz, Y., Tufail, M., Javed, M., & Chaudhry, M., 2009. Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn along Islamabad Expressway, Pakistan. *Microchemical Journal* 92: 186-192

Imperato, M., Adamo, P., Naimo, D., Arienzo, M., Stanzione, D., & Violante, P. 2003. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy). *Environmental pollution*, 124(2), 247-256.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 2004. Guías para la Interpretación de Cartografía Edafología.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Banámichi, Huépac y Baviácora, Sonora.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 2010. Compendio de Información Geográfica Municipal. Banámichi, Huépac y Baviácora, Sonora.

Jiao, W., Ouyang, W., Hao, F., & Lin, C. 2015. Anthropogenic impact on diffuse trace metal accumulation in river sediments from agricultural reclamation areas with geochemical and isotopic approaches. *Science of The Total Environment*, 536, 609-615.

Kamunda, C., Mathuthu, M., & Madhuku, M. 2016. Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from Witwatersrand Gold Mining Basin, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(7), 663.

Kissel, J. C., Richter, K. Y., & Fenske, R. A. 1996. Factors affecting soil adherence to skin in hand-press trials. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 56(5), 722-728.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Lane, T. W., & Morel, F. M. 2000. A biological function for cadmium in marine diatoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9), 4627-4631.

Martínez-Zatarain, C. A., Meza-Figueroa, D., & Moreno-Rodríguez, V. 2015. Evaluación del desempeño analítico de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X con tubos miniaturizados. Departamento de Geología, División de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.

Meza-Montenegro, M. M., Gandolfi, A. J., Santana-Alcántar, M. E., Klimecki, W. T., Aguilar-Apodaca, M. G., Del Río-Salas, R., & Meza-Figueroa, D. 2012. Metals in residential soils and cumulative risk assessment in Yaqui and Mayo agricultural valleys, northern Mexico. *Science of the Total Environment*, 433, 472-481.

Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (Nomenclatura IUPAC). 1993. Sistema de nomenclatura de compuestos químicos y de descripción de la ciencia y de la química en general. *Nomenclature of Organic Chemistry*, Oxford: Pergamon Press, 1993.

Norma Oficial Mexicana, (NOM) 2006. NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreos de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Diario Oficial de la Federación. México. Secretaría de Economía. Dirección General de Normas. México.

Norma Oficial Mexicana, (NOM) 2007. 147-SEMARNAT/SSA1-2004. Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por Arsénico, Bario, Berilio, Cadmio, Cromo Hexavalente, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo Selenio, Talio y/o Vanadio. Diario Oficial de la Federación. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.

Plumlee, G. S., & Ziegler, T. L. 2007. The medical geochemistry of dusts, soils, and other earth materials in: *environmental geochemistry*. B. Sherwood Lollar, Toronto.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Ramírez, E., Grijalva-Haro, M. I., Ponce, J. A., & Valencia, M. E. 2006. Prevalencia de sobrepeso y obesidad en el noroeste de México por tres referencias de índice de masa corporal: diferencias en la clasificación. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 56(3), 251-256.

Ramos-Perez, D. 2017. Evaluación de la contaminación residual y del riesgo ambiental en suelos y sedimentos afectados en la cuenca del río Sonora. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. 133 pp.

Rodrigues, S. M., Pereira, M. E., da Silva, E. F., Hursthouse, A. S., & Duarte, A. C. 2009. A review of regulatory decisions for environmental protection: Part I—Challenges in the implementation of national soil policies. *Environment International*, 35(1), 202-213.

Ruby, M. V., Lowney, Y. W., Bunge, A. L., Roberts, S. M., Gomez-Eyles, J. L., Ghosh, U., ... & Menzie, C. 2016. Oral Bioavailability, Bioaccessibility, and Dermal Absorption of PAHs from Soil State of the Science. *Environmental Science & Technology*, 50(5), 2151-2164.

Ruby, M. V., & Lowney, Y. W. 2012. Selective soil particle adherence to hands: implications for understanding oral exposure to soil contaminants. *Environmental Science & Technology*, 46(23), 12759-12771.

Ruby, M. V., Davis, A., Schoof, R., Eberle, S., & Sellstone, C. M. 1996. Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test. *Environmental Science & Technology*, 30(2), 422-430.

Ruby, M. V., Davis, A., Link, T. E., Schoof, R., Chaney, R. L., Freeman, G. B., & Bergstrom, P. 1993. Development of an in vitro screening test to evaluate the in vivo

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

bioaccessibility of ingested mine-waste lead. *Environmental Science & Technology*, 27(13), 2870-2877.

Secretaría de Medio Ambiente y de Recursos Naturales (SEMARNAT). 2006. Guía técnica para orientar la elaboración de estudios de evaluación de riesgo ambiental de sitios contaminados. Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. Ruíz Saucedo, U. México.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2012. Consulta sobre sedimentos activos para las localidades de Banámichi, Aconchi y Baviácora. Trabajos en el estado de Sonora. (en línea), consulta realizada el mes de mayo 2017. http://www.sgm.gob.mx/publicaciones_sgm/boletin_sgm.jsp?wparam=4

Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2015. Carta geológica – minera, escala 1:500,000.(en línea) Edición de cartas geológico – mineras y geoquímicas. http://portal.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/estados/geologia/pdf/sonora.pdf

Siciliano, S. D., Laird, B. D., & Lemieux, C. L. 2010. Polycyclic aromatic hydrocarbons are enriched but bioaccessibility reduced in brownfield soils adhered to human hands. *Chemosphere*, 80(9), 1101-1108.

Sipes I. G. & Badger D. 2001. Principles of toxicology. In *Clinical Environmental Health and Exposures*, 2nd edition. (J. B. Sullivan, Jr. and G. Krieger). Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, pp. 49–67.

Tianlik, T. E. H., Norulaini, N. A. R. N., Shahadat, M., Yoonsing, W. O. N. G., & Omar, A. K. M. 2016. Risk assessment of metal contamination in soil and groundwater in Asia: a review of recent trends as well as existing environmental laws and regulations. *Pedosphere*, 26(4), 431-450.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Torres, J. M. M., de la Fuente, G. M. C., & Frías, H. (2010). Comportamiento alimentario y obesidad infantil en Sonora, México. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud*, 8(2), 1131-1147.

Tuller, M., & Or, D. 2004. Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 4, 278-289.

United States - Environmental Protection Agency (US-EPA). 1986. Air Quality Criteria for Lead, Volume I-IV Environmental Criteria and Assessment Office, Office of Research and Development RTP, NC. EPA 600/8-83-028 a-d.

United States - Environmental Protection Agency (US-EPA). 1994. Guidance Manual for the Integrated Exposure Uptake Biokinetic Model for Lead in Children. Publication 9285.7-15-1 EPA/540/R-93/081. 1994.

United States - Environmental Protection Agency (US-EPA). 1994. Technical Support Document on Lead. Document prepared for Office of Solid Waste and Emergency Response by US-EPA/ECAO Cincinnati, OH. ACAO-CIN-757.

United States - Environmental Protection Agency (US-EPA). 1998. Exposure Factors Handbook, Chapter 5; Soil and Dust Ingestion. (En línea) <file:///C:/Users/FXL/Downloads/EFH-CHAPTER05.PDF>

United States - Environmental Protection Agency (US-EPA). 2001. Toxics Release Inventory: Public Data Release Report. (En línea) online: www.epa.gov/tri/tridata/tri01.

United States - Environmental Protection Agency (US-EPA). 2004. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment). Washington, DC.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

United States - Environmental Protection Agency (US-EPA). 2007. Field Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry for the Determination of Elemental Concentrations in Soil and Sediment. (En línea) <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/6200.pdf>

United States - Environmental Protection Agency (US-EPA). 2011. Exposure Factors Handbook. (En línea) <http://www.Epa.Gov/ncea/efh/pdfs/efhcomplete.Pdf>.

United States - Environmental Protection Agency (US-EPA). 2017. Integrated Risk Information System (IRIS). Assesment; listt of chemicals. (En línea) <https://www.epa.gov/iris>.

Wang, X., Sato, T., Xing, B., & Tao, S. 2005. Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish. *Science of the Total Environment*, 350(1), 28-37.

Yamamoto, N., Takahashi, Y., Yoshinaga, J., Tanaka, A., & Shibata, Y. (2006). Size distributions of soil particles adhered to children's hands. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 51(2), 157-163.

Yay, O. D., Alagha, O., & Tuncel, G. 2008. Multivariate statistics to investigate metal contamination in surface soil. *Journal of Environmental Management*, 86(4), 581-594.

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

IX. ANEXOS

Anexo 1.

Cadena Custodia

| | | | | | |
|--|--|--|--------------------------|---------------------------|----------|
|  <p>Cadena de Custodia</p> <p>FOLIO</p> <p>Fotografía número:</p> | | <p>Universidad de Sonora. Departamaneto de Geología</p> <p>Hermosillo, Sonora. (662) 2592110 y 2592111</p> <p>Proyecto: Geología Médica. Construcción del modelo conceptual para identificación de rutas de exposición-receptor y evaluación de riesgo a la salud.</p> | | | |
| | | Proyecto | | Datos del Muestreo | |
| Localidad de muestreo: Arizpe y Bacoachi | | Muestra (clave) | | GM-ARI | |
| Sitio de muestreo: | | Suelo agrícola | | | |
| Coordenadas: | | Suelo residencial | | | |
| Fecha y hora: | | suelo de calle | | | |
| Persona que muestrea: | | Peso total base seca | | | |
| Responsable: Deneb A. Duarte | | Profundidad de la muestra | | Densidad | |
| E-mail: denebduarte@gmail.com | | Tamaño del grano | | pH | |
| Característica del sitio: | | Almacenamiento, ubicación, caja numero, lugar, | | | |
| Condiciones climáticas: | | Tamices | | | |
| Presencia de vegetación: Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> | | Tamiz | <input type="checkbox"/> | Peso | % |
| Uso actual del suelo: | | 18 | <input type="checkbox"/> | | |
| Infraestructura: Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> | | 35 | <input type="checkbox"/> | | |
| Actividades ajenas al proceso propio de contaminación que pueda influir en la calidad del muestreo: Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> | | 60 | <input type="checkbox"/> | | |
| Presencia de residuos o materiales de relleno: Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> | | 120 | <input type="checkbox"/> | | |
| Características del suelo | | 230 | <input type="checkbox"/> | | |
| Textura: Color: | | 325 | <input type="checkbox"/> | | |
| Presencia de humedad: Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> | | 635 | <input type="checkbox"/> | | |
| Presencia de hojarasca: Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> | | peso total | | | |
| Presencia de otros materiales: | | Seguimiento de la muestra | | | |
| Observaciones | | Muestreo campo | | <input type="checkbox"/> | |
| | | Secado de muestras | | <input type="checkbox"/> | |
| | | Tamizado de muestras | | <input type="checkbox"/> | |
| | | Análisis de muestra en Niton | | <input type="checkbox"/> | |
| | | Envío de muestras a UNAM | | <input type="checkbox"/> | |
| | | Firmas | | | |
| | | Dra. Meza | | | |
| | | Dr. Del Río | | | |
| | | Dr. Romero | | | |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Anexo 2.

Tabla con límites de detección del equipo de Fluorescencia de rayos x, Niton FXL

| Límites de detección en ppm (mg/kg) | |
|-------------------------------------|-------------|
| Elemento | Sio2 |
| U | 2 |
| Th | 2 |
| Hg | 3 |
| W | 30 |
| Ba | 28 |
| Sb | 6 |
| Sn | 8 |
| Cd | 3 |
| Pd | 2 |
| Ag | 2 |
| Mo | 2 |
| Nb | 2 |
| Zr | 2 |
| Y | 2 |
| Sr | 2 |
| Rb | 2 |
| Bi | 3 |
| As | 2 |
| Se | 2 |
| Au | 7 |
| Pb | 2 |
| Ga | 2 |
| Zn | 4 |
| Cu | 6 |
| Ni | 10 |
| Co | 12 |
| Fe | 20 |
| Mn | 12 |
| Cr | 7 |
| V | 8 |
| Ti | 10 |
| Ca | 20 |
| K | 30 |
| Cl | 40 / 35* |
| S | 50 / 45* |
| P | 70 / 60* |
| Si | NA |
| Al | 350 / 175* |
| Mg | 1400 / 350* |

* LD's con el uso de helio

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Anexo 3.

Tablas con concentraciones.

Elementos asociados al derrame en muestra total de suelos, localidad Banámichi, Sonora.

<LD = Menor a límite de detección, ND = No disponible.

| MT | Elementos asociados a derrame | | | | | | | | | |
|----------|-------------------------------|--------|------|--------|-----------|--------|--------|-------|--------|-------|
| | Clave | N | E | pH | C.E.(µS) | Cu | Mn | Zn | As | Pb |
| GM-BAN01 | 3320408 | 576021 | 8,45 | 400,0 | 31,83 | 396,38 | 62,91 | 12,64 | 18,31 | 70,69 |
| GM-BAN02 | 3320261 | 570024 | 9,17 | 106,3 | 36,67 | 740,37 | 78,16 | 13,25 | 17,49 | 86,94 |
| GM-BAN03 | 3320129 | 576037 | 9,13 | 84,8 | 31,65 | 711,78 | 71,45 | 11,21 | 16,19 | 72,95 |
| GM-BAN04 | 3319991 | 576021 | 8,85 | 63,6 | 36,28 | 708,72 | 74,17 | 11,99 | 16,93 | 77,75 |
| GM-BAN05 | 3319890 | 576020 | 8,7 | 95,7 | 29,15 | 597,00 | 61,26 | 11,37 | 21,98 | 52,08 |
| GM-BAN06 | 3319775 | 575997 | 9,01 | 84,0 | 30,03 | 708,13 | 72,39 | 16,84 | 20,59 | 60,27 |
| GM-BAN07 | 3319679 | 575976 | 8,53 | 78,3 | 41,13 | 570,43 | 88,80 | 12,89 | 30,10 | 64,60 |
| GM-BAN08 | 3319396 | 575883 | 8,21 | 289,0 | 36,92 | 593,66 | 65,89 | 19,40 | 17,70 | 62,58 |
| GM-BAN09 | 3319530 | 575874 | 8,17 | 145,6 | 36,70 | 567,04 | 86,66 | 17,43 | 28,84 | 65,46 |
| GM-BAN10 | 3319632 | 575895 | 8,43 | 97,4 | 38,79 | 559,58 | 76,55 | 13,24 | 22,68 | 72,68 |
| GM-BAN11 | 3319765 | 575903 | 8,61 | 85,5 | 32,86 | 676,14 | 63,27 | 8,50 | 17,31 | 56,22 |
| GM-BAN12 | 3319888 | 575869 | 8,4 | 100,1 | 28,84 | 567,86 | 150,49 | 11,65 | 23,28 | 62,21 |
| GM-BAN13 | 3320022 | 575857 | 8,49 | 79,7 | 26,36 | 524,59 | 70,21 | 20,90 | 20,32 | 50,79 |
| GM-BAN14 | 3320127 | 575859 | 7,64 | 129,1 | 44,04 | 604,58 | 77,37 | 13,75 | 23,22 | 57,83 |
| GM-BAN15 | 3320250 | 575851 | 8,22 | 118,2 | 33,70 | 617,62 | 65,87 | 12,80 | 19,59 | 74,95 |
| GM-BAN16 | 3320404 | 575885 | 7,59 | 236,0 | 33,49 | 501,79 | 84,46 | 10,35 | 19,26 | 48,64 |
| GM-BAN17 | 3320514 | 575843 | 7,34 | 334,0 | 46,66 | 652,18 | 86,16 | 13,65 | 18,88 | 74,19 |
| GM-BAN18 | 3320528 | 575669 | 7,73 | 139,6 | 27,22 | 314,18 | 34,56 | 8,33 | 17,74 | 63,97 |
| GM-BAN19 | 3320385 | 575674 | 7,51 | 191,8 | 35,51 | 387,83 | 81,44 | 12,86 | 47,31 | 56,90 |
| GM-BAN20 | 3320241 | 575684 | 7,4 | 242 | 46,37 | 389,32 | 106,04 | 18,94 | 141,78 | 82,87 |
| GM-BAN21 | 3320138 | 575690 | 7,69 | 286,0 | 30,95 | 331,63 | 74,27 | 11,13 | 27,38 | 50,50 |
| GM-BAN22 | 3319985 | 575708 | 9,61 | 656,0 | 35,26 | 355,16 | 63,72 | 12,32 | 26,74 | 65,88 |
| GM-BAN23 | 3319872 | 575707 | 7,58 | 409,0 | 36,95 | 421,70 | 97,79 | 16,28 | 125,09 | 66,63 |
| GM-BAN24 | 3319758 | 575709 | 7,72 | 385,0 | 42,67 | 429,85 | 92,18 | 10,33 | 32,20 | 60,50 |
| GM-BAN25 | 3319653 | 575710 | 7,63 | 275,0 | 37,89 | 402,99 | 63,45 | <LD | 64,75 | 69,58 |
| GM-BAN26 | 3319543 | 575716 | 7,58 | 249,0 | 28,49 | 321,97 | 98,81 | 11,30 | 44,30 | 51,92 |
| GM-BAN27 | 3319450 | 575721 | 8,12 | 89,4 | 41,80 | 529,75 | 119,65 | 15,67 | 41,90 | 67,51 |
| GM-BAN28 | 3319390 | 575521 | 7,82 | 186,7 | 42,19 | 556,75 | 100,48 | 18,39 | 27,76 | 70,92 |
| GM-BAN29 | 3319542 | 575529 | 7,76 | 197,8 | 35,34 | 753,84 | 98,78 | 24,21 | 24,27 | 64,96 |
| GM-BAN30 | 3319670 | 575548 | 8,03 | 246,0 | 47,81 | 404,03 | 267,93 | 16,11 | 35,11 | 61,40 |
| GM-BAN31 | 3319753 | 575540 | 7,26 | 1055,0 | 39,92 | 435,37 | 331,82 | 13,08 | 25,78 | 54,56 |
| GM-BAN32 | 3319876 | 575522 | 8,13 | 126,3 | 60,84 | 559,08 | 127,21 | 18,35 | 38,93 | 68,48 |
| GM-BAN33 | 3319965 | 575516 | 9,43 | 484,0 | 43,09 | 436,45 | 140,03 | 13,66 | 38,94 | 74,44 |
| GM-BAN34 | 3320117 | 575523 | 8,78 | 634,0 | 37,19 | 416,13 | 85,92 | 12,73 | 28,86 | 54,06 |
| GM-BAN35 | 3320239 | 575486 | 8,24 | 87,8 | 29,92 | 464,48 | 69,77 | 11,52 | 21,89 | 66,87 |
| GM-BAN36 | 3320365 | 575515 | 7,71 | 393,0 | 33,00 | 412,08 | 73,90 | 13,00 | 22,07 | 62,81 |
| GM-BAN37 | 3320484 | 575528 | 8,07 | 207,0 | 35,21 | 433,51 | 73,64 | 9,41 | 27,78 | 69,24 |
| GM-BAN38 | 3320499 | 575353 | 7,95 | 243,0 | 34,30 | 589,98 | 63,29 | 12,78 | 17,16 | 73,63 |
| GM-BAN39 | 3320389 | 575350 | 7,73 | 177,0 | 42,10 | 664,24 | 74,14 | 15,64 | 23,08 | 64,46 |
| GM-BAN40 | 3320279 | 575347 | 8,01 | 164,1 | 43,12 | 650,20 | 72,88 | 15,40 | 23,35 | 66,86 |
| GM-BAN41 | 3320170 | 575379 | 7,71 | 345,0 | 36,41 | 595,76 | 66,56 | 15,36 | 20,04 | 70,19 |
| GM-BAN42 | 3319486 | 575331 | 7,86 | 304,0 | 48,24 | 696,65 | 95,78 | 17,20 | 35,30 | 54,72 |
| GM-BAN43 | 3319899 | 575347 | 7,63 | 205,0 | 45,46 | 602,64 | 83,37 | 14,75 | 39,03 | 46,19 |
| GM-BAN44 | 3319781 | 575357 | 7,75 | 290,0 | 58,45 | 617,55 | 85,96 | 16,79 | 42,22 | 73,33 |
| GM-BAN45 | 3319658 | 575379 | 7,69 | 182,1 | 45,48 | 575,24 | 88,88 | 18,64 | 39,90 | 68,84 |
| GM-BAN46 | 3319493 | 575398 | 8,04 | 141,2 | 42,96 | 624,76 | 100,08 | 19,94 | 35,25 | 55,35 |
| GM-BAN47 | 3319397 | 575402 | 8,28 | 113,7 | 40,79 | 633,67 | 95,83 | 15,83 | 32,02 | 71,56 |
| Máximo | | | | | 60,84 | 753,84 | 331,82 | 24,21 | 141,78 | 86,94 |
| Mínimo | | | | | 26,36 | 314,18 | 34,56 | 8,33 | 16,19 | 46,19 |
| Promedio | | | | | 38,30 | 538,40 | 92,86 | 14,39 | 32,35 | 64,68 |
| STD | | | | | 7,38 | 122,12 | 49,30 | 3,42 | 23,83 | 9,07 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Elementos asociados al derrame en muestra <60 de suelos, localidad Banámichi, Sonora.

<LD = Menor a límite de detección, ND = No disponible.

| <60 | Elementos asociados a derrame | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|--------|------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | Clave | N | E | pH | C.E. (µS) | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr |
| GM-BAN01 | 3320408 | 576021 | 8,45 | 400,0 | 37,74 | 397,94 | 64,20 | 12,81 | 23,12 | 60,16 | |
| GM-BAN02 | 3320261 | 570024 | 9,17 | 106,3 | 31,41 | 577,12 | 68,08 | 12,05 | 17,52 | 62,69 | |
| GM-BAN03 | 3320129 | 576037 | 9,13 | 84,8 | 37,87 | 769,16 | 69,13 | 13,42 | 17,46 | 83,85 | |
| GM-BAN04 | 3319991 | 576021 | 8,85 | 63,6 | 36,71 | 660,95 | 62,99 | 12,03 | 16,38 | 72,31 | |
| GM-BAN05 | 3319890 | 576020 | 8,7 | 95,7 | 34,08 | 597,49 | 61,53 | 11,35 | 16,38 | 67,23 | |
| GM-BAN06 | 3319775 | 575997 | 9,01 | 84,0 | 30,12 | 703,87 | 71,93 | 18,94 | 20,49 | 51,74 | |
| GM-BAN07 | 3319679 | 575976 | 8,53 | 78,3 | 35,45 | 530,48 | 81,06 | 13,84 | 28,55 | 64,14 | |
| GM-BAN08 | 3319396 | 575883 | 8,21 | 289,0 | 38,96 | 661,80 | 83,35 | 15,90 | 18,26 | 58,28 | |
| GM-BAN09 | 3319530 | 575874 | 8,17 | 145,6 | 37,29 | 522,38 | 95,11 | 15,82 | 28,32 | 66,89 | |
| GM-BAN10 | 3319632 | 575895 | 8,43 | 97,4 | 36,12 | 519,82 | 73,08 | 14,50 | 22,12 | 55,15 | |
| GM-BAN11 | 3319765 | 575903 | 8,61 | 85,5 | 30,59 | 610,26 | 61,23 | 9,12 | 15,53 | 71,73 | |
| GM-BAN12 | 3319888 | 575869 | 8,4 | 100,1 | 32,98 | 566,54 | 114,15 | 17,20 | 20,49 | 47,18 | |
| GM-BAN13 | 3320022 | 575857 | 8,49 | 79,7 | 24,40 | 505,40 | 69,25 | 22,53 | 22,67 | 46,77 | |
| GM-BAN14 | 3320127 | 575859 | 7,64 | 129,1 | 44,62 | 744,57 | 88,80 | 16,96 | 34,06 | 90,19 | |
| GM-BAN15 | 3320250 | 575851 | 8,22 | 118,2 | 29,54 | 615,40 | 64,98 | 11,63 | 16,32 | 61,71 | |
| GM-BAN16 | 3320404 | 575885 | 7,59 | 236,0 | 33,00 | 510,30 | 96,86 | 12,99 | 20,01 | 45,88 | |
| GM-BAN17 | 3320514 | 575843 | 7,34 | 334,0 | 35,46 | 694,33 | 79,86 | 13,01 | 22,03 | 84,62 | |
| GM-BAN18 | 3320528 | 575669 | 7,73 | 139,6 | 22,35 | 373,89 | 41,86 | 9,74 | 23,53 | 56,69 | |
| GM-BAN19 | 3320385 | 575674 | 7,51 | 191,8 | 33,21 | 411,44 | 91,16 | 13,45 | 41,77 | 62,63 | |
| GM-BAN20 | 3320241 | 575684 | 7,4 | 242 | 94,07 | 369,26 | 98,40 | 10,93 | 159,01 | 67,30 | |
| GM-BAN21 | 3320138 | 575690 | 7,69 | 286,0 | 82,57 | 319,11 | 58,02 | 10,43 | 47,24 | 53,15 | |
| GM-BAN22 | 3319985 | 575708 | 9,61 | 656,0 | 32,18 | 388,50 | 64,35 | 13,53 | 40,69 | 52,24 | |
| GM-BAN23 | 3319872 | 575707 | 7,58 | 409,0 | 38,88 | 451,77 | 157,80 | 10,02 | 131,61 | 66,54 | |
| GM-BAN24 | 3319758 | 575709 | 7,72 | 385,0 | 39,11 | 415,38 | 120,31 | 14,51 | 43,23 | 44,68 | |
| GM-BAN25 | 3319653 | 575710 | 7,63 | 275,0 | 29,78 | 421,34 | 80,28 | 10,03 | 37,74 | 43,75 | |
| GM-BAN26 | 3319543 | 575716 | 7,58 | 249,0 | 32,91 | 397,30 | 70,48 | 11,78 | 54,88 | 53,01 | |
| GM-BAN27 | 3319450 | 575721 | 8,12 | 89,4 | 44,67 | 601,08 | 124,14 | 17,17 | 45,79 | 69,06 | |
| GM-BAN28 | 3319390 | 575521 | 7,82 | 186,7 | 39,41 | 853,73 | 104,62 | 20,79 | 32,16 | 61,03 | |
| GM-BAN29 | 3319542 | 575529 | 7,76 | 197,8 | 38,32 | 701,79 | 118,25 | 23,34 | 23,55 | 56,45 | |
| GM-BAN30 | 3319670 | 575548 | 8,03 | 246,0 | 37,85 | 399,35 | 383,15 | 16,28 | 28,29 | 47,01 | |
| GM-BAN31 | 3319753 | 575540 | 7,26 | 1055,0 | 27,55 | 376,75 | 378,19 | 13,97 | 28,54 | 48,76 | |
| GM-BAN32 | 3319876 | 575522 | 8,13 | 126,3 | 61,93 | 525,28 | 109,02 | 19,57 | 44,33 | 54,27 | |
| GM-BAN33 | 3319965 | 575516 | 9,43 | 484,0 | 49,36 | 461,87 | 150,00 | 14,82 | 49,95 | 70,60 | |
| GM-BAN34 | 3320117 | 575523 | 8,78 | 634,0 | 36,76 | 376,15 | 112,62 | 11,90 | 32,70 | 45,33 | |
| GM-BAN35 | 3320239 | 575486 | 8,24 | 87,8 | 24,64 | 453,64 | 89,58 | 13,85 | 26,67 | 65,58 | |
| GM-BAN36 | 3320365 | 575515 | 7,71 | 393,0 | 32,48 | 449,34 | 83,75 | 14,36 | 26,74 | 60,16 | |
| GM-BAN37 | 3320484 | 575528 | 8,07 | 207,0 | 36,63 | 483,37 | 86,88 | 11,64 | 24,86 | 73,74 | |
| GM-BAN38 | 3320499 | 575353 | 7,95 | 243,0 | 32,32 | 605,62 | 60,18 | 14,72 | 16,19 | 72,70 | |
| GM-BAN39 | 3320389 | 575350 | 7,73 | 177,0 | 35,98 | 618,10 | 66,93 | 16,63 | 22,10 | 50,97 | |
| GM-BAN40 | 3320279 | 575347 | 8,01 | 164,1 | 38,89 | 541,94 | 60,22 | 14,78 | 21,57 | 68,66 | |
| GM-BAN41 | 3320170 | 575379 | 7,71 | 345,0 | 45,82 | 583,45 | 79,97 | 16,54 | 29,85 | 50,31 | |
| GM-BAN42 | 3319486 | 575331 | 7,86 | 304,0 | 42,09 | 619,63 | 92,55 | 16,25 | 40,71 | 54,70 | |
| GM-BAN43 | 3319899 | 575347 | 7,63 | 205,0 | 45,73 | 642,89 | 102,17 | 19,95 | 47,34 | 59,45 | |
| GM-BAN44 | 3319781 | 575357 | 7,75 | 290,0 | 58,37 | 694,09 | 88,84 | 16,96 | 44,56 | 51,73 | |
| GM-BAN45 | 3319658 | 575379 | 7,69 | 182,1 | 44,65 | 546,07 | 91,37 | 16,18 | 38,59 | 59,61 | |
| GM-BAN46 | 3319493 | 575398 | 8,04 | 141,2 | 41,31 | 621,02 | 91,92 | 18,31 | 34,88 | 65,78 | |
| GM-BAN47 | 3319397 | 575402 | 8,28 | 113,7 | 41,58 | 616,84 | 93,97 | 17,76 | 29,61 | 71,61 | |
| Máximo | | | | | | 94,07 | 853,73 | 383,15 | 23,34 | 159,01 | 90,19 |
| Mínimo | | | | | | 22,35 | 319,11 | 41,86 | 9,12 | 15,53 | 43,75 |
| Promedio | | | | | | 39,31 | 542,72 | 99,08 | 14,77 | 34,65 | 60,60 |
| STD | | | | | | 12,95 | 124,09 | 64,43 | 3,34 | 26,02 | 10,97 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Elementos asociados al derrame en muestra <635 de suelos, localidad Banámichi, Sonora.

<LD = Menor a límite de detección, ND = No disponible.

| <635 | Elementos asociados a derrame | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|--------|------|--------|-----------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| | Clave | N | E | pH | C.E.(µS) | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr |
| GM-BAN01 | 3320408 | 576021 | 8,45 | 400,0 | 125,59 | 2483,16 | 278,71 | 36,45 | 56,83 | 149,43 | |
| GM-BAN02 | 3320261 | 570024 | 9,17 | 106,3 | 48,83 | 1825,61 | 160,46 | 16,44 | 31,95 | 118,88 | |
| GM-BAN03 | 3320129 | 576037 | 9,13 | 84,8 | 35,78 | 1788,42 | 134,66 | 13,81 | 25,42 | 102,89 | |
| GM-BAN04 | 3319991 | 576021 | 8,85 | 63,6 | 49,71 | 1030,38 | 123,33 | 14,80 | 25,43 | 98,03 | |
| GM-BAN05 | 3319890 | 576020 | 8,7 | 95,7 | 47,88 | 1050,74 | 129,64 | 15,42 | 27,03 | 97,26 | |
| GM-BAN06 | 3319775 | 575997 | 9,01 | 84,0 | 27,74 | 690,85 | 90,32 | 26,47 | 27,62 | 84,76 | |
| GM-BAN07 | 3319679 | 575976 | 8,53 | 78,3 | 160,43 | 2989,41 | 322,11 | 35,26 | 73,70 | 151,20 | |
| GM-BAN08 | 3319396 | 575883 | 8,21 | 289,0 | 144,50 | 3482,80 | 328,83 | 35,03 | 42,00 | 169,65 | |
| GM-BAN09 | 3319530 | 575874 | 8,17 | 145,6 | 85,60 | 2257,32 | 264,57 | 38,36 | 59,26 | 143,04 | |
| GM-BAN10 | 3319632 | 575895 | 8,43 | 97,4 | 117,84 | 2432,72 | 265,35 | 31,67 | 50,65 | 173,78 | |
| GM-BAN11 | 3319765 | 575903 | 8,61 | 85,5 | 62,20 | 2337,17 | 155,90 | 16,48 | 35,86 | 132,33 | |
| GM-BAN12 | 3319888 | 575869 | 8,4 | 100,1 | 166,07 | 3130,85 | 476,24 | 34,43 | 44,78 | 180,11 | |
| GM-BAN13 | 3320022 | 575857 | 8,49 | 79,7 | 30,91 | 1983,53 | 129,11 | 34,19 | 40,59 | 98,99 | |
| GM-BAN14 | 3320127 | 575859 | 7,64 | 129,1 | 134,57 | 2455,15 | 289,09 | 33,57 | 60,48 | 155,90 | |
| GM-BAN15 | 3320250 | 575851 | 8,22 | 118,2 | 52,16 | 980,20 | 124,03 | 18,62 | 26,74 | 126,17 | |
| GM-BAN16 | 3320404 | 575885 | 7,59 | 236,0 | 49,04 | 805,88 | 185,34 | 20,61 | 35,53 | 97,44 | |
| GM-BAN17 | 3320514 | 575843 | 7,34 | 334,0 | 51,08 | 1125,12 | 145,47 | 15,52 | 29,74 | 110,31 | |
| GM-BAN18 | 3320528 | 575669 | 7,73 | 139,6 | 57,32 | 1882,45 | 191,09 | 27,03 | 65,77 | 135,10 | |
| GM-BAN19 | 3320385 | 575674 | 7,51 | 191,8 | 90,18 | 1890,83 | 344,07 | 25,12 | 86,11 | 111,81 | |
| GM-BAN20 | 3320241 | 575684 | 7,4 | 242 | 79,41 | 574,51 | 219,26 | 23,73 | 141,55 | 101,99 | |
| GM-BAN21 | 3320138 | 575690 | 7,69 | 286,0 | 121,34 | 1725,04 | 286,79 | 28,00 | 98,63 | 151,35 | |
| GM-BAN22 | 3319985 | 575708 | 9,61 | 656,0 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | |
| GM-BAN23 | 3319872 | 575707 | 7,58 | 409,0 | 104,04 | 872,01 | 310,07 | 38,79 | 163,51 | 105,67 | |
| GM-BAN24 | 3319758 | 575709 | 7,72 | 385,0 | 226,07 | 2817,77 | 656,56 | 47,63 | 106,58 | 158,45 | |
| GM-BAN25 | 3319653 | 575710 | 7,63 | 275,0 | 95,87 | 2026,01 | 352,60 | 26,76 | 118,87 | 116,93 | |
| GM-BAN26 | 3319543 | 575716 | 7,58 | 249,0 | 205,59 | 2812,54 | 530,05 | 52,58 | 137,48 | 166,68 | |
| GM-BAN27 | 3319450 | 575721 | 8,12 | 89,4 | 204,80 | 3009,89 | 549,44 | 45,48 | 98,14 | 185,71 | |
| GM-BAN28 | 3319390 | 575521 | 7,82 | 186,7 | 40,37 | 630,66 | 133,05 | 22,50 | 37,52 | 90,58 | |
| GM-BAN29 | 3319542 | 575529 | 7,76 | 197,8 | 55,44 | 813,00 | 191,78 | 35,43 | 37,53 | 98,52 | |
| GM-BAN30 | 3319670 | 575548 | 8,03 | 246,0 | 159,39 | 1720,18 | 916,92 | 30,83 | 87,60 | 115,86 | |
| GM-BAN31 | 3319753 | 575540 | 7,26 | 1055,0 | 461,00 | 3300,32 | 1605,85 | 45,31 | 88,74 | 199,25 | |
| GM-BAN32 | 3319876 | 575522 | 8,13 | 126,3 | 85,23 | 650,39 | 217,32 | 24,16 | 72,65 | 89,97 | |
| GM-BAN33 | 3319965 | 575516 | 9,43 | 484,0 | 330,38 | 3550,52 | 796,44 | 53,92 | 130,30 | 183,62 | |
| GM-BAN34 | 3320117 | 575523 | 8,78 | 634,0 | 191,18 | 2493,24 | 562,72 | 43,62 | 91,11 | 156,75 | |
| GM-BAN35 | 3320239 | 575486 | 8,24 | 87,8 | 90,89 | 2281,79 | 284,65 | 30,25 | 74,25 | 145,87 | |
| GM-BAN36 | 3320365 | 575515 | 7,71 | 393,0 | 66,71 | 648,16 | 207,16 | 26,19 | 51,99 | 98,16 | |
| GM-BAN37 | 3320484 | 575528 | 8,07 | 207,0 | ND | ND | ND | ND | ND | ND | |
| GM-BAN38 | 3320499 | 575353 | 7,95 | 243,0 | 46,65 | 905,81 | 114,11 | 22,15 | 27,95 | 101,39 | |
| GM-BAN39 | 3320389 | 575350 | 7,73 | 177,0 | 187,38 | 3207,00 | 287,38 | 36,23 | 43,62 | 190,50 | |
| GM-BAN40 | 3320279 | 575347 | 8,01 | 164,1 | 47,44 | 806,03 | 112,57 | 25,29 | 28,04 | 95,08 | |
| GM-BAN41 | 3320170 | 575379 | 7,71 | 345,0 | 77,53 | 2251,76 | 195,83 | 28,83 | 55,07 | 129,45 | |
| GM-BAN42 | 3319486 | 575331 | 7,86 | 304,0 | 102,64 | 2307,53 | 242,61 | 35,02 | 84,18 | 143,95 | |
| GM-BAN43 | 3319899 | 575347 | 7,63 | 205,0 | 68,92 | 869,23 | 132,65 | 23,28 | 66,19 | 90,99 | |
| GM-BAN44 | 3319781 | 575357 | 7,75 | 290,0 | 72,50 | 940,49 | 154,55 | 29,70 | 69,60 | 104,55 | |
| GM-BAN45 | 3319658 | 575379 | 7,69 | 182,1 | 62,30 | 809,44 | 152,20 | 29,56 | 65,89 | 108,04 | |
| GM-BAN46 | 3319493 | 575398 | 8,04 | 141,2 | 68,50 | 888,53 | 152,75 | 27,28 | 54,70 | 100,05 | |
| GM-BAN47 | 3319397 | 575402 | 8,28 | 113,7 | 52,53 | 899,31 | 140,62 | 23,24 | 47,86 | 91,47 | |
| Máximo | | | | | | 461,00 | 3550,52 | 1605,85 | 53,92 | 163,51 | 199,25 |
| Mínimo | | | | | | 27,74 | 574,51 | 90,32 | 13,81 | 25,42 | 84,76 |
| Promedio | | | | | | 107,59 | 1787,42 | 303,21 | 29,89 | 65,00 | 127,95 |
| STD | | | | | | 83,07 | 926,62 | 270,87 | 9,92 | 34,86 | 32,84 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Elementos asociados al derrame en muestra total de suelos, localidad Huépac, Sonora. <LD

= Menor a límite de detección, ND = No disponible.

| MT | Elementos asociados al derrame | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|--------|------|---------|-----------|---------|---------|--------|--------|--------|-------|
| | Clave | N | E | pH | C.E. (µS) | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr |
| GM-HUE01 | 3309807 | 576297 | 7,5 | 85 | 33,45 | 916,08 | 78,52 | 22,56 | 31,97 | 56,09 | |
| GM-HUE02 | 3309637 | 576301 | 7,05 | 60,8 | 27,11 | 441,61 | 60,66 | 13,18 | 20,97 | 51,89 | |
| GM-HUE03 | 3309540 | 576279 | 7,97 | 107,3 | 24,05 | 353,13 | 42,38 | 10,68 | 19,48 | 36,88 | |
| GM-HUE04 | 3309435 | 576282 | 7,86 | 128 | 32,09 | 572,16 | 63,14 | 9,99 | 19,05 | 63,64 | |
| GM-HUE05 | 3309292 | 576289 | 7,51 | 44,6 | 37,41 | 590,43 | 81,29 | 21,00 | 38,57 | 50,15 | |
| GM-HUE06 | 3309174 | 576317 | 7,84 | 65,1 | 46,18 | 920,42 | 113,31 | 28,93 | 46,36 | 56,01 | |
| GM-HUE07 | 3309173 | 576145 | 7,78 | 317 | 33,47 | 533,34 | 102,18 | 14,84 | 43,96 | 43,96 | |
| GM-HUE08 | 3309299 | 576164 | 7,97 | 113,5 | 30,75 | 635,77 | 63,88 | 17,59 | 33,96 | 54,14 | |
| GM-HUE09 | 3309418 | 576163 | 8,31 | 137,3 | 28,14 | 318,93 | 36,31 | 16,06 | 20,27 | 38,21 | |
| GM-HUE10 | 3309537 | 576148 | 8,44 | 180,5 | 19,58 | 406,15 | 45,68 | 9,29 | 27,33 | 35,93 | |
| GM-HUE11 | 3309687 | 576148 | 8,48 | 139,8 | 31,00 | 708,96 | 104,35 | 17,62 | 34,69 | 51,61 | |
| GM-HUE12 | 3309825 | 576162 | 8,46 | 149 | 27,46 | 624,41 | 65,77 | 17,87 | 40,06 | 53,69 | |
| GM-HUE13 | 3309834 | 576081 | 8,24 | 93,4 | 45,94 | 561,39 | 82,72 | 20,66 | 27,87 | 57,01 | |
| GM-HUE14 | 3309675 | 576069 | 8,25 | 204 | 54,83 | 535,34 | 83,43 | 17,94 | 30,95 | 63,30 | |
| GM-HUE15 | 3309542 | 576068 | 8,51 | 118,7 | 44,88 | 658,94 | 94,43 | 21,83 | 35,21 | 50,10 | |
| GM-HUE16 | 3309423 | 576066 | 8,57 | 109,4 | 42,46 | 525,08 | 78,50 | 19,00 | 31,73 | 41,11 | |
| GM-HUE17 | 3309337 | 576075 | 8,34 | 121,5 | 31,24 | 458,43 | 69,76 | 17,61 | 31,92 | 49,10 | |
| GM-HUE18 | 3309188 | 576067 | 8,08 | 135,3 | 31,48 | 438,58 | 76,60 | 14,25 | 47,98 | 44,07 | |
| GM-HUE19 | 3309028 | 576048 | 8,32 | 144 | 48,16 | 487,57 | 80,36 | 17,99 | 28,34 | 64,02 | |
| GM-HUE20 | 3308874 | 576043 | 8,54 | 74,6 | 26,98 | 432,60 | 49,93 | 19,49 | 28,41 | 41,83 | |
| GM-HUE21 | 3308858 | 575971 | 8,51 | 109,7 | 30,70 | 555,30 | 132,32 | 14,58 | 36,80 | 52,35 | |
| GM-HUE22 | 3309019 | 575983 | 8,44 | 245 | 42,57 | 643,83 | 146,50 | 20,34 | 50,75 | 49,90 | |
| GM-HUE23 | 3309159 | 575980 | 7,74 | 1383 | 37,48 | 692,22 | 110,70 | 18,88 | 37,48 | 43,84 | |
| GM-HUE24 | 3309298 | 575996 | 8,45 | 124,7 | 32,69 | 436,02 | 140,32 | 18,48 | 83,27 | 42,84 | |
| GM-HUE25 | 3309408 | 575977 | 8,63 | 244 | 34,38 | 685,17 | 166,27 | 18,54 | 71,88 | 40,06 | |
| GM-HUE26 | 3309527 | 575960 | 7,76 | 158,8 | 31,69 | 658,44 | 77,85 | 16,30 | 39,50 | 58,62 | |
| GM-HUE27 | 3309666 | 575996 | 8,17 | 113,4 | 46,46 | 747,97 | 118,00 | 25,18 | 45,40 | 46,23 | |
| GM-HUE28 | 3309810 | 576004 | 7,87 | 78,4 | 20,17 | 436,42 | 60,33 | 11,47 | 25,06 | 27,10 | |
| GM-HUE29 | 3309867 | 575841 | 6,91 | 44,2 | 32,08 | 950,20 | 80,13 | 19,57 | 30,55 | 53,59 | |
| GM-HUE30 | 3309678 | 575850 | 7,68 | 154,2 | 27,77 | 422,18 | 95,76 | 11,66 | 36,79 | 46,26 | |
| GM-HUE31 | 3309535 | 575834 | 7,99 | 229 | 33,38 | 1143,73 | 102,41 | 11,07 | 39,61 | 43,35 | |
| GM-HUE32 | 3309398 | 575884 | 8,08 | 310 | 18,25 | 307,10 | 43,20 | 4,42 | 23,72 | 22,23 | |
| GM-HUE33 | 3309319 | 575817 | 8,39 | 262 | 29,26 | 361,98 | 65,42 | 13,04 | 38,72 | 32,11 | |
| GM-HUE34 | 3309180 | 575848 | 8,12 | 294 | 29,59 | 553,56 | 98,28 | 7,99 | 38,37 | 35,72 | |
| GM-HUE35 | 3309023 | 575859 | 8,58 | 130,8 | 38,48 | 463,92 | 59,90 | 11,27 | 42,30 | 37,71 | |
| GM-HUE36 | 3308860 | 575874 | 7,9 | 1117 | 32,76 | 447,78 | 110,30 | 10,07 | 68,03 | 39,95 | |
| GM-HUE37 | 3308876 | 575751 | 8,01 | 440,5 | 37,17 | 492,43 | 76,45 | 12,45 | 31,26 | 56,72 | |
| GM-HUE38 | 3309020 | 575754 | 8,32 | 225 | 49,37 | 605,64 | 235,08 | 19,96 | 373,11 | 52,52 | |
| GM-HUE39 | 3309196 | 575779 | 8,39 | 200,5 | 40,66 | 617,20 | 235,98 | 17,12 | 348,92 | 45,19 | |
| GM-HUE40 | 3309304 | 575768 | 7,99 | 595 | 36,46 | 574,45 | 94,90 | 14,39 | 41,86 | 47,31 | |
| GM-HUE41 | 3309432 | 575778 | 8,19 | 459 | 50,20 | 718,86 | 183,95 | 21,98 | 39,87 | 53,63 | |
| GM-HUE42 | 3309538 | 575775 | 8,36 | 290 | 41,84 | 753,77 | 90,80 | 9,91 | 122,82 | 47,38 | |
| GM-HUE43 | 3309694 | 575782 | 8,01 | 245 | 35,39 | 578,57 | 73,66 | 17,19 | 34,61 | 52,01 | |
| GM-HUE44 | 3309784 | 575803 | 7,73 | 132,2 | 31,63 | 580,92 | 58,73 | 19,46 | 26,79 | 50,16 | |
| GM-HUE45 | 3309801 | 575649 | 7,79 | 507 | 29,25 | 579,72 | 77,05 | 17,69 | 34,64 | 45,08 | |
| GM-HUE46 | 3309349 | 575630 | 8,05 | 352 | 54,16 | 1188,28 | 108,10 | 27,97 | 164,88 | 39,49 | |
| GM-HUE47 | 3309483 | 575650 | 7,98 | 1034 | 44,52 | 713,94 | 111,70 | 22,53 | 51,64 | 45,40 | |
| GM-HUE48 | 3309591 | 575642 | 8,34 | 210 | 33,42 | 605,48 | 80,69 | 20,92 | 34,36 | 56,40 | |
| GM-HUE49 | 3309162 | 575669 | 7,7 | 902 | 41,86 | 425,96 | 106,44 | 19,34 | 75,48 | 44,89 | |
| GM-HUE50 | 3308968 | 575640 | 8,14 | 154,9 | 39,40 | 534,20 | 151,09 | 14,14 | 45,56 | 42,66 | |
| GM-HUE51 | 3308895 | 575688 | 8,13 | 2.52 mS | 35,01 | 635,45 | 103,18 | 22,26 | 42,64 | 50,01 | |
| Máximo | | | | | | 54,83 | 1188,28 | 235,98 | 28,93 | 373,11 | 64,02 |
| Mínimo | | | | | | 18,25 | 307,10 | 36,31 | 4,42 | 19,05 | 22,23 |
| Promedio | | | | | | 35,58 | 592,75 | 95,46 | 16,83 | 55,21 | 47,13 |
| STD | | | | | | 8,46 | 184,63 | 42,42 | 5,04 | 67,22 | 8,76 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Elementos asociados al derrame en muestra <60 de suelos, localidad Huépac, Sonora. <LD

= Menor a límite de detección, ND = No disponible.

| <60 | Elementos asociados al derrame | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|--------|------|---------|-----------|---------|---------|--------|--------|--------|-------|
| | Clave | N | E | pH | C.E. (µS) | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr |
| GM-HUE01 | 3309807 | 576297 | 7,5 | 85 | 38,62 | 843,06 | 82,39 | 24,38 | 44,50 | 62,01 | |
| GM-HUE02 | 3309637 | 576301 | 7,05 | 60,8 | 33,19 | 571,13 | 75,11 | 16,94 | 31,82 | 53,36 | |
| GM-HUE03 | 3309540 | 576279 | 7,97 | 107,3 | 42,27 | 620,28 | 71,48 | 19,69 | 31,61 | 68,71 | |
| GM-HUE04 | 3309435 | 576282 | 7,86 | 128 | 40,21 | 571,98 | 82,49 | 16,36 | 28,12 | 59,26 | |
| GM-HUE05 | 3309292 | 576289 | 7,51 | 44,6 | 37,11 | 679,18 | 87,09 | 23,51 | 41,38 | 48,27 | |
| GM-HUE06 | 3309174 | 576317 | 7,84 | 65,1 | 43,96 | 763,50 | 122,17 | 27,72 | 46,42 | 47,15 | |
| GM-HUE07 | 3309173 | 576145 | 7,78 | 317 | 44,46 | 662,81 | 145,60 | 21,08 | 57,59 | 52,11 | |
| GM-HUE08 | 3309299 | 576164 | 7,97 | 113,5 | 38,77 | 748,29 | 95,07 | 20,08 | 36,46 | 64,85 | |
| GM-HUE09 | 3309418 | 576163 | 8,31 | 137,3 | 43,06 | 491,92 | 82,42 | 17,05 | 28,03 | 63,32 | |
| GM-HUE10 | 3309537 | 576148 | 8,44 | 180,5 | 38,28 | 642,52 | 115,50 | 20,21 | 39,54 | 56,13 | |
| GM-HUE11 | 3309687 | 576148 | 8,48 | 139,8 | 38,91 | 750,73 | 157,96 | 24,10 | 37,34 | 69,97 | |
| GM-HUE12 | 3309825 | 576162 | 8,46 | 149 | 35,67 | 743,95 | 110,19 | 23,51 | 39,47 | 59,34 | |
| GM-HUE13 | 3309834 | 576081 | 8,24 | 93,4 | 50,39 | 667,80 | 93,72 | 40,99 | 29,84 | 60,59 | |
| GM-HUE14 | 3309675 | 576069 | 8,25 | 204,0 | 56,21 | 654,71 | 91,36 | 19,83 | 31,50 | 57,17 | |
| GM-HUE15 | 3309542 | 576068 | 8,51 | 118,7 | 44,26 | 747,78 | 121,78 | 24,96 | 43,67 | 50,84 | |
| GM-HUE16 | 3309423 | 576066 | 8,57 | 109,4 | 48,78 | 605,62 | 97,22 | 22,72 | 34,10 | 61,29 | |
| GM-HUE17 | 3309337 | 576075 | 8,34 | 121,5 | 37,78 | 596,26 | 97,93 | 14,76 | 37,96 | 46,58 | |
| GM-HUE18 | 3309188 | 576067 | 8,08 | 135,3 | 34,17 | 480,75 | 91,63 | 10,59 | 54,15 | 45,38 | |
| GM-HUE19 | 3309028 | 576048 | 8,32 | 144,0 | 56,20 | 603,28 | 87,08 | 21,11 | 27,90 | 59,70 | |
| GM-HUE20 | 3308874 | 576043 | 8,54 | 74,6 | 37,52 | 639,67 | 88,67 | 20,51 | 37,10 | 48,59 | |
| GM-HUE21 | 3308858 | 575971 | 8,51 | 109,7 | 43,76 | 924,26 | 162,33 | 25,40 | 53,60 | 70,89 | |
| GM-HUE22 | 3309019 | 575983 | 8,44 | 245,0 | 48,44 | 782,57 | 152,27 | 25,31 | 50,59 | 59,89 | |
| GM-HUE23 | 3309159 | 575980 | 7,74 | 1383,0 | 50,12 | 745,77 | 128,13 | 23,00 | 51,49 | 79,51 | |
| GM-HUE24 | 3309298 | 575996 | 8,45 | 124,7 | 45,08 | 596,75 | 212,49 | 21,84 | 70,05 | 58,10 | |
| GM-HUE25 | 3309408 | 575977 | 8,63 | 244,0 | 45,32 | 732,90 | 253,49 | 27,71 | 88,80 | 52,59 | |
| GM-HUE26 | 3309527 | 575960 | 7,76 | 158,8 | 37,78 | 721,50 | 115,73 | 20,10 | 44,69 | 54,69 | |
| GM-HUE27 | 3309666 | 575996 | 8,17 | 113,4 | 49,42 | 762,66 | 140,18 | 27,17 | 43,68 | 52,78 | |
| GM-HUE28 | 3309810 | 576004 | 7,87 | 78,4 | 39,55 | 809,42 | 103,16 | 25,36 | 42,90 | 58,41 | |
| GM-HUE29 | 3309867 | 575841 | 6,91 | 44,2 | 34,79 | 855,10 | 87,07 | 25,15 | 38,09 | 59,39 | |
| GM-HUE30 | 3309678 | 575850 | 7,68 | 154,2 | 43,20 | 1072,89 | 170,81 | 20,93 | 59,97 | 67,94 | |
| GM-HUE31 | 3309535 | 575834 | 7,99 | 229 | 39,65 | 657,55 | 127,05 | 13,05 | 49,58 | 47,43 | |
| GM-HUE32 | 3309398 | 575884 | 8,08 | 310 | 34,74 | 511,34 | 98,15 | 10,17 | 39,22 | 48,40 | |
| GM-HUE33 | 3309319 | 575817 | 8,39 | 262 | 48,03 | 518,28 | 137,13 | 21,63 | 94,86 | 59,01 | |
| GM-HUE34 | 3309180 | 575848 | 8,12 | 294 | 32,04 | 570,37 | 92,22 | 9,66 | 38,85 | 45,14 | |
| GM-HUE35 | 3309023 | 575859 | 8,58 | 130,8 | 63,85 | 692,36 | 130,69 | 23,68 | 57,26 | 54,16 | |
| GM-HUE36 | 3308860 | 575874 | 7,9 | 1117 | 44,71 | 711,64 | 153,66 | 20,07 | 71,56 | 73,26 | |
| GM-HUE37 | 3308876 | 575751 | 8,01 | 440,5 | 50,40 | 871,19 | 160,26 | 20,93 | 96,42 | 65,50 | |
| GM-HUE38 | 3309020 | 575754 | 8,32 | 225 | 73,14 | 631,02 | 282,29 | 28,27 | 500,65 | 66,19 | |
| GM-HUE39 | 3309196 | 575779 | 8,39 | 200,5 | 58,76 | 742,07 | 276,74 | 20,13 | 118,60 | 59,24 | |
| GM-HUE40 | 3309304 | 575768 | 7,99 | 595 | 59,29 | 676,89 | 136,98 | 20,17 | 50,19 | 56,37 | |
| GM-HUE41 | 3309432 | 575778 | 8,19 | 459 | 55,88 | 687,53 | 156,03 | 23,79 | 47,28 | 62,69 | |
| GM-HUE42 | 3309538 | 575775 | 8,36 | 290 | 46,54 | 760,58 | 131,58 | 23,88 | 56,74 | 58,31 | |
| GM-HUE43 | 3309694 | 575782 | 8,01 | 245 | 44,61 | 806,24 | 133,51 | 23,76 | 48,55 | 53,83 | |
| GM-HUE44 | 3309784 | 575803 | 7,73 | 132,2 | 33,13 | 716,40 | 86,93 | 23,77 | 34,57 | 55,50 | |
| GM-HUE45 | 3309801 | 575649 | 7,79 | 507 | 34,18 | 650,16 | 104,71 | 21,90 | 40,09 | 43,16 | |
| GM-HUE46 | 3309349 | 575630 | 8,05 | 352 | 54,85 | 659,58 | 114,91 | 22,48 | 233,53 | 57,31 | |
| GM-HUE47 | 3309483 | 575650 | 7,98 | 1034 | 46,04 | 698,74 | 116,75 | 22,81 | 58,01 | 57,75 | |
| GM-HUE48 | 3309591 | 575642 | 8,34 | 210 | 41,99 | 731,46 | 100,30 | 21,48 | 40,38 | 52,55 | |
| GM-HUE49 | 3309162 | 575669 | 7,7 | 902 | 43,62 | 589,33 | 168,21 | 18,68 | 89,65 | 46,46 | |
| GM-HUE50 | 3308968 | 575640 | 8,14 | 154,9 | 46,95 | 643,65 | 188,02 | 18,87 | 71,93 | 41,50 | |
| GM-HUE51 | 3308895 | 575688 | 8,13 | 2.52 mS | 44,60 | 826,47 | 132,80 | 27,36 | 56,33 | 63,46 | |
| Máximo | | | | | | 73,14 | 1072,89 | 282,29 | 40,99 | 500,65 | 79,51 |
| Mínimo | | | | | | 32,04 | 480,75 | 71,48 | 9,66 | 27,90 | 41,50 |
| Promedio | | | | | | 44,59 | 694,94 | 128,46 | 21,74 | 62,68 | 57,18 |
| STD | | | | | | 8,51 | 112,25 | 47,76 | 5,10 | 70,33 | 8,15 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Elementos asociados al derrame en muestra <635 de suelos, localidad Huépac, Sonora.

<LD = Menor a límite de detección, ND = No disponible.

| <635 | Elementos asociados al derrame | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|--------|------|---------|-----------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | Clave | N | E | pH | C.E. (µS) | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr |
| GM-HUE01 | 3309807 | 576297 | 7,5 | 85 | 49,76 | 1027,08 | 156,27 | 33,06 | 56,79 | 88,39 | |
| GM-HUE02 | 3309637 | 576301 | 7,05 | 60,8 | 45,88 | 662,30 | 134,09 | 23,27 | 46,73 | 97,38 | |
| GM-HUE03 | 3309540 | 576279 | 7,97 | 107,3 | 41,22 | 682,46 | 116,78 | 23,86 | 38,24 | 82,13 | |
| GM-HUE04 | 3309435 | 576282 | 7,86 | 128 | 149,99 | 5397,14 | 512,83 | 76,20 | 152,70 | 326,75 | |
| GM-HUE05 | 3309292 | 576289 | 7,51 | 44,6 | 44,96 | 766,50 | 135,75 | 28,97 | 61,78 | 72,74 | |
| GM-HUE06 | 3309174 | 576317 | 7,84 | 65,1 | 49,11 | 778,77 | 164,17 | 35,29 | 63,11 | 72,04 | |
| GM-HUE07 | 3309173 | 576145 | 7,78 | 317 | 50,65 | 752,53 | 206,23 | 28,98 | 94,41 | 81,00 | |
| GM-HUE08 | 3309299 | 576164 | 7,97 | 113,5 | 44,96 | 897,52 | 148,12 | 29,03 | 50,67 | 95,99 | |
| GM-HUE09 | 3309418 | 576163 | 8,31 | 137,3 | 90,40 | 1984,74 | 241,71 | 35,38 | 69,05 | 113,48 | |
| GM-HUE10 | 3309537 | 576148 | 8,44 | 180,5 | 57,28 | 792,39 | 170,24 | 29,53 | 57,68 | 80,69 | |
| GM-HUE11 | 3309687 | 576148 | 8,48 | 139,8 | 51,69 | 956,36 | 257,16 | 29,23 | 61,67 | 88,01 | |
| GM-HUE12 | 3309825 | 576162 | 8,46 | 149 | 45,29 | 2061,43 | 224,25 | 30,90 | 65,74 | 112,94 | |
| GM-HUE13 | 3309834 | 576081 | 8,24 | 93,4 | 54,97 | 666,34 | 125,74 | 27,14 | 42,42 | 87,06 | |
| GM-HUE14 | 3309675 | 576069 | 8,25 | 204,0 | 58,72 | 611,53 | 117,83 | 25,52 | 38,10 | 90,84 | |
| GM-HUE15 | 3309542 | 576068 | 8,51 | 118,7 | 41,96 | 829,60 | 145,45 | 29,40 | 57,64 | 76,08 | |
| GM-HUE16 | 3309423 | 576066 | 8,57 | 109,4 | 52,85 | 715,10 | 120,03 | 25,81 | 46,23 | 84,78 | |
| GM-HUE17 | 3309337 | 576075 | 8,34 | 121,5 | 48,13 | 770,18 | 158,35 | 29,84 | 54,24 | 88,34 | |
| GM-HUE18 | 3309188 | 576067 | 8,08 | 135,3 | 46,06 | 630,48 | 166,11 | 22,69 | 92,26 | 86,61 | |
| GM-HUE19 | 3309028 | 576048 | 8,32 | 144,0 | 54,78 | 679,52 | 117,62 | 25,94 | 38,79 | 91,53 | |
| GM-HUE20 | 3308874 | 576043 | 8,54 | 74,6 | 49,95 | 2176,50 | 209,89 | 34,19 | 78,77 | 97,94 | |
| GM-HUE21 | 3308858 | 575971 | 8,51 | 109,7 | 61,42 | 890,95 | 284,78 | 37,15 | 105,65 | 84,23 | |
| GM-HUE22 | 3309019 | 575983 | 8,44 | 245,0 | 43,83 | 664,28 | 179,91 | 28,60 | 63,22 | 66,63 | |
| GM-HUE23 | 3309159 | 575980 | 7,74 | 1383,0 | 64,67 | 968,35 | 230,85 | 34,01 | 89,76 | 76,97 | |
| GM-HUE24 | 3309298 | 575996 | 8,45 | 124,7 | 80,59 | 2057,64 | 641,66 | 34,96 | 119,26 | 109,28 | |
| GM-HUE25 | 3309408 | 575977 | 8,63 | 244,0 | 52,33 | 704,79 | 290,16 | 33,44 | 115,62 | 79,49 | |
| GM-HUE26 | 3309527 | 575960 | 7,76 | 158,8 | 87,60 | 2510,94 | 339,25 | 38,09 | 103,07 | 127,73 | |
| GM-HUE27 | 3309666 | 575996 | 8,17 | 113,4 | 45,54 | 769,98 | 174,01 | 29,19 | 59,68 | 75,59 | |
| GM-HUE28 | 3309810 | 576004 | 7,87 | 78,4 | 47,48 | 729,52 | 156,40 | 27,39 | 55,91 | 85,30 | |
| GM-HUE29 | 3309867 | 575841 | 6,91 | 44,2 | 53,24 | 1016,09 | 154,79 | 30,74 | 59,17 | 97,92 | |
| GM-HUE30 | 3309678 | 575850 | 7,68 | 154,2 | 54,66 | 1641,22 | 390,79 | 27,53 | 100,71 | 99,01 | |
| GM-HUE31 | 3309535 | 575834 | 7,99 | 229 | 49,32 | 890,66 | 168,71 | 20,75 | 69,88 | 77,63 | |
| GM-HUE32 | 3309398 | 575884 | 8,08 | 310 | 77,67 | 2233,54 | 347,81 | 29,45 | 97,46 | 104,87 | |
| GM-HUE33 | 3309319 | 575817 | 8,39 | 262 | 255,30 | 3011,67 | 875,13 | 74,37 | 230,54 | 137,11 | |
| GM-HUE34 | 3309180 | 575848 | 8,12 | 294 | 53,26 | 908,14 | 217,69 | 21,65 | 76,42 | 90,80 | |
| GM-HUE35 | 3309023 | 575859 | 8,58 | 130,8 | 315,19 | 3141,71 | 711,40 | 146,14 | 164,82 | 154,68 | |
| GM-HUE36 | 3308860 | 575874 | 7,9 | 1117 | 49,74 | 676,80 | 224,63 | 28,80 | 96,34 | 82,96 | |
| GM-HUE37 | 3308876 | 575751 | 8,01 | 440,5 | 75,55 | 2062,14 | 371,79 | 34,01 | 118,37 | 97,43 | |
| GM-HUE38 | 3309020 | 575754 | 8,32 | 225 | 63,98 | 704,47 | 460,03 | 23,65 | 733,62 | 68,72 | |
| GM-HUE39 | 3309196 | 575779 | 8,39 | 200,5 | 61,72 | 1618,40 | 553,30 | 19,65 | 136,60 | 61,06 | |
| GM-HUE40 | 3309304 | 575768 | 7,99 | 595 | 57,47 | 677,80 | 189,49 | 24,21 | 65,41 | 73,97 | |
| GM-HUE41 | 3309432 | 575778 | 8,19 | 459 | 237,35 | 3302,68 | 628,35 | 51,15 | 87,89 | 157,67 | |
| GM-HUE42 | 3309538 | 575775 | 8,36 | 290 | 77,55 | 934,08 | 251,28 | 38,04 | 107,99 | 81,14 | |
| GM-HUE43 | 3309694 | 575782 | 8,01 | 245 | 42,17 | 791,91 | 190,64 | 30,56 | 68,61 | 81,24 | |
| GM-HUE44 | 3309784 | 575803 | 7,73 | 132,2 | 48,59 | 963,56 | 159,35 | 31,38 | 54,26 | 82,32 | |
| GM-HUE45 | 3309801 | 575649 | 7,79 | 507 | 41,64 | 2152,64 | 215,91 | 26,74 | 71,15 | 105,14 | |
| GM-HUE46 | 3309349 | 575630 | 8,05 | 352 | 62,96 | 785,72 | 170,65 | 32,95 | 262,18 | 75,82 | |
| GM-HUE47 | 3309483 | 575650 | 7,98 | 1034 | 57,86 | 861,52 | 172,69 | 32,58 | 78,77 | 77,36 | |
| GM-HUE48 | 3309591 | 575642 | 8,34 | 210 | 37,04 | 741,11 | 126,88 | 26,65 | 46,53 | 71,58 | |
| GM-HUE49 | 3309162 | 575669 | 7,7 | 902 | 68,39 | 1888,44 | 498,53 | 34,99 | 271,13 | 96,46 | |
| GM-HUE50 | 3308968 | 575640 | 8,14 | 154,9 | 57,57 | 760,00 | 334,90 | 28,13 | 112,92 | 73,33 | |
| GM-HUE51 | 3308895 | 575688 | 8,13 | 2.52 mS | 75,37 | 2306,21 | 300,65 | 30,73 | 79,46 | 100,86 | |
| Máximo | | | | | | 315,19 | 5397,14 | 875,13 | 146,14 | 733,62 | 326,75 |
| Mínimo | | | | | | 37,04 | 611,53 | 19,65 | 38,10 | 61,06 | |
| Promedio | | | | | | 70,31 | 1317,75 | 267,47 | 33,96 | 101,36 | 95,47 |
| STD | | | | | | 53,96 | 940,91 | 171,62 | 19,08 | 103,74 | 38,59 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Elementos asociados al derrame en muestra total de suelos, localidad Baviácora, Sonora.

<LD = Menor a límite de detección, ND = No disponible.

| MT | Elementos asociados al derrame | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|--------|-------|--------|-----------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | Clave | N | E | pH | C.E. (µS) | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr |
| GM-BAV01 | 3287582 | 581388 | 8,36 | 422,0 | 51,69 | 486,19 | 73,77 | 19,66 | 32,84 | 70,48 | |
| GM-BAV02 | 3287526 | 581402 | 8,42 | 280,0 | 48,91 | 591,66 | 83,28 | 19,42 | 29,35 | 76,36 | |
| GM-BAV03 | 3287383 | 581434 | 8,49 | 105,2 | 25,79 | 523,43 | 59,35 | 10,73 | 22,64 | 66,61 | |
| GM-BAV04 | 3287250 | 581436 | 7,72 | 75,8 | 42,15 | 649,74 | 97,15 | 21,29 | 28,40 | 57,62 | |
| GM-BAV05 | 3287053 | 581423 | 8,60 | 94,7 | 36,99 | 435,36 | 61,94 | 16,43 | 20,69 | 52,57 | |
| GM-BAV06 | 3286931 | 581426 | 8,06 | 368,0 | 46,00 | 706,72 | 94,40 | 16,29 | 28,73 | 71,87 | |
| GM-BAV07 | 3286798 | 581435 | 8,03 | 165,4 | 40,68 | 529,54 | 72,92 | 17,98 | 26,28 | 69,44 | |
| GM-BAV08 | 3286726 | 581314 | 8,36 | 126,2 | 49,82 | 447,22 | 125,81 | 22,31 | 29,90 | 54,48 | |
| GM-BAV09 | 3286912 | 581326 | 9,10 | 354,0 | 61,40 | 397,74 | 118,23 | 17,34 | 29,40 | 54,47 | |
| GM-BAV10 | 3287026 | 581291 | 7,77 | 342,0 | 45,50 | 472,43 | 110,47 | 18,70 | 25,74 | 56,80 | |
| GM-BAV11 | 3287198 | 581281 | 8,40 | 79,0 | 43,73 | 778,47 | 62,69 | 16,06 | 29,78 | 71,50 | |
| GM-BAV12 | 3287351 | 581299 | 8,22 | 140,9 | 41,45 | 628,50 | 112,39 | 18,58 | 30,18 | 54,98 | |
| GM-BAV13 | 3287448 | 581312 | 8,93 | 210,0 | 46,72 | 453,46 | 74,44 | 17,34 | 47,99 | 53,94 | |
| GM-BAV14 | 3287599 | 581269 | 8,25 | 79,0 | 47,82 | 775,95 | 82,09 | 17,28 | 24,73 | 59,43 | |
| GM-BAV15 | 3287818 | 581065 | 8,23 | 175,9 | 68,72 | 651,31 | 97,21 | 20,93 | 45,47 | 66,28 | |
| GM-BAV16 | 3287711 | 581116 | 8,18 | 184,0 | 44,83 | 598,60 | 100,87 | 17,75 | 24,47 | 79,83 | |
| GM-BAV17 | 3287572 | 581154 | 8,21 | 324,0 | 53,18 | 660,42 | 125,50 | 23,88 | 28,71 | 56,45 | |
| GM-BAV18 | 3287320 | 581158 | 8,05 | 235,0 | 26,40 | 290,30 | 29,82 | 8,59 | 12,70 | 35,32 | |
| GM-BAV19 | 3287165 | 581139 | 7,66 | 223,0 | 52,37 | 748,63 | 141,01 | 19,22 | 37,76 | 49,82 | |
| GM-BAV20 | 3287006 | 581192 | 8,17 | 224,5 | 61,92 | 490,07 | 99,49 | 26,37 | 23,78 | 59,62 | |
| GM-BAV21 | 3286883 | 581175 | 8,15 | 206,0 | 134,40 | 631,12 | 155,66 | 33,37 | 28,57 | 49,06 | |
| GM-BAV22 | 3286697 | 581231 | 8,09 | 159,7 | 51,17 | 523,90 | 101,72 | 21,64 | 29,88 | 66,02 | |
| GM-BAV23 | 3286696 | 581053 | 7,91 | 249,0 | 39,20 | 405,64 | 65,41 | 13,87 | 24,83 | 51,95 | |
| GM-BAV24 | 3286853 | 581023 | 7,58 | 432,0 | 31,13 | 403,43 | 117,70 | 15,20 | 24,46 | 50,83 | |
| GM-BAV25 | 3287038 | 581032 | 8,37 | 389,0 | 42,05 | 413,88 | 215,88 | 12,06 | 38,42 | 52,85 | |
| GM-BAV26 | 3287246 | 581015 | 8,81 | 57,5 | 52,88 | 819,52 | 89,42 | 24,56 | 32,58 | 75,32 | |
| GM-BAV27 | 3287384 | 581026 | 8,12 | 258,0 | 49,67 | 830,37 | 163,16 | 18,46 | 46,47 | 57,18 | |
| GM-BAV28 | 3287140 | 581498 | 8,03 | 962,0 | 59,22 | 603,22 | 119,35 | 19,20 | 36,54 | 81,52 | |
| GM-BAV29 | 3287716 | 580955 | 7,89 | 394,0 | 31,35 | 523,06 | 73,33 | 9,73 | 32,05 | 71,57 | |
| GM-BAV30 | 3287895 | 580977 | 8,15 | 279,0 | 43,94 | 682,75 | 79,62 | 14,78 | 27,01 | 75,61 | |
| GM-BAV31 | 3287898 | 580872 | 7,41 | 778,0 | 54,29 | 662,56 | 166,70 | 17,96 | 36,10 | 75,72 | |
| GM-BAV32 | 3287684 | 580867 | 8,40 | 135,5 | 50,24 | 452,59 | 146,67 | 15,95 | 48,17 | 56,66 | |
| GM-BAV33 | 3287524 | 580897 | 8,60 | 482,0 | 50,26 | 427,36 | 207,25 | 14,16 | 44,26 | 44,15 | |
| GM-BAV34 | 3287377 | 580883 | 9,11 | 475,0 | 85,94 | 383,27 | 154,46 | 13,21 | 25,95 | 47,49 | |
| GM-BAV35 | 3287215 | 580904 | 8,66 | 85,7 | 33,78 | 481,36 | 58,12 | 14,31 | 23,32 | 48,48 | |
| GM-BAV36 | 3286997 | 580877 | 8,08 | 103,1 | 48,85 | 617,05 | 94,84 | 19,82 | 51,70 | 47,39 | |
| GM-BAV37 | 3286838 | 580874 | 8,09 | 450,0 | 75,31 | 436,42 | 133,44 | 22,25 | 43,94 | 33,99 | |
| GM-BAV38 | 3386726 | 580893 | 7,82 | 1179,0 | 33,60 | 484,79 | 75,19 | 12,55 | 30,03 | 76,29 | |
| GM-BAV39 | 3286708 | 580779 | 8,21 | 134,9 | 40,24 | 561,41 | 70,85 | 18,49 | 26,16 | 49,73 | |
| GM-BAV40 | 3286931 | 580723 | 8,40 | 127,6 | 26,45 | 336,65 | 56,63 | 10,63 | 24,31 | 35,61 | |
| GM-BAV41 | 3287036 | 580739 | 7,66 | 338,0 | 43,18 | 518,02 | 81,33 | 16,05 | 31,88 | 56,34 | |
| GM-BAV42 | 3287185 | 580745 | 8,32 | 113,0 | 44,77 | 667,40 | 87,10 | 27,93 | 39,16 | 55,71 | |
| GM-BAV43 | 3287346 | 580734 | 10,10 | 843,0 | 46,61 | 416,44 | 277,02 | 17,74 | 41,85 | 42,41 | |
| GM-BAV44 | 3287314 | 580740 | 8,89 | 432,0 | 58,52 | 579,84 | 176,49 | 28,22 | 78,05 | 82,81 | |
| GM-BAV45 | 3287694 | 580783 | 7,96 | 614,0 | 74,48 | 377,84 | 109,40 | 11,89 | 51,38 | 45,45 | |
| GM-BAV46 | 3287855 | 580761 | 7,81 | 248,0 | 40,88 | 389,35 | 77,07 | 14,63 | 25,86 | 53,19 | |
| GM-BAV47 | 3287821 | 580570 | 7,90 | 668,0 | 80,35 | 786,23 | 136,08 | 27,31 | 39,24 | 46,45 | |
| GM-BAV48 | 3287708 | 580597 | 7,97 | 186,9 | 37,23 | 521,47 | 82,61 | 14,12 | 30,82 | 42,40 | |
| GM-BAV49 | 3287529 | 580577 | 8,04 | 198,8 | 133,40 | 790,45 | 170,20 | 39,27 | 54,44 | 50,00 | |
| GM-BAV50 | 3287384 | 580583 | 8,14 | 164,2 | 42,35 | 511,86 | 99,00 | 14,50 | 41,90 | 57,10 | |
| GM-BAV51 | 3287259 | 580584 | 8,23 | 170,5 | 52,01 | 512,45 | 172,85 | 17,43 | 62,51 | 37,04 | |
| GM-BAV52 | 3287450 | 580608 | 8,53 | 109,2 | 52,40 | 668,43 | 93,36 | 20,48 | 34,42 | 42,73 | |
| GM-BAV53 | 3286862 | 580637 | 8,20 | 139,7 | 43,75 | 606,92 | 78,36 | 18,21 | 27,02 | 33,91 | |
| Máximo | | | | | | 134,40 | 830,37 | 277,02 | 39,27 | 78,05 | 82,81 |
| Mínimo | | | | | | 25,79 | 290,30 | 29,82 | 8,59 | 12,70 | 33,91 |
| Promedio | | | | | | 51,36 | 554,21 | 110,83 | 18,37 | 34,33 | 56,16 |
| STD | | | | | | 20,78 | 135,08 | 46,51 | 5,74 | 11,60 | 13,06 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Elementos asociados al derrame en muestra <60 de suelos, localidad Baviácora, Sonora.

<LD = Menor a límite de detección, ND = No disponible.

| <60 | Elementos asociados al derrame | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|--------|-------|--------|----------|---------|---------|--------|--------|--------|-------|
| | Clave | N | E | pH | C.E.(µS) | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr |
| GM-BAV01 | 3287582 | 581388 | 8,36 | 422,0 | 53,57 | 471,14 | 79,54 | 20,80 | 27,44 | 73,63 | |
| GM-BAV02 | 3287526 | 581402 | 8,42 | 280,0 | 53,26 | 640,66 | 97,98 | 21,56 | 31,88 | 67,93 | |
| GM-BAV03 | 3287383 | 581434 | 8,49 | 105,2 | 26,45 | 582,75 | 72,67 | 10,71 | 29,24 | 64,76 | |
| GM-BAV04 | 3287250 | 581436 | 7,72 | 75,8 | 49,25 | 585,31 | 87,61 | 18,43 | 28,21 | 43,20 | |
| GM-BAV05 | 3287053 | 581423 | 8,60 | 94,7 | 42,53 | 422,61 | 77,95 | 22,90 | 22,00 | 45,01 | |
| GM-BAV06 | 3286931 | 581426 | 8,06 | 368,0 | 49,45 | 609,74 | 107,91 | 17,79 | 34,30 | 67,62 | |
| GM-BAV07 | 3286798 | 581435 | 8,03 | 165,4 | 47,73 | 536,18 | 80,39 | 15,91 | 30,70 | 61,51 | |
| GM-BAV08 | 3286726 | 581314 | 8,36 | 126,2 | 49,40 | 475,11 | 133,82 | 20,14 | 31,09 | 51,09 | |
| GM-BAV09 | 3286912 | 581326 | 9,10 | 354,0 | 50,09 | 365,91 | 121,62 | 16,87 | 25,76 | 46,49 | |
| GM-BAV10 | 3287026 | 581291 | 7,77 | 342,0 | 47,39 | 434,95 | 122,49 | 14,59 | 29,32 | 42,63 | |
| GM-BAV11 | 3287198 | 581281 | 8,40 | 79,0 | 55,14 | 786,68 | 76,64 | 20,32 | 31,10 | 87,47 | |
| GM-BAV12 | 3287351 | 581299 | 8,22 | 140,9 | 44,21 | 737,44 | 101,53 | 18,82 | 31,01 | 56,76 | |
| GM-BAV13 | 3287448 | 581312 | 8,93 | 210,0 | 44,13 | 486,21 | 62,29 | 15,44 | 51,84 | 51,39 | |
| GM-BAV14 | 3287599 | 581269 | 8,25 | 79,0 | 52,54 | 679,47 | 78,70 | 17,71 | 25,94 | 53,05 | |
| GM-BAV15 | 3287818 | 581065 | 8,23 | 175,9 | 69,62 | 573,89 | 95,12 | 22,67 | 33,31 | 59,76 | |
| GM-BAV16 | 3287711 | 581116 | 8,18 | 184,0 | 40,80 | 785,87 | 97,68 | 14,25 | 26,80 | 66,53 | |
| GM-BAV17 | 3287572 | 581154 | 8,21 | 324,0 | 56,11 | 603,43 | 140,78 | 21,83 | 34,98 | 72,31 | |
| GM-BAV18 | 3287320 | 581158 | 8,05 | 235,0 | 32,83 | 308,09 | 46,94 | 11,46 | 21,15 | 48,52 | |
| GM-BAV19 | 3287165 | 581139 | 7,66 | 223,0 | 46,30 | 684,72 | 133,19 | 20,06 | 34,96 | 55,39 | |
| GM-BAV20 | 3287006 | 581192 | 8,17 | 224,5 | 60,26 | 430,78 | 87,21 | 22,42 | 26,42 | 48,98 | |
| GM-BAV21 | 3286883 | 581175 | 8,15 | 206,0 | 166,80 | 628,00 | 178,32 | 40,46 | 38,76 | 54,90 | |
| GM-BAV22 | 3286697 | 581231 | 8,09 | 159,7 | 55,97 | 499,78 | 105,84 | 20,29 | 33,07 | 58,18 | |
| GM-BAV23 | 3286696 | 581053 | 7,91 | 249,0 | 46,84 | 423,73 | 105,75 | 18,61 | 42,62 | 61,66 | |
| GM-BAV24 | 3286853 | 581023 | 7,58 | 432,0 | 47,00 | 407,91 | 125,82 | 32,98 | 32,99 | 61,87 | |
| GM-BAV25 | 3287038 | 581032 | 8,37 | 389,0 | 149,27 | 480,09 | 252,46 | 14,13 | 41,16 | 59,28 | |
| GM-BAV26 | 3287246 | 581015 | 8,81 | 57,5 | 66,37 | 1222,74 | 117,87 | 26,11 | 45,11 | 79,95 | |
| GM-BAV27 | 3287384 | 581026 | 8,12 | 258,0 | 53,14 | 899,97 | 181,82 | 22,62 | 48,10 | 47,89 | |
| GM-BAV28 | 3287140 | 581498 | 8,03 | 962,0 | 62,64 | 565,76 | 124,34 | 17,72 | 39,23 | 58,99 | |
| GM-BAV29 | 3287716 | 580955 | 7,89 | 394,0 | 41,63 | 779,43 | 95,45 | 15,93 | 32,00 | 77,23 | |
| GM-BAV30 | 3287895 | 580977 | 8,15 | 279,0 | 45,69 | 564,84 | 82,11 | 17,92 | 26,76 | 72,06 | |
| GM-BAV31 | 3287898 | 580872 | 7,41 | 778,0 | 58,98 | 465,93 | 139,63 | 15,72 | 36,80 | 53,65 | |
| GM-BAV32 | 3287684 | 580867 | 8,40 | 135,5 | 48,42 | 433,87 | 288,77 | 14,34 | 59,44 | 54,94 | |
| GM-BAV33 | 3287524 | 580897 | 8,60 | 482,0 | 43,58 | 426,36 | 270,36 | 14,30 | 37,34 | 41,62 | |
| GM-BAV34 | 3287377 | 580883 | 9,11 | 475,0 | 53,08 | 485,61 | 210,50 | 21,66 | 36,19 | 50,90 | |
| GM-BAV35 | 3287215 | 580904 | 8,66 | 85,7 | 33,92 | 484,08 | 52,81 | 15,91 | 27,96 | 43,93 | |
| GM-BAV36 | 3286997 | 580877 | 8,08 | 103,1 | 54,39 | 574,45 | 117,38 | 25,04 | 45,27 | 46,46 | |
| GM-BAV37 | 3286838 | 580874 | 8,09 | 450,0 | 84,42 | 414,70 | 158,43 | 26,52 | 62,68 | 37,66 | |
| GM-BAV38 | 3384726 | 580893 | 7,82 | 1179,0 | 36,54 | 472,72 | 78,77 | 12,80 | 34,32 | 57,49 | |
| GM-BAV39 | 3286708 | 580779 | 8,21 | 134,9 | 47,32 | 701,64 | 85,29 | 19,44 | 29,14 | 52,07 | |
| GM-BAV40 | 3286931 | 580723 | 8,40 | 127,6 | 34,81 | 424,57 | 71,88 | 14,64 | 26,20 | 41,52 | |
| GM-BAV41 | 3287036 | 580739 | 7,66 | 338,0 | 39,50 | 508,26 | 86,35 | 16,95 | 28,95 | 49,61 | |
| GM-BAV42 | 3287185 | 580745 | 8,32 | 113,0 | 38,58 | 655,99 | 88,02 | 20,53 | 45,93 | 44,53 | |
| GM-BAV43 | 3287346 | 580734 | 10,10 | 843,0 | 53,79 | 423,32 | 331,57 | 20,31 | 35,82 | 43,32 | |
| GM-BAV44 | 3287314 | 580740 | 8,89 | 432,0 | 61,90 | 383,53 | 265,11 | 32,46 | 106,54 | 67,23 | |
| GM-BAV45 | 3287694 | 580783 | 7,96 | 614,0 | 90,44 | 426,85 | 151,10 | 15,83 | 55,08 | 50,09 | |
| GM-BAV46 | 3287855 | 580761 | 7,81 | 248,0 | 54,88 | 490,83 | 99,19 | 25,94 | 72,26 | 64,20 | |
| GM-BAV47 | 3287821 | 580570 | 7,90 | 668,0 | 80,79 | 719,25 | 133,44 | 27,04 | 39,44 | 69,09 | |
| GM-BAV48 | 3287708 | 580597 | 7,97 | 186,9 | 48,84 | 591,03 | 102,46 | 18,87 | 34,74 | 62,56 | |
| GM-BAV49 | 3287529 | 580577 | 8,04 | 198,8 | 130,28 | 749,77 | 158,74 | 38,30 | 59,08 | 64,15 | |
| GM-BAV50 | 3287384 | 580583 | 8,14 | 164,2 | 50,94 | 688,38 | 130,21 | 19,99 | 56,61 | 50,97 | |
| GM-BAV51 | 3287259 | 580584 | 8,23 | 170,5 | 80,42 | 694,20 | 249,29 | 25,17 | 99,90 | 55,50 | |
| GM-BAV52 | 3287450 | 580608 | 8,53 | 109,2 | 57,64 | 702,83 | 119,51 | 20,30 | 34,31 | 52,64 | |
| GM-BAV53 | 3286862 | 580637 | 8,20 | 139,7 | 50,33 | 668,26 | 98,31 | 21,83 | 31,15 | 52,35 | |
| Máximo | | | | | | 166,80 | 1222,74 | 331,57 | 40,46 | 106,54 | 87,47 |
| Mínimo | | | | | | 26,45 | 308,09 | 46,94 | 10,71 | 21,15 | 37,66 |
| Promedio | | | | | | 57,52 | 571,53 | 129,05 | 20,25 | 39,67 | 56,10 |
| STD | | | | | | 26,06 | 160,34 | 63,29 | 6,02 | 16,82 | 10,87 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Elementos asociados al derrame en muestra <635 de suelos, localidad Baviácora, Sonora.

<LD = Menor a límite de detección, ND = No disponible.

| <635 | | | | | Elementos asociados al derrame | | | | | |
|-----------------|---------|--------|-------|-----------|--------------------------------|---------|---------|-------|--------|--------|
| Clave | N | E | pH | C.E. (µS) | Cu | Mn | Zn | As | Pb | Cr |
| GM-BAV01 | 3287582 | 581388 | 8,36 | 422,0 | 72,85 | 1472,56 | 164,34 | 26,85 | 59,54 | 96,77 |
| GM-BAV02 | 3287526 | 581402 | 8,42 | 280,0 | 189,57 | 2672,48 | 349,45 | 59,41 | 70,96 | 138,86 |
| GM-BAV03 | 3287383 | 581434 | 8,49 | 105,2 | 32,57 | 545,59 | 119,57 | 19,50 | 39,03 | 102,71 |
| GM-BAV04 | 3287250 | 581436 | 7,72 | 75,8 | 54,09 | 878,76 | 166,90 | 29,90 | 51,69 | 87,74 |
| GM-BAV05 | 3287053 | 581423 | 8,60 | 94,7 | 96,96 | 1825,56 | 239,36 | 38,25 | 63,77 | 127,67 |
| GM-BAV06 | 3286931 | 581426 | 8,06 | 368,0 | 48,89 | 557,93 | 128,91 | 22,74 | 38,65 | 82,11 |
| GM-BAV07 | 3286798 | 581435 | 8,03 | 165,4 | 133,61 | 2263,23 | 282,70 | 42,10 | 78,02 | 148,07 |
| GM-BAV08 | 3286726 | 581314 | 8,36 | 126,2 | 83,92 | 1580,48 | 287,05 | 34,63 | 55,49 | 118,36 |
| GM-BAV09 | 3286912 | 581326 | 9,10 | 354,0 | 227,87 | 1977,00 | 584,93 | 46,31 | 100,79 | 117,16 |
| GM-BAV10 | 3287026 | 581291 | 7,77 | 342,0 | 126,38 | 1756,59 | 370,52 | 33,42 | 104,12 | 117,60 |
| GM-BAV11 | 3287198 | 581281 | 8,40 | 79,0 | 179,43 | 3183,49 | 317,13 | 44,88 | 68,46 | 177,78 |
| GM-BAV12 | 3287351 | 581299 | 8,22 | 140,9 | 64,16 | 1945,23 | 249,20 | 29,97 | 65,60 | 109,70 |
| GM-BAV13 | 3287448 | 581312 | 8,93 | 210,0 | 91,54 | 1558,79 | 211,89 | 30,53 | 66,88 | 97,40 |
| GM-BAV14 | 3287599 | 581269 | 8,25 | 79,0 | 68,13 | 2270,19 | 163,84 | 27,42 | 46,98 | 128,09 |
| GM-BAV15 | 3287818 | 581065 | 8,23 | 175,9 | 120,89 | 1925,97 | 219,90 | 44,52 | 56,41 | 99,13 |
| GM-BAV16 | 3287711 | 581116 | 8,18 | 184,0 | 59,60 | 746,42 | 160,91 | 21,88 | 41,21 | 102,40 |
| GM-BAV17 | 3287572 | 581154 | 8,21 | 324,0 | 69,56 | 1680,22 | 290,20 | 26,35 | 69,30 | 87,31 |
| GM-BAV18 | 3287320 | 581158 | 8,05 | 235,0 | 135,52 | 2404,03 | 274,84 | 46,92 | 59,78 | 161,39 |
| GM-BAV19 | 3287165 | 581139 | 7,66 | 223,0 | 58,40 | 814,77 | 176,02 | 25,49 | 50,80 | 87,82 |
| GM-BAV20 | 3287006 | 581192 | 8,17 | 224,5 | 174,08 | 1970,26 | 349,19 | 61,92 | 89,17 | 135,63 |
| GM-BAV21 | 3286883 | 581175 | 8,15 | 206,0 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| GM-BAV22 | 3286697 | 581231 | 8,09 | 159,7 | 69,72 | 1577,20 | 194,64 | 28,73 | 54,92 | 106,12 |
| GM-BAV23 | 3286696 | 581053 | 7,91 | 249,0 | 196,64 | 2106,17 | 491,51 | 49,53 | 108,05 | 141,06 |
| GM-BAV24 | 3286853 | 581023 | 7,58 | 432,0 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| GM-BAV25 | 3287038 | 581032 | 8,37 | 389,0 | 257,03 | 2122,75 | 1946,50 | 45,94 | 140,32 | 129,58 |
| GM-BAV26 | 3287246 | 581015 | 8,81 | 57,5 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| GM-BAV27 | 3287384 | 581026 | 8,12 | 258,0 | 76,83 | 1164,82 | 337,45 | 33,76 | 103,21 | 98,35 |
| GM-BAV28 | 3287140 | 581498 | 8,03 | 962,0 | 152,64 | 2373,87 | 442,85 | 39,62 | 90,56 | 127,36 |
| GM-BAV29 | 3287716 | 580955 | 7,89 | 394,0 | 56,87 | 799,60 | 165,53 | 22,66 | 47,56 | 119,53 |
| GM-BAV30 | 3287895 | 580977 | 8,15 | 279,0 | 91,54 | 2067,42 | 259,74 | 35,98 | 63,82 | 128,33 |
| GM-BAV31 | 3287898 | 580872 | 7,41 | 778,0 | 109,14 | 786,27 | 319,33 | 35,55 | 94,01 | 98,47 |
| GM-BAV32 | 3287684 | 580867 | 8,40 | 135,5 | 80,25 | 1657,00 | 432,37 | 25,28 | 102,28 | 114,30 |
| GM-BAV33 | 3287524 | 580897 | 8,60 | 482,0 | 188,86 | 2012,43 | 1346,43 | 45,90 | 256,69 | 116,67 |
| GM-BAV34 | 3287377 | 580883 | 9,11 | 475,0 | 237,53 | 2611,62 | 1769,68 | 65,61 | 108,00 | 150,58 |
| GM-BAV35 | 3287215 | 580904 | 8,66 | 85,7 | 119,91 | 2611,47 | 270,31 | 46,87 | 94,54 | 119,68 |
| GM-BAV36 | 3286997 | 580877 | 8,08 | 103,1 | 61,21 | 655,91 | 158,24 | 28,45 | 54,16 | 70,14 |
| GM-BAV37 | 3286838 | 580874 | 8,09 | 450,0 | 300,25 | 2353,76 | 706,10 | 73,76 | 169,91 | 122,66 |
| GM-BAV38 | 3384726 | 580893 | 7,82 | 1179,0 | 40,81 | 515,98 | 165,05 | 21,98 | 58,27 | 88,92 |
| GM-BAV39 | 3286708 | 580779 | 8,21 | 134,9 | 63,55 | 966,95 | 151,94 | 31,21 | 48,41 | 87,79 |
| GM-BAV40 | 3286931 | 580723 | 8,40 | 127,6 | 111,80 | 2040,48 | 341,59 | 41,88 | 87,27 | 124,84 |
| GM-BAV41 | 3287036 | 580739 | 7,66 | 338,0 | 65,32 | 882,60 | 185,89 | 37,12 | 66,51 | 97,19 |
| GM-BAV42 | 3287185 | 580745 | 8,32 | 113,0 | 56,92 | 930,98 | 150,42 | 42,35 | 62,25 | 91,00 |
| GM-BAV43 | 3287346 | 580734 | 10,10 | 843,0 | 178,19 | 1987,37 | 1249,68 | 42,93 | 124,30 | 117,59 |
| GM-BAV44 | 3287314 | 580740 | 8,89 | 432,0 | 164,61 | 1719,95 | 828,53 | 55,30 | 152,11 | 114,87 |
| GM-BAV45 | 3287694 | 580783 | 7,96 | 614,0 | 204,53 | 1659,37 | 521,19 | 38,89 | 173,44 | 104,78 |
| GM-BAV46 | 3287855 | 580761 | 7,81 | 248,0 | 196,10 | 2097,84 | 486,15 | 55,32 | 120,77 | 117,22 |
| GM-BAV47 | 3287821 | 580570 | 7,90 | 668,0 | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| GM-BAV48 | 3287708 | 580597 | 7,97 | 186,9 | 79,72 | 1941,84 | 215,05 | 27,80 | 61,60 | 140,65 |
| GM-BAV49 | 3287529 | 580577 | 8,04 | 198,8 | 168,65 | 843,28 | 216,12 | 50,51 | 74,18 | 96,08 |
| GM-BAV50 | 3287384 | 580583 | 8,14 | 164,2 | 83,47 | 2111,11 | 291,06 | 31,48 | 99,32 | 110,19 |
| GM-BAV51 | 3287259 | 580584 | 8,23 | 170,5 | 78,65 | 765,73 | 317,80 | 34,00 | 130,93 | 78,13 |
| GM-BAV52 | 3287450 | 580608 | 8,53 | 109,2 | 60,08 | 895,93 | 148,24 | 30,32 | 47,98 | 76,96 |
| GM-BAV53 | 3286862 | 580637 | 8,20 | 139,7 | 189,10 | 3365,41 | 331,98 | 49,95 | 53,68 | 148,92 |
| Máximo | | | | | 300,25 | 3365,41 | 1946,50 | 73,76 | 256,69 | 177,78 |
| Mínimo | | | | | 32,57 | 515,98 | 119,57 | 19,50 | 38,65 | 70,14 |
| Promedio | | | | | 118,94 | 1666,42 | 398,94 | 38,40 | 84,20 | 113,50 |
| STD | | | | | 64,93 | 715,46 | 393,28 | 12,35 | 41,87 | 23,16 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Anexo 4.

Tablas con datos de bioaccesibilidad.

Datos de concentraciones de bioaccesibilidad gástrica en elementos asociados a derrame, localidad Banámichi, Sonora. <LOD = Menor a límite de detección.

| Clave | Elementos asociados al derrame (mg/L) | | | | | |
|-----------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | As | Cr | Cu | Mn | Pb | Zn |
| GM-BAN-01 | <LOD | <LOD | 0,055 | 1,646 | 0,058 | 0,261 |
| GM-BAN-02 | <LOD | <LOD | 0,030 | 1,216 | <LOD | 0,129 |
| GM-BAN-03 | <LOD | <LOD | 0,034 | 1,116 | <LOD | 0,090 |
| GM-BAN-04 | <LOD | <LOD | 0,032 | 1,035 | <LOD | 0,079 |
| GM-BAN-05 | <LOD | <LOD | 0,026 | 1,455 | <LOD | 0,149 |
| GM-BAN-06 | <LOD | <LOD | 0,021 | 1,413 | <LOD | 0,092 |
| GM-BAN-07 | <LOD | <LOD | 0,039 | 1,505 | 0,073 | 0,151 |
| GM-BAN-08 | <LOD | <LOD | 0,049 | 1,494 | <LOD | 0,128 |
| GM-BAN-09 | <LOD | <LOD | 0,040 | 1,434 | 0,050 | 0,219 |
| GM-BAN-10 | <LOD | <LOD | 0,042 | 1,600 | 0,018 | 0,127 |
| GM-BAN-11 | <LOD | <LOD | 0,027 | 1,629 | <LOD | 0,091 |
| GM-BAN-12 | <LOD | <LOD | 0,043 | 1,757 | 0,019 | 0,443 |
| GM-BAN-13 | <LOD | <LOD | 0,011 | 1,509 | <LOD | 0,108 |
| GM-BAN-14 | <LOD | <LOD | 0,060 | 1,554 | 0,035 | 0,188 |
| GM-BAN-15 | <LOD | <LOD | 0,026 | 1,674 | <LOD | 0,094 |
| GM-BAN-16 | <LOD | <LOD | 0,032 | 2,110 | <LOD | 0,362 |
| GM-BAN-17 | <LOD | <LOD | 0,042 | 1,681 | <LOD | 0,107 |
| GM-BAN-18 | <LOD | <LOD | 0,019 | 0,770 | <LOD | 0,117 |
| GM-BAN-19 | <LOD | 0,022 | 0,111 | 1,121 | 0,113 | 0,465 |
| GM-BAN-20 | <LOD | 0,100 | 0,149 | 1,822 | 0,599 | 0,597 |
| GM-BAN-21 | <LOD | 0,024 | 0,184 | 0,948 | 2,888 | 0,504 |
| GM-BAN-22 | <LOD | 0,022 | 0,068 | 1,200 | 0,095 | 0,367 |
| GM-BAN-23 | <LOD | 0,111 | 0,083 | 1,878 | 0,607 | 0,681 |
| GM-BAN-24 | <LOD | 0,017 | 0,096 | 1,492 | 0,116 | 0,574 |
| GM-BAN-25 | <LOD | 0,023 | 0,136 | 1,359 | 0,135 | 0,458 |
| GM-BAN-26 | <LOD | 0,075 | 0,061 | 1,261 | 0,386 | 0,424 |
| GM-BAN-27 | <LOD | <LOD | 0,043 | 1,677 | 0,144 | 0,416 |
| GM-BAN-28 | <LOD | <LOD | 0,078 | 2,485 | 0,065 | 0,434 |
| GM-BAN-29 | <LOD | <LOD | 0,029 | 2,080 | <LOD | 0,338 |
| GM-BAN-30 | <LOD | 0,032 | 0,187 | 1,551 | 0,092 | 3,114 |
| GM-BAN-31 | <LOD | 0,048 | 0,100 | 1,427 | 0,058 | 2,854 |
| GM-BAN-32 | <LOD | <LOD | 0,221 | 2,075 | 0,182 | 0,701 |
| GM-BAN-33 | <LOD | 0,012 | 0,103 | 1,796 | 0,198 | 0,968 |
| GM-BAN-34 | <LOD | 0,016 | 0,081 | 1,477 | 0,064 | 0,880 |
| GM-BAN-35 | <LOD | <LOD | 0,026 | 1,315 | 0,029 | 0,181 |
| GM-BAN-36 | <LOD | 0,012 | 0,100 | 1,616 | 0,078 | 0,499 |
| GM-BAN-37 | <LOD | <LOD | 0,058 | 1,094 | 0,029 | 0,295 |
| GM-BAN-38 | <LOD | <LOD | 0,021 | 1,661 | <LOD | 0,088 |
| GM-BAN-39 | <LOD | <LOD | 0,052 | 2,111 | 0,027 | 0,091 |
| GM-BAN-40 | <LOD | <LOD | 0,021 | 1,601 | <LOD | 0,263 |
| GM-BAN-41 | <LOD | <LOD | 0,055 | 1,965 | 0,044 | 0,118 |
| GM-BAN-42 | <LOD | <LOD | 0,072 | 1,850 | 0,111 | 0,157 |
| GM-BAN-43 | <LOD | <LOD | 0,087 | 2,314 | 0,129 | 0,152 |
| GM-BAN-44 | <LOD | <LOD | 0,154 | 1,961 | 0,131 | 0,158 |
| GM-BAN-45 | <LOD | <LOD | 0,070 | 2,205 | 0,123 | 0,175 |
| GM-BAN-46 | <LOD | <LOD | 0,052 | 1,966 | 0,062 | 0,111 |
| GM-BAN-47 | <LOD | <LOD | 0,044 | 2,175 | 0,052 | 0,155 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Datos de concentraciones de bioaccesibilidad gástrica en elementos asociados a derrame, localidad Huépac, Sonora. <LOD = Menor a límite de detección.

| Clave | Elementos asociados al derrame (mg/L) | | | | | |
|-----------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | As | Cr | Cu | Mn | Pb | Zn |
| GM-HUE-01 | <LOD | <LOD | 0,103 | 0,998 | 0,079 | 0,459 |
| GM-HUE-02 | <LOD | <LOD | 0,072 | 1,060 | 0,064 | 0,351 |
| GM-HUE-03 | <LOD | <LOD | 0,058 | 1,296 | 0,053 | 0,287 |
| GM-HUE-04 | <LOD | <LOD | 0,033 | 1,285 | 0,040 | 0,251 |
| GM-HUE-05 | <LOD | <LOD | 0,033 | 1,003 | 0,077 | 0,254 |
| GM-HUE-06 | <LOD | <LOD | 0,021 | 0,695 | 0,048 | 0,235 |
| GM-HUE-07 | <LOD | <LOD | 0,024 | 2,423 | 0,211 | 0,638 |
| GM-HUE-07 | <LOD | <LOD | 0,020 | 2,281 | 0,323 | 0,691 |
| GM-HUE-08 | <LOD | <LOD | 0,022 | 1,068 | 0,034 | 0,204 |
| GM-HUE-09 | <LOD | <LOD | 0,044 | 1,246 | 0,047 | 0,308 |
| GM-HUE-10 | <LOD | <LOD | 0,034 | 1,567 | 0,070 | 0,285 |
| GM-HUE-11 | <LOD | <LOD | 0,019 | 1,705 | 0,054 | 0,675 |
| GM-HUE-12 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,465 | 0,039 | 0,351 |
| GM-HUE-13 | <LOD | <LOD | 0,062 | 1,674 | 0,050 | 0,214 |
| GM-HUE-14 | <LOD | <LOD | 0,081 | 2,028 | 0,064 | 0,235 |
| GM-HUE-15 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,662 | 0,075 | 0,229 |
| GM-HUE-16 | <LOD | <LOD | 0,046 | 1,776 | 0,074 | 0,223 |
| GM-HUE-17 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,967 | 0,109 | 0,288 |
| GM-HUE-18 | <LOD | <LOD | 0,035 | 2,021 | 0,281 | 0,358 |
| GM-HUE-19 | <LOD | <LOD | 0,097 | 2,648 | 0,072 | 0,268 |
| GM-HUE-20 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,004 | 0,037 | 0,195 |
| GM-HUE-21 | <LOD | <LOD | 0,013 | 1,146 | 0,144 | 0,556 |
| GM-HUE-22 | <LOD | <LOD | 0,047 | 2,440 | 0,123 | 0,534 |
| GM-HUE-23 | <LOD | <LOD | 0,032 | 1,625 | 0,170 | 0,408 |
| GM-HUE-24 | <LOD | <LOD | 0,036 | 1,611 | 0,211 | 1,319 |
| GM-HUE-25 | <LOD | <LOD | 0,035 | 2,294 | 0,503 | 1,466 |
| GM-HUE-26 | <LOD | <LOD | 0,020 | 1,563 | 0,123 | 0,434 |
| GM-HUE-27 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,995 | 0,066 | 0,247 |
| GM-HUE-28 | <LOD | <LOD | 0,010 | 1,165 | 0,064 | 0,326 |
| GM-HUE-29 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,645 | 0,073 | 0,248 |
| GM-HUE-30 | <LOD | <LOD | 0,029 | 2,688 | 0,227 | 1,031 |
| GM-HUE-31 | <LOD | <LOD | <LOD | 3,918 | 0,178 | 0,390 |
| GM-HUE-32 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,431 | 0,102 | 0,387 |
| GM-HUE-33 | <LOD | <LOD | 0,079 | 1,368 | 0,566 | 0,807 |
| GM-HUE-34 | <LOD | <LOD | <LOD | 2,494 | 0,092 | 0,347 |
| GM-HUE-35 | <LOD | <LOD | 0,091 | 1,348 | 0,188 | 0,456 |
| GM-HUE-36 | <LOD | 0,011 | 0,036 | 1,448 | 0,233 | 0,555 |
| GM-HUE-37 | <LOD | <LOD | 0,037 | 1,428 | 0,208 | 0,438 |
| GM-HUE-38 | <LOD | <LOD | 0,095 | 2,294 | 3,732 | 1,670 |
| GM-HUE-39 | <LOD | <LOD | 0,030 | 1,708 | 0,519 | 1,871 |
| GM-HUE-40 | <LOD | <LOD | 0,092 | 2,537 | 0,171 | 0,689 |
| GM-HUE-41 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,560 | 0,082 | 0,349 |
| GM-HUE-42 | <LOD | <LOD | 0,026 | 1,834 | 0,157 | 0,360 |
| GM-HUE-43 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,585 | 0,060 | 0,222 |
| GM-HUE-44 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,632 | 0,035 | 0,182 |
| GM-HUE-45 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,831 | 0,098 | 0,251 |
| GM-HUE-46 | <LOD | <LOD | 0,085 | 1,892 | 0,945 | 0,253 |
| GM-HUE-47 | <LOD | <LOD | 0,034 | 1,957 | 0,145 | 0,197 |
| GM-HUE-48 | <LOD | <LOD | <LOD | 2,253 | 0,069 | 0,196 |
| GM-HUE-49 | <LOD | <LOD | 0,049 | 1,417 | 0,618 | 0,940 |
| GM-HUE-50 | <LOD | 0,011 | 0,042 | 1,969 | 0,307 | 1,060 |
| GM-HUE-51 | <LOD | 0,007 | 0,022 | 2,262 | 0,089 | 0,356 |

Evaluación de riesgo a salud humana por exposición a metales en suelos en tres poblaciones del río Sonora.

Datos de concentraciones de bioaccesibilidad gástrica en elementos asociados a derrame, localidad Baviácora, Sonora. <LOD = Menor a límite de detección.

| Clave | Elementos asociados al derrame (mg/L) | | | | | |
|-----------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | As | Cr | Cu | Mn | Pb | Zn |
| GM-BAV-01 | <LOD | <LOD | 0,035 | 0,907 | 0,123 | 0,189 |
| GM-BAV-02 | <LOD | <LOD | 0,039 | 1,267 | 0,054 | 0,200 |
| GM-BAV-03 | <LOD | <LOD | <LOD | 0,825 | 0,027 | 0,100 |
| GM-BAV-04 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,273 | 0,043 | 0,139 |
| GM-BAV-05 | <LOD | <LOD | <LOD | 0,431 | 0,027 | 0,138 |
| GM-BAV-06 | <LOD | <LOD | 0,015 | 2,241 | 0,067 | 0,324 |
| GM-BAV-07 | <LOD | <LOD | 0,016 | 1,228 | 0,062 | 0,199 |
| GM-BAV-08 | <LOD | <LOD | 0,052 | 1,274 | 0,054 | 0,467 |
| GM-BAV-09 | <LOD | 0,018 | 0,134 | 0,943 | 0,073 | 0,703 |
| GM-BAV-10 | <LOD | 0,008 | 0,057 | 1,064 | 0,108 | 0,519 |
| GM-BAV-11 | <LOD | <LOD | 0,017 | 0,733 | 0,045 | 0,138 |
| GM-BAV-12 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,227 | 0,052 | 0,312 |
| GM-BAV-13 | <LOD | 0,013 | 0,037 | 0,983 | 0,105 | 0,259 |
| GM-BAV-14 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,088 | 0,021 | 0,064 |
| GM-BAV-15 | <LOD | <LOD | 0,095 | 1,350 | 0,037 | 0,210 |
| GM-BAV-16 | <LOD | <LOD | <LOD | 2,396 | 0,053 | 0,211 |
| GM-BAV-17 | <LOD | 0,009 | 0,029 | 1,121 | 0,067 | 0,541 |
| GM-BAV-18 | <LOD | <LOD | <LOD | 0,727 | 0,041 | 0,222 |
| GM-BAV-19 | <LOD | <LOD | <LOD | 3,546 | 0,092 | 0,444 |
| GM-BAV-20 | <LOD | <LOD | 0,162 | 0,879 | 0,061 | 0,414 |
| GM-BAV-21 | <LOD | <LOD | 0,585 | 1,810 | 0,062 | 0,678 |
| GM-BAV-22 | <LOD | <LOD | 0,102 | 1,656 | 0,061 | 0,309 |
| GM-BAV-23 | <LOD | 0,019 | 0,061 | 0,910 | 0,187 | 0,498 |
| GM-BAV-24 | <LOD | 0,011 | 0,036 | 1,175 | 0,109 | 0,716 |
| GM-BAV-25 | <LOD | 0,029 | 0,143 | 0,916 | 0,186 | 2,125 |
| GM-BAV-26 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,175 | 0,027 | 0,059 |
| GM-BAV-27 | <LOD | <LOD | 0,021 | 2,371 | 0,181 | 0,733 |
| GM-BAV-28 | <LOD | <LOD | 0,033 | 1,978 | 0,132 | 0,488 |
| GM-BAV-29 | <LOD | <LOD | 0,045 | 1,611 | 0,055 | 0,272 |
| GM-BAV-30 | <LOD | <LOD | 0,079 | 0,906 | 0,054 | 0,241 |
| GM-BAV-31 | <LOD | 0,013 | 0,070 | 1,655 | 0,108 | 0,841 |
| GM-BAV-32 | <LOD | <LOD | 0,043 | 1,718 | 0,214 | 0,743 |
| GM-BAV-33 | <LOD | 0,017 | 0,047 | 0,982 | 0,144 | 2,019 |
| GM-BAV-34 | <LOD | 0,011 | 0,070 | 1,329 | 0,163 | 1,486 |
| GM-BAV-35 | <LOD | <LOD | <LOD | 0,638 | 0,036 | 0,159 |
| GM-BAV-36 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,651 | 0,110 | 0,240 |
| GM-BAV-37 | <LOD | 0,023 | 0,232 | 1,315 | 0,274 | 0,945 |
| GM-BAV-38 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,467 | 0,125 | 0,295 |
| GM-BAV-39 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,462 | 0,035 | 0,096 |
| GM-BAV-40 | <LOD | <LOD | <LOD | 0,660 | 0,113 | 0,269 |
| GM-BAV-41 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,216 | 0,066 | 0,200 |
| GM-BAV-42 | <LOD | <LOD | <LOD | 1,162 | 0,030 | 0,068 |
| GM-BAV-43 | <LOD | 0,018 | 0,097 | 1,183 | 0,167 | 1,833 |
| GM-BAV-44 | <LOD | 0,036 | 0,133 | 0,998 | 0,301 | 1,310 |
| GM-BAV-45 | <LOD | <LOD | 0,259 | 0,892 | 0,291 | 0,667 |
| GM-BAV-46 | <LOD | 0,020 | 0,048 | 0,964 | 0,139 | 0,478 |
| GM-BAV-47 | <LOD | <LOD | 0,114 | 1,618 | 0,074 | 0,135 |
| GM-BAV-48 | <LOD | <LOD | 0,014 | 1,755 | 0,077 | 0,149 |
| GM-BAV-49 | <LOD | <LOD | 0,343 | 1,783 | 0,129 | 0,219 |
| GM-BAV 50 | <LOD | <LOD | 0,362 | 2,435 | 0,254 | 2,153 |