

ANEXO

1

Informe Final Integrado del Medio Abiótico

Proyecto

**Diagnóstico Ambiental y propuesta de Remediación-
Reparación-Compensación en la cuenca del Río Sonora
afectada por el derrame del represo “Tinajas 1” de la
mina Buenavista del Cobre, Cananea, Sonora”**



INSTITUTO DE GEOLOGIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO



Proyecto

Diagnóstico Ambiental y propuesta de Remediación-Reparación-Compensación en la cuenca del Río Sonora afectada por el derrame del represo "Tinajas 1" de la mina Buenavista del Cobre, Cananea, Sonora"

Sub-Proyecto

**Informe Final Integrado del
Medio Abiótico**

Elaborado por:

Instituto de Geología

Universidad Nacional Autónoma de México

25.11.2016

INDICE

Resumen	2 - 6
I. Introducción	7 - 9
II. Metodología	10
III. Delimitación de la zona de estudio	11 - 16
IV. Caracterización de la fuente de contaminación	17 - 21
V. Determinación del estado base: medio abiótico	22 - 36
VI. evaluación del daño ambiental en los cuerpos de agua	36- 65
VII. evaluación del daño ambiental en suelos y sedimentos	66- 88
VIII. Evaluación del riesgo a la salud humana	89- 91

Lista de Apéndices

- APÉNDICE DE MUESTREO 1** Informe de Muestreo Realizado en Julio de 2015. Muestras de suelos y sedimentos en zanjas de hasta 3.5 m de profundidad
- APÉNDICE DE MUESTREO 2** Informe de Muestreo Realizado en Noviembre de 2015. Muestreo de agua superficial y subterránea en la Cuenca del Río San Miguel, para determinar valores de fondo
- APÉNDICE DE MUESTREO 3** Informe de Muestreo Realizado en Noviembre de 2015. Muestreo de agua superficial y subterránea en la Cuenca del Río Sonora
- APÉNDICE DE LABORATORIO 1 (A)** Informe de Laboratorio del muestreo Realizado en Julio de 2015. Análisis por Fluorescencia de Rayos X, Método EPA 6200
- APÉNDICE DE LABORATORIO 1 (B)** Informe de Laboratorio del muestreo Realizado en Julio de 2015. Análisis por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivamente Acoplado, Método B.4 NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004
- APÉNDICE DE LABORATORIO 2** Informe de laboratorio del muestreo Realizado en Noviembre de 2015. Resultados en muestras de agua superficial y subterránea en la Cuenca del Río San Miguel, para determinar valores de fondo
- APÉNDICE DE LABORATORIO 3** Informe de laboratorio del muestreo Realizado en Noviembre de 2015. Resultados en muestras de agua superficial y subterránea en la Cuenca del Río Sonora
- APÉNDICE DE LABORATORIO 4** Resultados de las concentraciones totales de metales por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES) en las muestras de material impacto y colectado, durante la remediación y depositado en los caminos de acceso de la presa de jales de la empresa
- APÉNDICE DE LABORATORIO 5** Resultados de bioaccesibilidad gástrica, de acuerdo a Apéndice Normativo "C" de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

Lista de Anexos

- ANEXO 1.1** Delimitación de la zona de estudio
- ANEXO 1.2** Diagnóstico de la situación ambiental actual asociada al derrame de la solución ácida ferrocuprífera de Buena Vista del Cobre hacia la cuenca del río Sonora
- ANEXO 1.3** Informe de avances "Valoración de la presencia de metales, asociados al derrame de Buena Vista del Cobre (BVC), en sedimentos y suelos de la Cuenca del Río Sonora, a 6 meses de ocurrido el derrame y después de las acciones de remediación de BVC"
- ANEXO 1.4** Elementos de Tierras Raras como trazadores de contaminación residual en sedimentos del arroyo Tinajas, ríos Bacanuchi y Sonora, asociada al derrame de una solución ácida de la mina Buenavista del Cobre, en el distrito minero de Cananea, Sonora.
- ANEXO 1.5** Estudio geológico y geoquímico de "línea base" en el marco de la evaluación del impacto ambiental asociado al derrame del repeso de lixiviados de la mina Buenavista del Cobre hacia la cuenca del río Sonora
- ANEXO 1.6** Informe de avances "Evaluación de la calidad actual del agua de la presa El Molinito"
- ANEXO 1.7** Presa el Molinito: análisis de sedimentos modernos y acumulados
- ANEXO 1.8** Informe final del grupo del agua
- ANEXO 1.9** Informe de Avance "Evaluación de los materiales removidos durante las acciones de remediación de la empresa Buena Vista del Cobre en la Cuenca el Río Sonora"
- ANEXO 1.10** Evaluación del riesgo a la salud humana por exposición a elementos potencialmente tóxicos en suelos, asociados al derrame de Buenavista del Cobre ocurrido en Agosto del 2014

RESUMEN

El 06 de agosto de 2014 se derramaron, cuenca del río Sonora, unos 40,000 m³ de solución ácida enriquecida con Cu y Fe y la presencia de otros elementos químicos (Al, Mn, Zn, As, Ni, Cd, Pb y Cr), a la que se denomina "solución ácida ferro-cuprífera". Esta solución "ácida ferro-cuprífera" se derramó del represo denominado "Tinajas 1", que se encuentra ubicado dentro de las instalaciones de la Empresa Buenavista del Cobre (BVC), subsidiaria de Grupo México (GM).

Con el fin de mitigar el impacto ambiental del derrame, en la cuenca del Río Sonora, BVC aplicó las siguientes medidas de mitigación/remediación: (i) Construcción del bordo de contención, (ii) Extracción de 2,366 m³ de la solución derramada y (iii) Recolecta de 7,398 m³ de material visiblemente impactado.

El instituto de Geología de la UNAM, en colaboración con la Universidad de Sonora y el Instituto Tecnológico de Sonora, realizaron una serie de investigaciones en el medio abiótico, entre septiembre de 2014 y junio de 2016, con el fin estudiar la presencia de los metales, asociados al derrame, en los cuerpos de agua, sedimentos y suelos, para valorar el daño ambiental; después de remediación realizadas por BVC, en la cuenca del río Sonora.

A continuación los principales resultados:

1. Con base en criterios geomorfológicos y geológicos se delimitó una zona de estudio de aproximadamente 315.3 km². Dentro de los límites de estas unidades geomorfológicas se estableció la "Zona de influencia" que pudo haber sido afectada por el derrame, donde se programó el muestreo de suelos y sedimentos potencialmente afectados por el derrame en cuestión. Así mismo, fuera de los límites de estas unidades geomorfológicas se estableció la "Zona fuera de la influencia" del derrame para la toma de muestras de suelos y sedimentos que sirvan de valor de fondo.
2. La caracterización de la fuente de contaminación (lixiviado ácido ferro-cuprífero derramado) permitió establecer que la contaminación residual se puede rastrear por cualquiera de las siguientes características en el medio abiótico afectado: (i) Bajos valores de pH. (ii) Altas concentraciones de metales, mayores a los valores de fondo. (iii) Altos valores de conductividad eléctrica. (iv) Presencia del mineral jarosita que le confiere un color amarillo-naranja al medio abiótico afectado por el derrame.
3. Considerando las concentraciones de los metales asociados al derrame, reportadas por el servicio Geológico Mexicano entre 1995 y 2000, en los sedimentos activos de la cuenca del río Sonora, se puede afirmar La zona de estudio se caracteriza por la presencia natural de los metales asociados al derrame. Así mismo, de acuerdo a artículos científicos publicados, se puede afirmar que desde hace 20 millones de años, debido a los procesos

de erosión de las sierras circundantes, el río Sonora ha estado recibiendo sedimentos con valores anómalos de Al, Fe, Mn, Ba, V, Cu, Zn, As, entre otros.

4. Calidad del agua superficial (análisis de datos realizados por ABC laboratorios)

- Los valores de pH indican que en los primeros días después del derrame (semana del 09 al 14 de agosto), se registraron valores de pH ácidos (pH = 2.6 – 3.7) entre Sinoquipe y Aconchi; que se ubican a unos 120 – 150 km de distancia con relación a la fuente de contaminación (represo Tinajas 1).
- La distribución espacio-temporal de las concentraciones totales de los metales, indica tres zonas anómalas que están localizadas a diferente distancia de la fuente de contaminación: i) hasta los 100 km, ii) entre 120 y 150 km y iii) entre 180 y 220 km. Las dos primeras anomalías se manifiestan hasta aproximadamente el 27 de septiembre y después de esta fecha desaparecen; en cambio la anomalía registrada a la distancia entre 180 y 220 km, de la fuente de contaminación, permanece en todo el periodo de monitoreo (hasta diciembre de 2015).
- Las dos primeras anomalías pueden estar relacionada con el derrame. La tercera anomalía parece estar relacionada con la mineralización de la región.
- Las mayores concentraciones totales de los metales de interés se determinaron en la época de lluvias, y las concentraciones solubles son significativamente más bajas en comparación con las totales; lo que significa que la presencia de estos metales están preferentemente asociada a la fase sólida suspendida y no están disueltas en el agua de los ríos.
- En general, las concentraciones totales actuales, y desde enero de 2015, de los metales de interés, en las aguas superficiales de la cuenca, están dentro del intervalo de los valores de fondo reportados por la UNISON en el 2004
- La calidad del agua de la presa El Molinito, y de los sedimentos del fondo, no están influenciada por el derrame de Buena Vista del Cobre, ocurrido el pasado 06 de agosto de 2014.

5. Calidad del agua subterránea (análisis de datos realizados por ABC laboratorios)

- Para el caso del Fe en el 13.6% del total de las muestras se excede el límite de la NOM-127¹, mientras que para el Al y Mn se excede en el 7.9% y 2.2%, respectivamente. Sin embargo, las concentraciones actuales de Fe y Mn están dentro del intervalo de las concentraciones reportadas por la UNISON en el 2004, por lo que no es posible asociar la presencia actual de estos metales con el derrame ocurrido el pasado 06 de agosto de 2014. Para el caso del Al no hay valores de fondo reportados.
- En general las concentraciones de los elementos traza (As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn y Cr) no superan los límites señalados en la NOM-127, con pocas excepciones, y están dentro del intervalo de los valores de fondo reportados por la UNISON en el 2004.

6. Comportamiento futuro de las concentraciones totales de metales en aguas superficiales y subterráneas

- Las fluctuaciones temporales de las concentraciones totales de los metales de interés, tanto en aguas superficiales como subterráneas, se corresponden con las condiciones climáticas que cambian las tasas de erosión y de recarga del acuífero de la zona de estudio; como es el caso de los huracanes Norberto y Odille ocurridos entre el 06 y 26 de septiembre de 2014
- Si se considera que las rocas, suelos y sedimentos de la zona están enriquecidas en metales, es de esperarse que las fluctuaciones en las concentraciones totales tanto en aguas superficiales como subterráneas continúen ocurriendo a través del tiempo en función de la ocurrencia de lluvia y la consecuente erosión y migración de material fino hacia los ríos o hacia las aguas subterráneas someras.

7. Calidad de suelos y sedimentos

- Durante la remediación realizada por la empresa se recolectaron los materiales (sedimentos y suelos) visiblemente afectados por el derrame. Sin embargo, es importante aclarar que la cantidad de metales contenidos en los materiales removidos es una mezcla de los metales liberados por el derrame más los metales de origen natural, que existen en la cuenca; y por lo tanto no es posible diferenciarlos; por lo que se puede concluir que hubo

¹ Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización

una colecta importante, aunque difícilmente cuantificable, de los metales vertidos por el derrame del represo Tinajas 1.

- En la zona del arroyo Tinajas, en algunas muestras se supera ligeramente el valor máximo de fondo para Al, Mn, Cu y Cd. También se determinaron valores relativamente bajos pH y los valores relativamente altos de conductividad eléctrica, en algunas muestras, que son indicadores indirectos de la afectación asociada al derrame, del pasado 06 de octubre de 2014.
- En la zona de la parte alta del río Bacanuchi, en algunas muestras se supera ligeramente el valor máximo de fondo para Al, Mn, Cu y Cd. Así mismo, los valores de conductividad eléctrica son relativamente altos en algunas muestras; pero los valores de pH son neutros y ligeramente básicos; lo que no corresponde a la afectación ocasionada por el derrame del pasado 06 de agosto de 2014.
- En la zona del río Sonora, los resultados de las concentraciones de los metales son inferiores a los valores de fondo, los valores de pH son neutros y ligeramente básicos y los valores de CE son relativamente bajos; lo que indica que tanto los suelos como los sedimentos de la zona del río Sonora no están afectados por el derrame del pasado 06 de agosto de 2014.
- De acuerdo a estos resultados se delimita una zona de aproximadamente 50 km, que abarca el arroyo Tinajas y parte alta del río Bacanuchi, hasta antes del poblado del mismo nombre, donde se identifican anomalías geoquímicas intermitentes (concentraciones totales de algunos metales superiores a valores de fondo, valores bajos de pH y valores altos de conductividad eléctrica). En esta zona de aproximadamente 50 km se requiere estudios adicionales para responder a la pregunta: ¿Estas anomalías se deben al derrame del pasado 06 de agosto del 2014, o se deben a eventos antropogénicos diferentes al derrame en cuestión, o se deben a las condiciones naturales geológicas de la zona?

8. Evaluación del riesgo a la salud humana

1. La aplicación de los modelos de riesgo a la salud humana indica que no existe este tipo de riesgo por exposición a suelos contaminados con arsénico, cobre, manganeso, plomo y zinc en las poblaciones de Bacoachi (zona control), Arizpe, Aconchi, Banamichi, Huepac, Baviácora y Ures.
2. En San Felipe de Jesús tampoco se identificó riesgo a la salud humana por exposición a suelos contaminados con arsénico, cobre, manganeso y zinc.

Sin embargo, los resultados indican un riesgo para la población de San Felipe de Jesús por exposición a plomo con un 71.75 % de afectación

I. INTRODUCCIÓN

El 06 de agosto de 2014 se derramaron, al Arroyo Tinajas, del Municipio de Cananea, Sonora, unos 40,000 m³ de solución ácida enriquecida con cobre, hierro y otros metales pesados disueltos, que se denomina "solución ácida ferro-cuprífera". Esta solución ácida ferro-cuprífera se derramó del represo denominado "Tinajas 1", que se encuentra ubicado dentro de las instalaciones de la Empresa Buenavista del Cobre (BVC), subsidiaria de Grupo México (GM).

De acuerdo a información pública de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el derrame pudo haber alcanzado los siguientes cuerpos de agua superficial: el Arroyo Tinajas (17.6 km), el Río Bacanuchi (64 km) y el Río Sonora (190 km); que drena a la presa Rodolfo Félix Valdez (El Molinito) (Figura 1.1)

La composición química de solución ácida ferro-cuprífera, que estaba contenida en el "Represo Tinajas 1", fue determinada por la CONAGUA el 08 de agosto de 2014² y se presenta en la Tabla 1.1.

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

Tabla 1.1 Composición química del derrame de 40,000 m³ de solución ácida ferro-cuprífera del represo "Tinajas 1"

Con el fin de mitigar el impacto ambiental del derrame, en la cuenca del Río Sonora, Buena Vista del Cobre (BVC) aplicó las siguientes medidas de mitigación/remediación:

² Información tomada a la página WEB del FIDEICOMISO RIO SONORA.

Informe elaborado por ABC Laboratorios: Resultados del muestreo y análisis de agua, sedimentos y biota de los ríos Bacanuchi y Sonora contaminados por la fuga proveniente de la mina Buena Vista del Cobre en Cananea, hasta el 18 de septiembre de 2014.

- **Construcción del bordo de contención** para detener el avance de la solución derramada. Adicionalmente, se neutralizaron, con cal, los sitios de los cauces visiblemente impactados por el derrame, lo que permitió la precipitación de los metales asociados al derrame (Fig. 1.2).
- **Extracción de 2,366,000 litros de la solución derramada** y contenidos por el bordo de contención construido. Asumiendo que el volumen inicial de la solución derramada fue de 40,000,000 de litros y que se extrajeron 2,366,000 litros; entonces el volumen de solución derramada a los cauces de la cuenca del Río Sonora es de 37,634,000 litros.
- **Recolecta de 7,398 m³ de material visiblemente impactado (coloración amarillo-naranja)**, por el derrame y posteriormente depositado en los caminos de acceso de la presa de jales de Buena Vista del Cobre (Fig. 1.3).

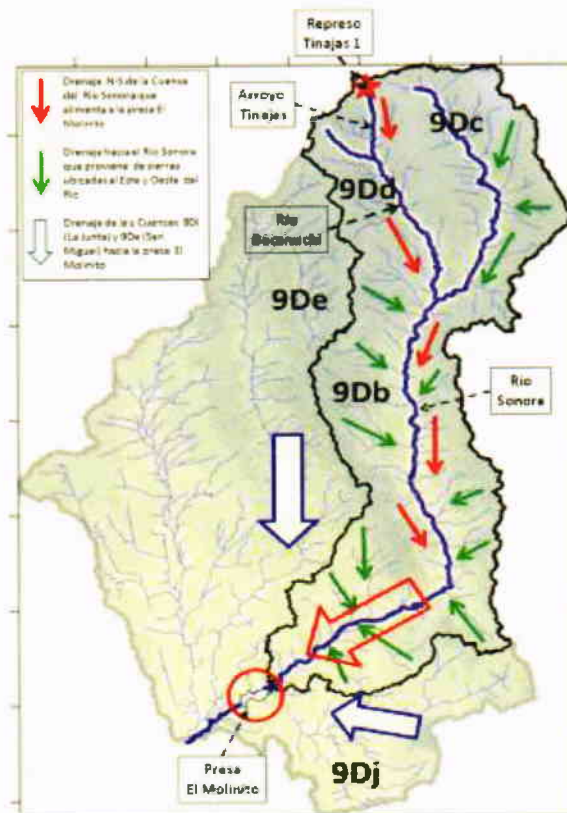


Figura 1.1 Cuerpos de agua superficial: Arroyo Tinajas, Río Bacanuchi y Río Sonora; que pudieron haber sido afectados por el derrame de aproximadamente 40,000 m³ de solución ácida ferro-cuprífera, del represo "Tinajas 1"

Con el objetivo de valorar la presencia de los metales, asociados al derrame, en los cuerpos de agua, sedimentos y suelos, para valorar el daño ambiental; después de remediación realizadas por BVC, en la cuenca del río Sonora; la UNAM firmó un convenio de colaboración con Nacional Financiera, S.N.C., institución de Banca de Desarrollo, como fiduciaria en el Fideicomiso identificado como 80724 "Río Sonora".



Figura 1.2 Bordo de contención construido para controlar el avance de la solución derramada del Represo Tinaja 1



Figura 1.3 Recolecta de material visiblemente impactado por el derrame y posteriormente depositado en los caminos de acceso de la presa de jales de Buena Vista del Cobre

II. METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir con el objetivo se planeó la estrategia que se muestra en la Figura 2.1, y que se detalla a continuación:

2.1 Delimitación de la zona de estudio: cauces y zonas de inundación

2.1 Caracterización de la fuente de contaminación: solución ácida ferro-cuprífera derramada el 06 de agosto de 2014

2.3 Determinación del estado base: Valores de fondo de los metales asociados al derrame en el medio abiótico de la zona de estudio.

2.4 Evaluación del daño ambiental en los cuerpos de agua bajo la influencia del derrame

2.5 Evaluación del daño ambiental en suelos y sedimentos:

- Valoración de la remediación realizada por Buena Vista del Cobre
- Evaluación de la calidad de suelos y sedimentos superficiales y hasta 0.5 de profundidad
- Evaluación de la calidad de suelos y sedimentos superficiales en zanjas de hasta 3.5 m de profundidad

2.7 Evaluación del riesgo a la salud humana

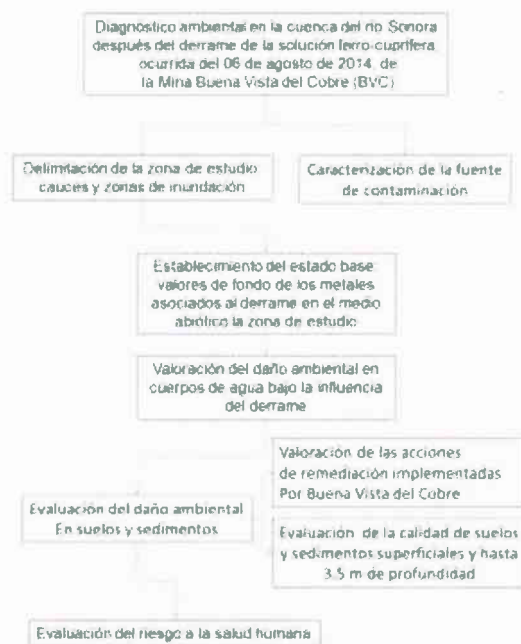


Figura 2.1 Metodología

III DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El estudio completo sobre la delimitación de la zona de estudio se puede consultar en el Anexo 1.1.

La zona de estudio se localiza en la cuenca del Río Sonora, la cual tiene una superficie de aproximadamente 26,827 km² (INEGI, 2015), y abarca un área geográfica con cambios topográficos drásticos (Fig. 3.1).

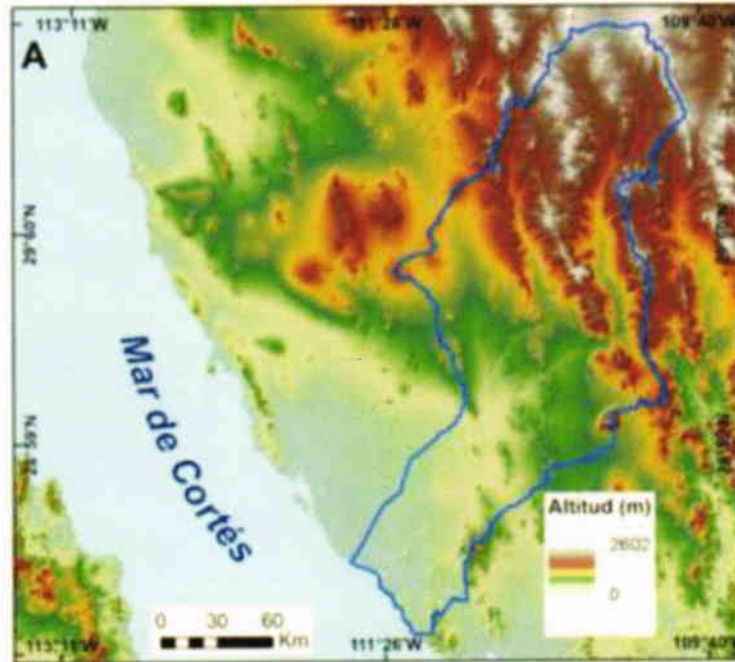


Figura 3.1 Mapa hipsométrico de la cuenca del Río Sonora (contorno azul) y zonas aledañas

Para la delimitación de la zona de estudio se utilizó un modelo digital del terreno (MDT) de alta resolución (0.5 m) derivado de datos LIDAR. Así como un mosaico de orto-fotos con una resolución de 0.1 m.

Del MDT se derivó un mapa de pendientes del terreno el cual permitió precisar los límites de las formas delineadas y definir las superficies que por su poco gradiente son susceptibles a inundarse.

La delimitación del área de estudio se hizo través de la cartografía (escala 1:20,000) que se levantó con base en el mapeo sistemático de unidades geomorfológicas. La cartografía de estas unidades geomorfológicas cubrió el tramo desde el arroyo Tinajas hasta la presa "El Molinito". El producto final está disponible en información vectorial (archivo *shapefile*) para su visualización en un

sistema de información geográfica y también se encuentra disponible para su consulta en GoogleEarth® (archivo *.KMZ)³.

El área de estudio delimitada cubre un total de 315 km². Dentro de los límites de estas unidades geomorfológicas se estableció la "Zona de influencia" que pudo haber sido afectada por el derrame, donde se programó el muestreo de suelos y sedimentos potencialmente afectados por el derrame en cuestión. Así mismo, fuera de los límites de estas unidades geomorfológicas se estableció la "Zona fuera de la influencia" del derrame para la toma de muestras de suelos y sedimentos que sirvan de valor de fondo.

Las unidades geomorfológicas identificadas en las zonas de estudio se definen a continuación:

- *Cauce activo*

Corresponde a la parte activa del cauce que normalmente lleva agua hasta la desembocadura. Si se toma en cuenta un límite físico, el cauce se encuentra delimitado en sus márgenes por riberas donde se localiza, por lo general, la vegetación riparia.

El lecho menor, también denominado aparente o normal, es aquel por el cual discurre agua incluso durante el estiaje, de ahí que en algunos casos se le denomine lecho permanente. El lecho mayor, el cual contiene al menor, sólo es invadido durante las crecidas y, en general, durante la estación anual en que el caudal aumenta y cuyo periodo depende, por su duración y por la época del año en que se sitúa, del régimen propio de cada río.

No obstante que el comportamiento hidráulico en un río tiene un componente menor y uno mayor, lo cual resulta del incremento del caudal, las características de transporte de sedimentos, erosión y límites de un cauce fluvial varían en función de la dinámica del flujo, así como de los materiales geológicos por los cuales discurre un río. El Río Sonora presenta algunos meandros de cauce sinuoso y de corriente rápida. Por migración lateral de la corriente, los depósitos formados se extienden lateralmente y corriente abajo. Como cauce activo se definió aquí al lecho mayor y menor. La superficie aproximada del cauce activo es de aproximadamente 13.5 km².

- *Sistema de canales abandonados*

Corresponde a un sistema de canales abandonados en depósitos masivos localizados en los márgenes cercanos al cauce activo. Debido a que los canales conservan aún su morfología pueden ser reactivados por un incremento en la descarga. Los canales se encuentran sobre depósitos masivos arenosos con una

^{3 3} En el Anexo I se puede consultar el informe completo de este estudio y los archivos "shapefile" y "KMZ"

morfología en planta de abanico. Los canales forman un drenaje de patrón paralelo y son resultado del acarreo y subsecuentes depósitos de los materiales que transportó el cauce principal en un evento determinado.

En esta forma se delimitaron los canales con base en la delimitación del abanico en el que se encuentran. Los sistemas de canales abandonados y las superficies sobre la que se encuentran tienen una superficie de aproximadamente 28.8 km².

- *Bajadas*

Son características de zonas desérticas, áridas y semiáridas. En el área de estudio se encuentran en la zona de desembocadura de ríos tributarios en la zona de montañas y al pie de los lomeríos. Un rasgo característico es su forma en forma de pedimento donde, presumiblemente, hay ausencia de restos orgánicos, tienen una clasificación granulométrica, estratificación variable, predominio de conglomerados y arenas. En planta presentan el aspecto de un abanico y se originan a partir de la sedimentación de la carga sólida transportada por una corriente fluvial allí donde ésta pierde súbitamente fuerza debido a un cambio brusco del gradiente topográfico o disminución de la potencia fluvial.

Generalmente los sedimentos más gruesos se hallan localizados en las zonas proximales, mientras que los más finos se hallan hacia las zonas distales del abanico.

Las zonas de bajadas en el área de estudio se localizan en el curso alto del arroyo Tinajas y, por lo general, no aportan sedimento al cauce activo de manera continua, sin embargo, en crecidas extraordinarias pueden alimentar de sedimentos al río principal. Las bajadas ocupan un área de aproximadamente 0.6 km².

- *Depósitos fluviales y canales tributarios*

Corresponde al aporte de tributarios al canal principal, debido a las diferencias que existen entre la potencia fluvial del cauce principal con respecto los tributarios, estos llegan a formar depósitos en forma de abanico que en algunos casos son coalescentes con los depósitos que transporta el canal principal. Estos depósitos se encuentran en el curso alto del río y ocupan un área de aproximadamente 0.7 km².

- *Depósitos masivos de arrollada*

Corresponde con depósitos con una forma de abanico que han sido transportados y acumulados por picos de descarga extraordinarios. A lo largo del cauce principal del Río Sonora se presentan varios depósitos de este tipo y es probable que su abandono esté relacionado con procesos de avulsión. La formación de los

depósitos de arrollada son indicativos de tramos donde la potencia fluvial disminuye de importante y por ello se da la acumulación masiva de sedimentos. Los depósitos ocupan un área de aproximadamente 7.8 km².

- *Llanuras de inundación excepcional*

Corresponden a porciones del fondo de un valle que puede llegar a ser cubierta por las aguas durante avenidas extraordinarias. Las llanuras están compuestas por dos miembros, uno en la base donde se encuentra el aluvión de cauce la cual subyace a la llanura de inundación excepcional la cual resulta de una acumulación constante. Las llanuras de inundación contienen capas de material fino que el río transporta en estado de suspensión.

Las llanuras de inundación suelen ser activas cuando se vencen umbrales por precipitaciones intensas sobre toda la cuenca o en una parte de esta. Los fenómenos meteorológicos como son los huracanes y depresiones tropicales producen una alta intensidad de la precipitación pluvial, lo que desencadena un pico de descarga instantáneo que produce un transporte masivo de materiales. Este tipo de avenidas no suelen ser frecuentes, sin embargo, los impactos que generan una vez que tienen lugar suelen modificar de forma drástica la topografía pre-existente del valle por donde fluye el río. A pesar de que las llanuras de inundación suelen estar en el curso bajo de los ríos, en el área de estudios éstas se encuentran desde las partes altas hasta las porciones bajas y abarcan un área de aproximadamente 18.7 km².

- *Lomerío*

Corresponde a formas positivas del relieve con poco desnivel que no son inundables, sin embargo, estos en el área de estudio se encuentran en la zona activa del cauce y en la superficie de inundación. Estas formas se encuentran en el curso alto de río y ocupan un área de aproximadamente 0.17 km².

- *Superficie de inundación*

Estas formas se encuentran a lo largo de todo el curso del río y tienen una topografía llana cercana al cauce principal. Son zonas inundables por crecidas en los valores de descarga y tras picos instantáneos. La actividad en estas superficies depende de los periodos de recurrencia que tengan las inundaciones para la zona de estudio. En algunos casos, donde la topografía es abierta y el río discurre sobre una superficie con poca pendiente, los ríos suelen acumular gran cantidad de sedimento y suelen incluso formar numerosos brazos durante las crecidas e incluso cambiar el curso (avulsión). En estos sitios es frecuente que los ríos inunden amplias superficies que en algunos casos pueden dejar cuerpos de aguas hasta por un par de años, aunque en el caso del Río Sonora estas condiciones no se cumplen. En este tipo de zonas llanas se suelen hacer parcelas

para el riego, debido a la topografía favorece el manejo del río para extraer agua. En el área de estudio las superficies inundables tienen un área de 14.5 km².

- *Superficie de inundación antropizadas*

Se caracterizan por las actividades humanas, principalmente agrícolas, tienen una amplia presencia. Estas superficies se encuentran a lo largo del curso del río principal y ocupan la mayor extensión en la zona de estudio con un área de aproximada de 232.9 km².

- *Terrazas*

Estas evidencian la presencia de un paleo-nivel. Tienen una topografía plana y tener varios niveles los cuales aumentan en edad conforme está en una posición topográfica más alta. La formación de las terrazas puede deberse a factores tectónicos como climáticos y resultan de un incremento de la incisión. De forma general existen dos tipos principales de terrazas, unas que contienen materiales fluviales constituidas con los materiales del fondo del valle y otras que corresponde a la superficie abandonada de basamento rocoso, llamadas terrazas de sustrato (*strath terrace*). A pesar de que las terrazas son indicativas del antiguo nivel del río, en eventos de crecidas extraordinarias, aquellas más cercanas al cauce activo podrían ser inundadas. En el área de estudio las terrazas se encuentran a lo largo del curso del río y abarcan un área de alrededor de 0.3 km².

En la tabla 3.1 se muestra el total de la superficie de las unidades geomorfológicas mapeadas y en la Figura 3.2 se muestran ejemplos de diferentes partes de la zona de estudio delimitada.

Forma fluvial	Area (km ²)
Sistema de canales abandonados	25.8
Bajadas	0.6
Cauce activo	13.5
Depósitos fluviales y canales tributarios	0.8
Depósitos masivos de arrollada	7.9
Llanuras de inundación excepcional	18.8
Lomerío	0.2
Superficie de inundación	14.5
Superficie de inundación antropizada	232.9
Terrazas	0.3
Total	315.3

Tabla 3.1 Superficie de la unidades geomorfológicas mapeadas



Leyenda








-  Superficie de inundación
-  Llanuras de inundación excepcional
-  Depósitos fluviales y canales tributarios
-  Superficie de inundación antropizadas
-  Cauce activo
-  Depósitos masivos de arrollada
-  Terrazas



Figura 3.2 Ejemplos de diferentes partes de la zona de estudio delimitada de acuerdo a los criterios geomorfológicos

IV. CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE CONTAMINACIÓN

El estudio completo sobre la caracterización de la fuente de contaminación se puede consultar en los Anexos 1.2 y 1.3 que corresponden a Informes de avances entregados al Fideicomiso Río Sonora el 26.11.14⁴ y el 22.05.15⁵.

Los principales resultados reportados en los Informes antes mencionados se detallan a continuación:

Las concentraciones obtenidas en la solución del Represo Tinajas 1 y muestreada por el grupo de la UNAM corroboran los datos obtenidos por CONAGUA (Tabla 4.1):

- a) Las mayores concentraciones de los metales en el derrame corresponden al Fe, Al, Cu, Mn y Zn
- b) Las concentraciones de As, Cd, Cr, Pb y Ni son relativamente bajas
- c) En cuanto al Hg, Ba y Sb, no fueron detectados en la solución derramada

Institución	UNAM			Conagua
	02/10/2104			08/08/2014
Fecha muestreo	1	2	media	1
Al, mg/L	393	499	446	461
As, mg/L	0.85	0.62	0.73	42.7
Ba, mg/L	ND	ND	ND	ND
Cd, mg/L	1.01	0.98	0.99	7.76
Cu, mg/L	321	266	293	114
Cr, mg/L	0.25	0.22	0.23	1.54
Fe, mg/L	518	458	488	1080
Mn, mg/L	163.5	149.5	156.5	98.1
Hg, mg/L	ND	ND	ND	ND
Ni, mg/L	1.94	1.80	1.87	11
Pb, mg/L	0.36	0.21	0.28	2.5
Sb, mg/L	ND	ND	ND	ND
Zn, mg/L	72	54	63	51

Tabla 4.1 Comparación de las concentraciones totales reportadas por la CONAGUA (muestreo 08/08/14) y la UNAM (muestreo 02/10/14) de la solución preñada que se derramó a los cuerpos de agua de la cuenca del río Sonora

4 Diagnóstico de la situación ambiental actual asociada al derrame de la solución ácida ferro-cuprífera de Buena Vista del Cobre hacia la cuenca del río Sonora. Este informe fue elaborado por el Instituto de Geología de la UNAM y entregado al FIDEICOMISO el 26.11.14. En el capítulo 2 de este informe se detalla información sobre los Terreros (que son rocas de diferente granulometría cuya lixiviación da origen a la solución preñada que se almacenaba en el Represo Tinajas), solución preñada derramada y los sedimentos del fondo del represo Tinajas 1 que contenía a la solución derramada.

5 Informe de avances "Valoración de la presencia de metales, asociados al derrame de Buena Vista del Cobre (BVC), en sedimentos y suelos de la Cuenca del Río Sonora, a 6 meses de ocurrido el derrame y después de las acciones de remediación de BVC", Elaborado por el Instituto de Geología y entregado al FIDEICOMISO, el 22.05.2015

Adicionalmente, los resultados de los análisis del líquido derramado indican altos valores de conductividad eléctrica (5.65 y 5.95 mS/cm) que corresponde a los elevados contenidos de sulfatos; así como valores de pH entre 2.2 y 2.3.

En el fondo del represo Tinajas 1 se observó un lodo (sedimento) de color amarillo-naranja (Fig. 4.1) producto de la precipitación por la interacción entre la solución ácida ferro-cuprífera y el material geológico de la zona. Este material fue muestreado para su respectiva caracterización con el fin de tener datos que permitan seguir la huella de la solución derramada a la Cuenca del Río Sonora.

En la Tabla 4.2 se presentan las concentraciones de los metales de interés en las muestras de los sedimentos del fondo del represo Tinajas 1

Muestra	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn	Hg	Fe
	mg/Kg											%
1	58.6	117.8	<LOD	16.9	672.6	705.6	10.4	78.4	<LOD	202.4	<LOD	3.4
2	101.5	55.9	6.5	6	894.7	4456.5	17.1	50.7	4.4	314.2	0.1	4.2
3	57.5	60.1	<LOD	<LOD	376.6	528.8	<LOD	211.4	<LOD	340.3	0	1.9
LD	0.07	0.1	0.02	0.003	0.122	0.007	0.01	0.03	0.05	0.007	0.0005	1.00E-06

LD = Limite de detección

Tabla 4.2 Concentración total de los elementos traza (potencialmente tóxicos) en muestras sedimentos del represo Tinajas 1

Así mismo, los resultados de Difracción de Rayos X en los sedimentos, del fondo del represo Tinajas 1, que se forman durante la interacción de la solución ácida ferro-cuprífera con el medio litológico de la zona, indican la presencia del mineral denominado jarosita ($XFe_3(SO_4)_2(OH)_6$); que es un mineral secundario de Fe, que se caracteriza por su coloración amarillo-naranja (Fig. 4.1) y por su contenido de elementos potencialmente tóxicos como Pb, Ba, As, Zn, Mn, que se atrapan en su estructura cristalina debido a procesos de sorción.

Utilizando la técnica de MEB-EDS, en las muestra de sedimentos del represo se identificaron partículas que pueden estar relacionadas con minerales secundario de Fe (mezclados mecánicamente con aluminosilicatos) con contenidos de elementos potencialmente tóxicos como Pb, Ba, As, Zn, Mn, etc. (Fig. 4.2); lo que es una evidencia del control de la movilidad de los contaminantes en las fases sólidas del medio estudiado.

Los resultados del análisis en el *Lawrence Berkeley Laboratory* (μ -XANES y μ XRF) corroboran la presencia del mineral secundario jarosita; además de la jarosita arsenical y scwhertmannita; que contiene en su estructura Zn, Cu, Pb y Ba (Fig. 4.3).

Por otro lado, se realizó un estudio de Elementos de Tierras Raras (ETR) como posibles trazadores de la contaminación residual asociada el derrame con la

finalidad de discriminar las fuentes, naturales y antropogénicas en suelos y sedimentos.

En la fuente de contaminación el patrón de los EPT se caracteriza por una importante anomalía negativa de Eu y una anomalía positiva de Ce. El detalle de estos resultados se puede consultar en el Anexo 1.4.

En conclusión, se puede afirmar que el tránsito de la solución derramada (solución ácida ferro-cuprífera) en el medio abiótico, de la cuenca del río Sonora, se puede rastrear por cualquiera de las siguientes características en el medio abiótico afectado:

- Bajos valores de pH
- Altas concentraciones de metales (mayores a los valores de fondo)
- Altos valores de conductividad eléctrica (CE)
- Presencia del mineral jarosita que le confiere un color amarillo-naranja al medio abiótico afectado por el derrame



NOTESE el color amarillo-naranja debido a la precipitación de jarosita

Figura 4.1 Fotografía la solución ácida ferro-cuprífera derramada (Represo Tinajas 1) y precipitados de color amarillo-naranja, sobre rocas y sedimentos debido a la interacción geoquímica de la solución ácida con el medio litológico

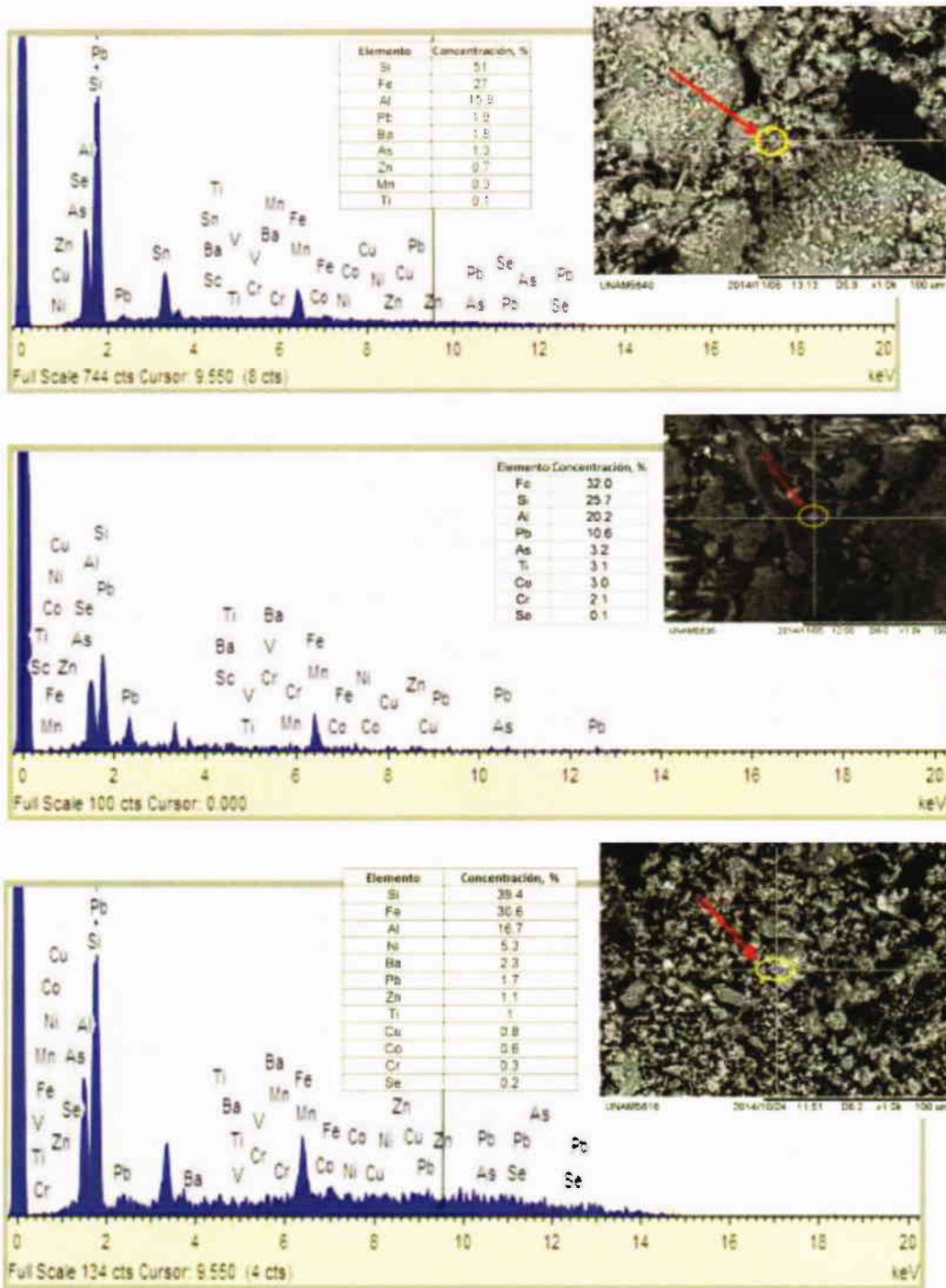


Figura 4.2 Imagen y microanálisis MEB-EDS en muestras de precipitados en el fondo del Represo Tinajas 1

Sonora13 Map (Sonora13_Elemental_000.xrf).
 Position 0 y 1: Jarosite, Fe-XANES)

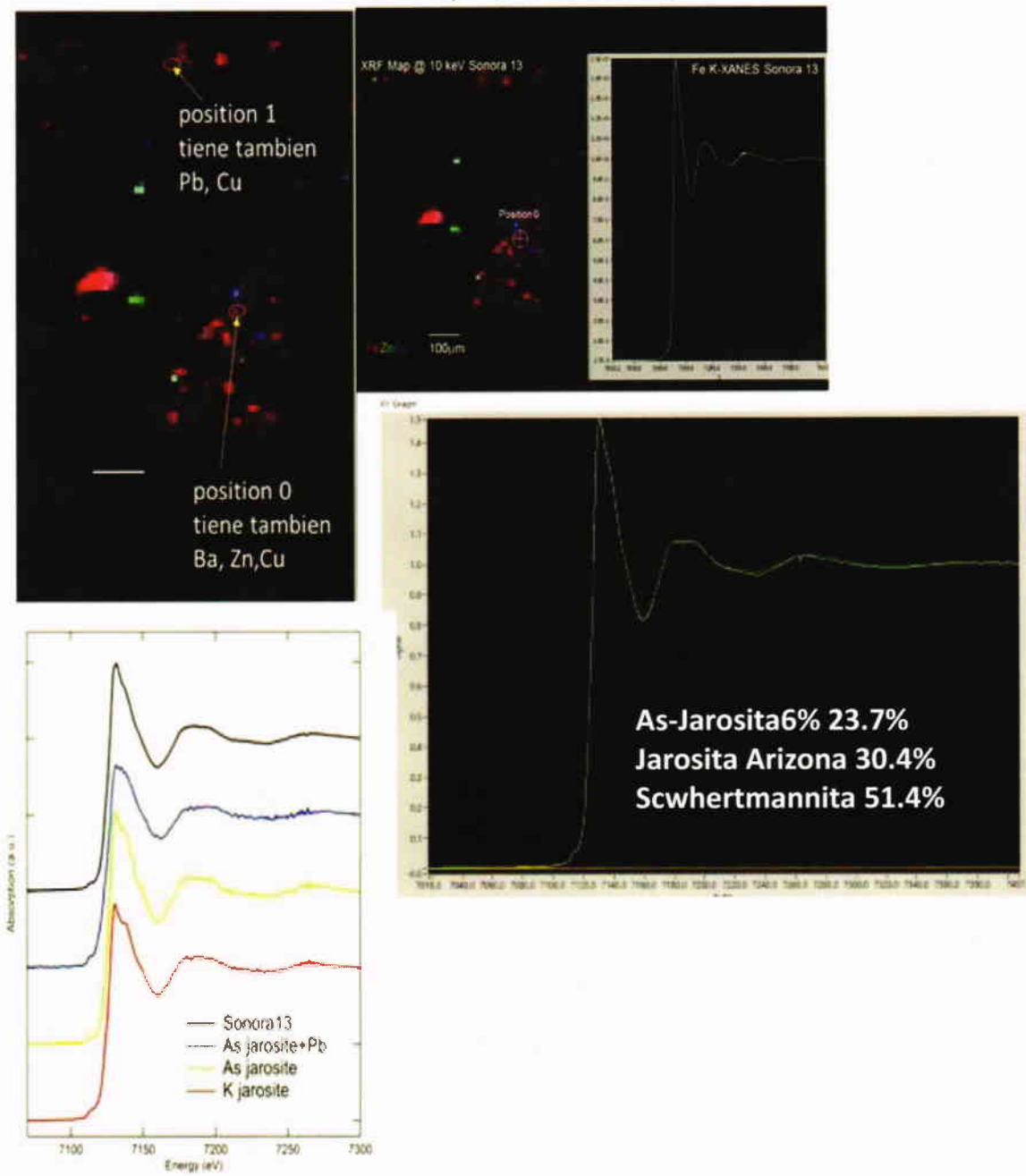


Figura 4.3 Resultados por μ -XANES y μ XRF (Lawrence Berkeley Laboratory)

V. DETERMINACIÓN DEL ESTADO BASE EL MEDIO ABIÓTICO

5.1 Antecedentes

La Cuenca del Río Sonora, empezó a formarse hace ~20 millones de años. Las rocas que rodean la cuenca se caracterizan por las elevadas concentraciones de elementos mayores como aluminio (82,733 mg/kg - 91,849 mg/kg), hierro (59,640 mg/kg - 68,460 mg/kg) y manganeso (789.8 mg/kg - 1364.2 mg/kg). Así mismo, se caracterizan por contener concentraciones máximas (mg/kg) de hasta 1123, 197, 107, 11, 107, 38, 13, 0.2, 0.5, 0.21 y 53 de bario (Ba), vanadio (V), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), níquel (Ni), arsénico (As), cadmio (Cd), antimonio (Sb), mercurio (Hg) y cromo (Cr), respectivamente⁶.

Por lo tanto se puede afirmar que desde hace 20 millones de año, debido a los procesos de erosión de las sierras circundantes, el río Sonora ha estado recibiendo sedimentos con valores anómalos de Al, Fe, Mn, Ba, V, Cu, Zn, As, entre otros.

El análisis de aproximadamente 3,625 muestras de sedimentos de arroyo, colectadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) entre 1995 y 2000, indica que las concentraciones naturales los metales de interés, asociados al derrame, en los sedimentos de la cuenca del Río Sonora y zonas adyacentes son relativamente altas y que varían ampliamente (Tabla 5.1).

La distribución de los metales de interés, en los sedimentos de arroyo, varía según la parte de la cuenca; lo que está determinado por la litología que cambia desde la parte alta (norte) hasta la parte baja (sur); lo que permite concluir que la zona de estudio se debe dividir en partes; y que cada una de estas partes debe tener sus propios valores de fondo; y no asumir un único valor de fondo para toda la cuenca del río Sonora.

Como ejemplo de este fenómeno, en la Figura 5.1 se muestra la distribución de las concentraciones totales de los elementos mayores⁷ (aluminio "Al", Hierro "Fe" y manganeso "Mn"), y de los elementos traza⁸ (cobre "Cu", plomo "Pb" y arsénico

⁶ González-León, C.M., Valencia, V., López, M., Bellon, H., Valencia Moreno, M.A., Calmus, T., 2010, The Arizpe sub-basin: sedimentary and magmatic evolution of the Basin and Range in north-central Sonora, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 27, p. 292-312. [http://satori.geociencias.unam.mx/27-2/\(08\)GonzalezLeon.pdf](http://satori.geociencias.unam.mx/27-2/(08)GonzalezLeon.pdf)

⁷ Elementos mayores (EM): Son los que están presentes de manera natural en altas concentraciones (> 0.1%) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos). Estos EM controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas. Nota: 0.1% equivale a 1,000 mg/kg.

⁸ Elementos traza (ET): Son los que están presentes de manera natural en bajas concentraciones (< 0.1%) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos); pero que pueden incrementar su concentración, en el medio abiótico, debido a procesos contaminantes por actividades humanas.

"As"). Los demás elementos asociados al derrame muestran una distribución similar (Ver Anexo 1.3).

En la tabla 5.2 se muestra los valores de fondo distribuidos por zonas, que se delimitaron por su ubicación geográfica y características litológicas.

Elemento	Unidades	Promedio	Mínimo	Máximo
Al	%	2.4	0.3	7.0
As	mg/kg	18.4	0.3	2100.0
Ba	mg/kg	216.2	24.0	1436.0
Cd	mg/kg	0.9	0.0	61.6
Cr	mg/kg	59.5	1.0	547.0
Cu	mg/kg	54.0	1.0	6471.0
Fe	%	3.7	0.9	18.3
Mn	mg/kg	661.7	46.0	5319.0
Ni	mg/kg	14.8	0.9	838.0
Pb	mg/kg	47.7	2.0	17612.0
Sb	mg/kg	3.0	0.2	221.0
Zn	mg/kg	95.7	13.0	3502.0

**Tabla 5.1 Estadística descriptiva de las concentraciones de los metales de interés en los sedimentos de arroyo de la cuenca del Río Sonora y zonas aledañas (n = 3,625 muestras)
(Fuente SGM, 1995 – 2000)**

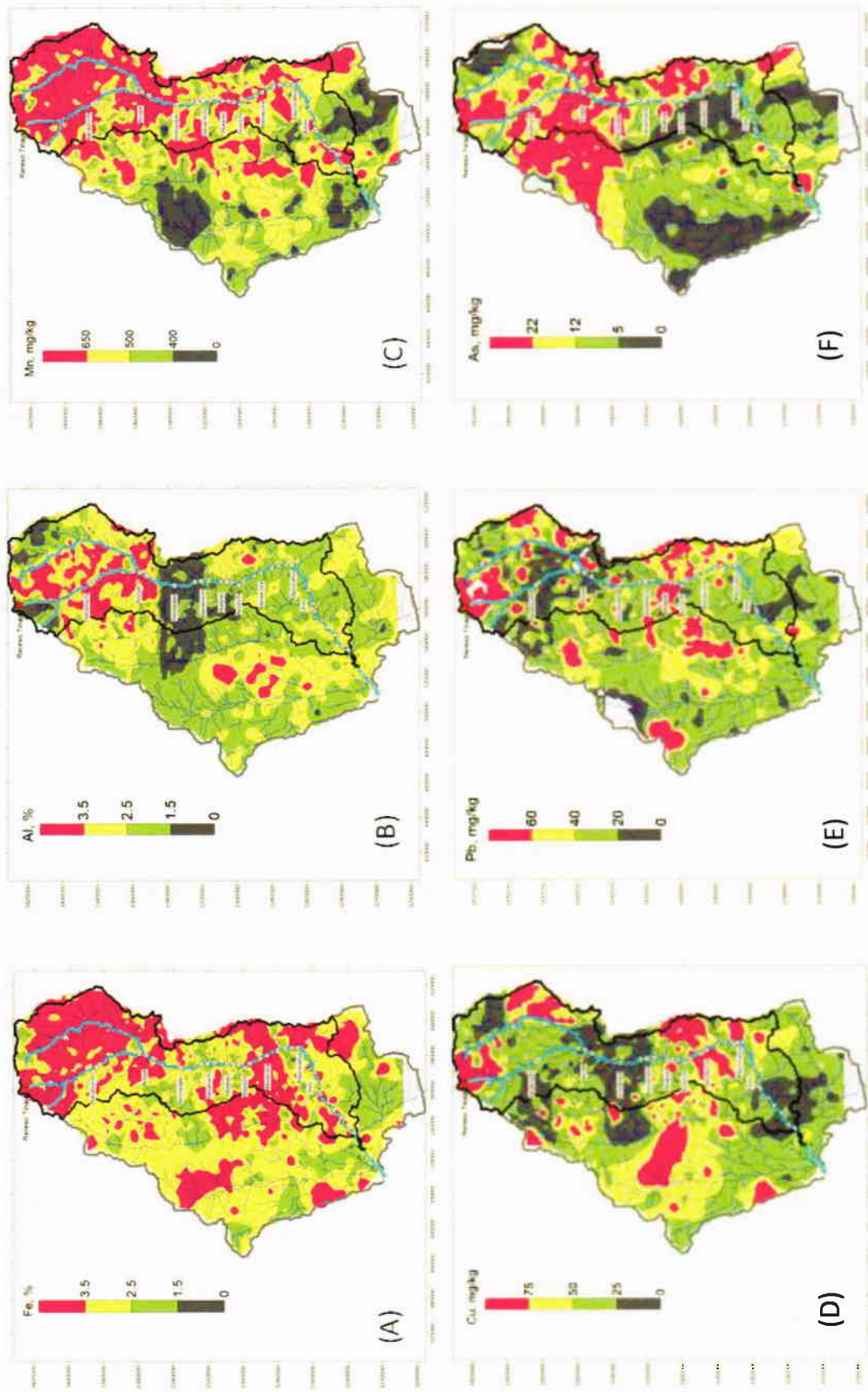


Figura 5.1 Distribución de la concentración total de algunos de los metales de interés que ocurren naturalmente en la zona
 (Fuente SGM, 1995 – 2000)

	Al	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
	%	mg/kg					%	mg/kg				
Tinajas (n = 136)												
Mínimo	0.6	2	13	ND	8	12	1.2	158	8	2	0.6	33
Promedio	3.1	28	311	1.1	55	96	3.6	878	21	87	6	186
Máximo	6.2	253	1436	11	222	747	9.7	2517	57	1895	128	1309
Bacanuchi (n = 224)												
Mínimo	1.3	2	80	0.5	8	3	1.1	236	3	2	0.2	43
Promedio	3.5	20	339	0.7	77	30	3.6	693	25	25	4	100
Máximo	5.9	397	989	5.9	201	79	8.2	1338	105	375	76	1146
Arizpe – Sinoquipe (n = 281)												
Mínimo	0.6	2	24	0.5	4	2	1.0	46	3	2	0.2	23
Promedio	3.2	27	330	1.0	56	29	3.1	641	19	35	5	99
Máximo	7.0	210	1379	16	230	82	6.1	1234	50	1323	43	919
Banámichi - San Felipe (n = 265)												
Mínimo	0.3	2	23	0.5	1	3	0.6	119	2	9	0.6	21
Promedio	1.3	17	174	1.6	18	24	2.8	619	14	39	4	86
Máximo	4.2	132	624	11.0	177	258	7.5	2933	838	648	80	1606
Baviácora (n = 209)												
Mínimo	0.5	1	37	0.5	3	19	1.4	176	1	17	0.3	35
Promedio	2.4	39	171	1.6	70	116	3.8	697	11	84	6	143
Máximo	5.1	2092	724	62	482	6471	14.0	2931	209	1533	209	3220
Mazocahui-Ures (n = 325)												
Mínimo	0.8	0	25	0.5	19	15	1.1	197	1	9	0.3	23
Promedio	2.1	5	123	0.6	71	54	3.6	571	11	33	1	67
Máximo	4.3	30	487	3.9	344	298	13.0	3390	35	170	5	193
La Junta (n = 18)												
Mínimo	1.1	5	116	0.5	21	20	1.5	256	7	14	0.3	24
Promedio	2.3	18	180	0.8	53	35	2.5	507	16	30	1	58
Máximo	3.5	116	240	3.3	152	66	4.8	990	61	77	6	113

**Tabla 5.2 Distribución de valores de fondo en sedimentos por zona
(Fuente SGM, 1995 – 2000)**

5.2 Línea base, UNAM 2015

A) Rocas

El informe completo del estudio de línea base en rocas se puede consultar en el Anexo 1.5.

A.1) Actividades mineras en la zona de estudio

La cuenca del río Sonora presenta una gran cantidad de zonas mineralizadas, dentro de las cuales existen algunas minas activas y otras que estuvieron en operación en algún tiempo (Fig. 5.2).

Los principales desarrollos mineros corresponden, de norte a sur, a Buenavista del Cobre (Cu-Mo) en Cananea, El Gachi (Pb-Zn) al este de Arizpe, Santa Elena (Au) al este de Banámichi, San Felipe (Cu, Pb, Zn y Au), El Jaralito (W), y Washington (Cu, W y Mo), al oeste y este de Baviácora respectivamente.



Figura 5.2 Distribución geográfica de las actividades mineras dentro del área de estudio. Los puntos verdes indican las zonas mineralizadas más importantes, de las cuales tres están en actividad a la fecha de entrega del presente informe (Buenavista del Cobre, El Jaralito y Santa Elena).

A.2) Muestreo

Para establecer los sitios de muestreo se consideró la variación litológica de la zona de estudio. Como base geológica se usaron los mapas geológico-mineros publicados por el Servicio Geológico Mexicano a escala 1:50,000 y 1:250,000. A partir de estos mapas geológicos se establecieron 6 grupos divididos en 11 unidades litológicas (Fig. 5.3) considerando su naturaleza, sedimentaria, ígnea o metamórfica, y su grado de preservación.

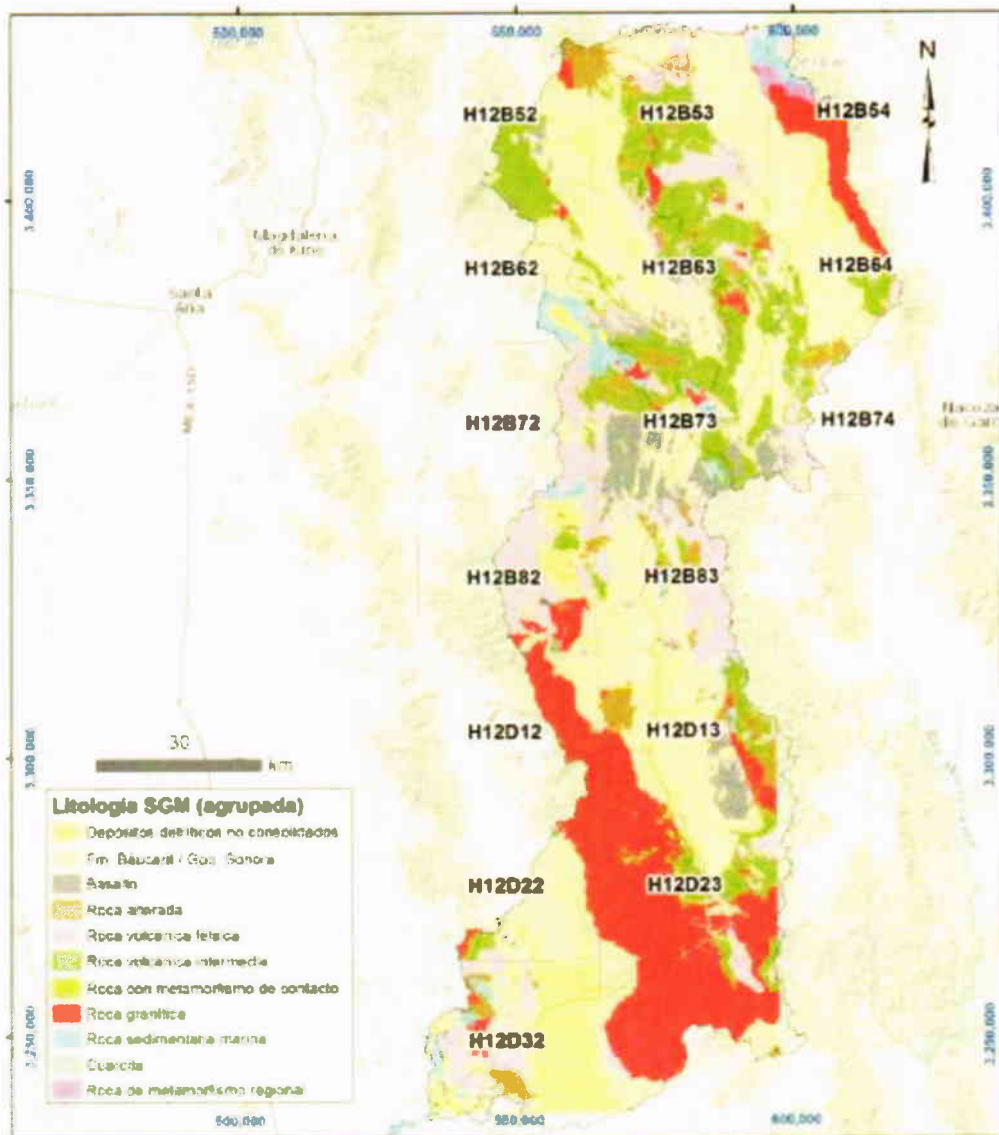


Figura 5.3 Mapa mostrando la agrupación de las 11 litologías de la cuenca Río Sonora.

Se delimitaron tres sectores con características geológicas, topográficas e hidrológicas diferentes: el sector A, localizado aguas abajo del represo Tinajas, y corresponde al área de influencia del arroyo Tinajas y el río Bacanuchi; el sector B,

que corresponde a la sub-cuenca Sonora-Bacoachi, la cual no está conectada al sistema anterior, y es hidrológicamente más activa; el sector C, el más distal en relación a la zona del derrame, a lo largo del río Sonora entre Arizpe y la presa Rodolfo Félix Valdez, conocida como presa El Molinito.

En estos tres sectores se tomaron un total de 83 muestras de rocas (Figura 5.4). Los análisis se realizaron en los laboratorios de ActLabs en Canadá, utilizando el método "Code 4LITHO (11+) Major Elements Fusion ICP(WRA)", para determinar las concentraciones de elementos mayores (superiores a 1% en peso), y por el método "Trace Elements Fusion ICP/MS(WRA4B2)", para determinar la concentración de los elementos traza (menores a 1% en peso), considerados de interés para los fines perseguidos en el presente informe.

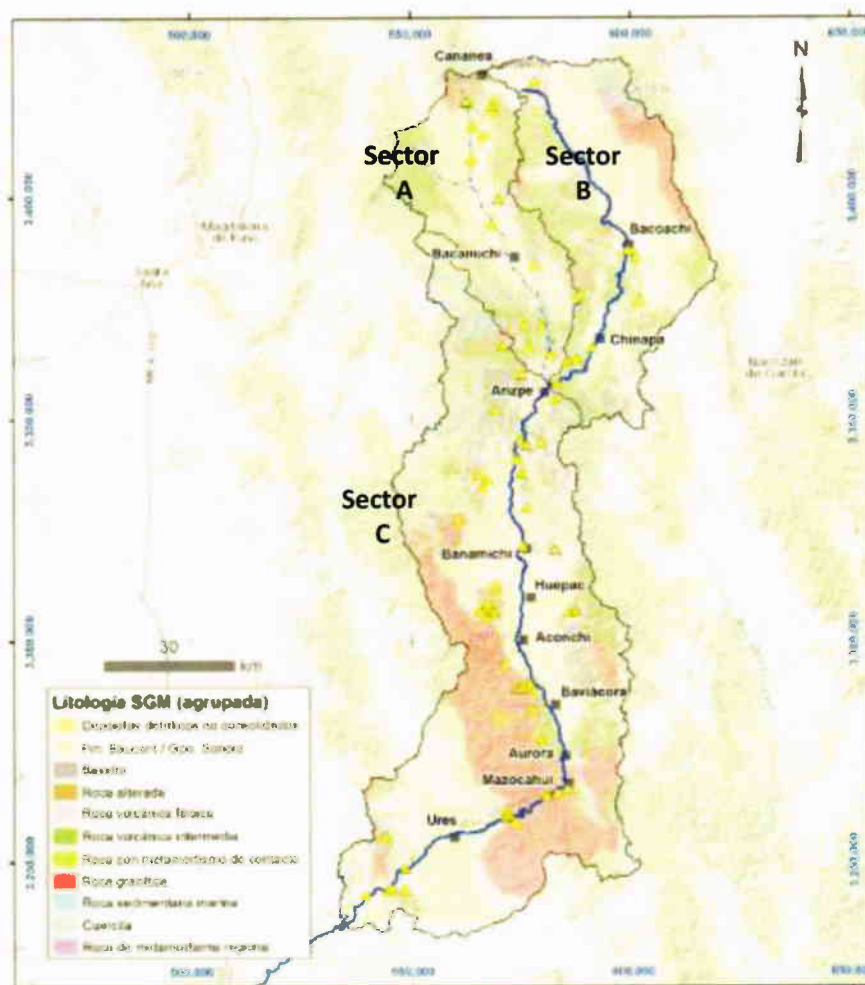


Figura 5.4 Mapa de litología agrupada del área de estudio mostrando la localización de las muestras de roca colectadas para estudios geoquímicos. En este mapa se puede observar la representatividad del muestreo realizado

A.3) Resultados

En la Tabla 5.3 se muestra la estadística descriptiva de las concentraciones totales de los elementos químicos analizados.

Elemento	Unidad	Mínimo	Promedio	Máximo
Al	%	0.15	6.62	9.26
As	mg/kg	2.5	21.78	480
Ba	mg/kg	7	813.11	3114
Cr	mg/kg	10	36.22	230
Cu	mg/kg	5	39.45	910
Fe	%	0.15	2.76	11.94
Mn	%	0	0.11	3.74
Ni	mg/kg	10	15.37	140
Pb	mg/kg	2.5	160.16	4280
Sb	mg/kg	0.25	4.19	36.3
Zn	mg/kg	15	336.37	10001

Nota: Las concentraciones reportadas originalmente por el laboratorio de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO se recalcularon para obtener las concentraciones de Al, Fe y Mn.

Tabla 5.3 Estadística descriptiva de las concentraciones totales de los elementos químicos analizados en muestras de rocas fuera de la zona de influencia del derrame (Valores de fondo en rocas)

La evaluación de las concentraciones de elementos mayores y traza en rocas de los diferentes grupos litológicos revela la presencia de anomalías positivas en relación a la composición promedio de la corteza continental superior (CCS), lo que se puede observar en la Figuras 5.5.

En el caso de los elementos mayores, las anomalías geoquímicas son relativamente pequeñas y se observan en Ca, Mn y P (expresados como óxidos) en particular en el sector C (porción sur del área de estudio). El Mn y el Ca son elementos muy móviles, comúnmente removidos por procesos hidrotermales y de intemperismo, y que se depositan en cavidades, poros y fracturas abiertas de las rocas en forma de dendritas para el Mn, y vetillas y caliche en el caso del Ca. Fuera del Ca y del Mn, los elementos mayores, como el Al y el Fe muestran valores típicos de la CCS

En general, en los tres sectores, muestran patrones similares con enriquecimientos relativos en Sb, As y Ag. Además, en el sector C, se observan anomalías positivas de Pb, Bi y Zn con respecto a los valores de la CCS, lo cual se atribuye a la influencia de las rocas muestreadas en las zonas mineralizadas del distrito minero de San Felipe y la región de Ures.

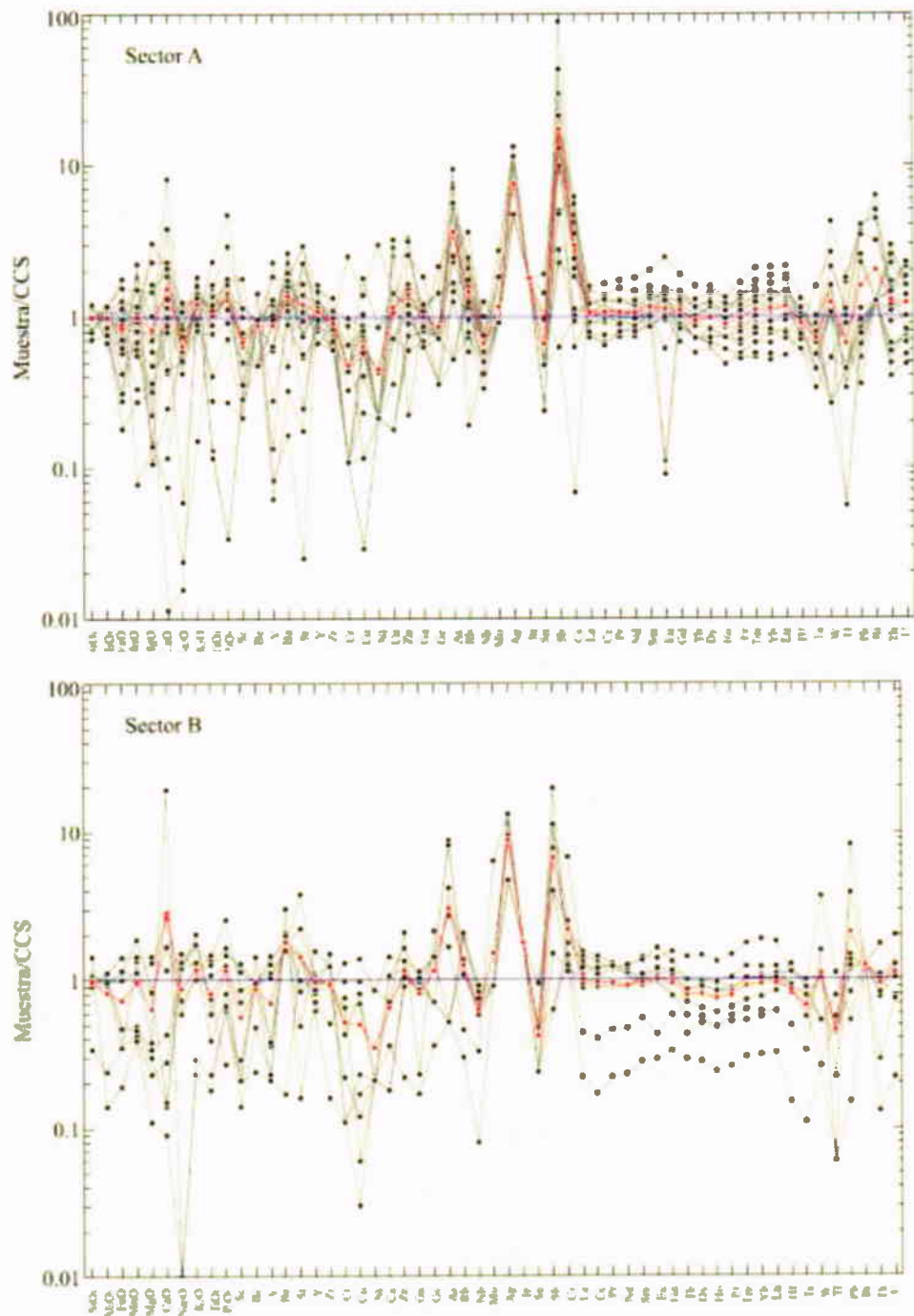


Figura 5.5. Concentraciones de elementos mayores y traza normalizados a los valores de la Corteza Continental Superior (CCS) de Rudnick y Gao (2003) representados por la línea azul. La línea roja muestra el promedio aritmético elemental de las rocas de cada uno de los sectores A, B y C

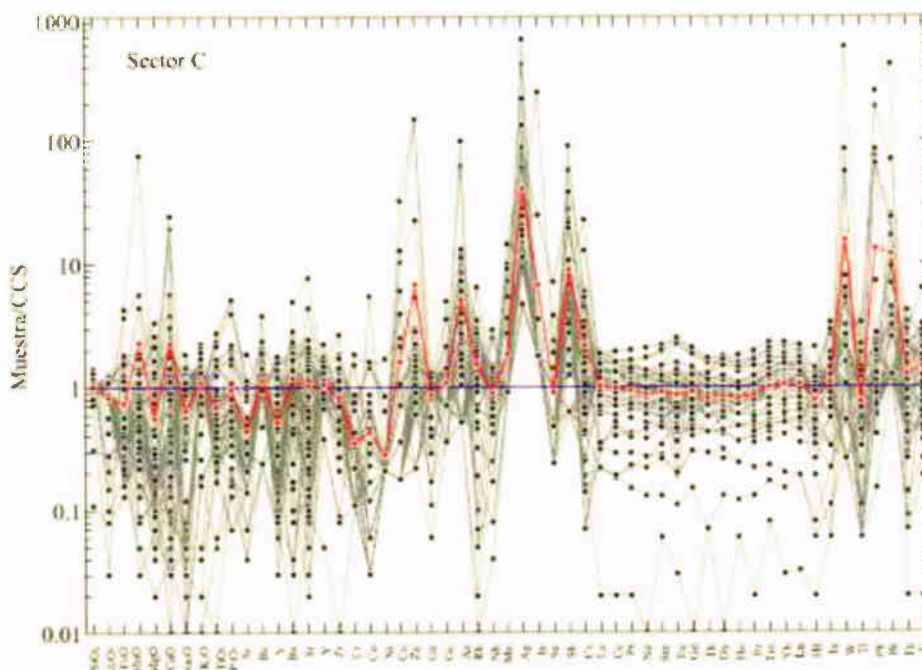


Figura 5.5 Concentraciones de elementos mayores y traza normalizados a los valores de la Corteza Continental Superior (CCS) de Rudnick y Gao (2003) representados por la línea azul. La línea roja muestra el promedio aritmético elemental de las rocas de cada uno de los sectores A, B y C (Continuación)

B) Sedimentos y suelos

Para determinar las concentraciones naturales de los metales de interés, en julio de 2015 se colectaron 90 muestras de suelo y sedimento en la cuenca del río Sonora (Fig. 5.6), en zonas fuera de la influencia del derrame. Así mismo; en noviembre de 2015 se colectaron 169 muestras de suelo y sedimentos (Fig. 5.6) en la cuenca del río San Miguel, que es paralela a la cuenca del río Sonora.

Los respectivos informes de muestreo se pueden consultar en el Apéndice de Muestreo 1.

De los trece elementos químicos, considerados por la CONAGUA, en la solución ácida ferro-cuprífera, que se derramó a la Cuenca del río Sonora, no fueron detectados bario (Ba), mercurio (Hg), ni antimonio (Sb). Por lo tanto en este estudio solamente se consideran aluminio (Al), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), fierro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn).

Los análisis fueron realizados en Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geología de la UNAM

En un primer momento se determinaron las concentraciones totales de los elementos químicos de interés por Fluorescencia de Rayos X, Método EPA 6200

(Apéndice de Laboratorio 1A). Así mismo, se determinaron los valores de pH y conductividad eléctrica.

Sin embargo, para cumplir con la normatividad ambiental mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004), para suelos contaminados, se determinaron las concentraciones totales de los elementos de interés en las muestras de suelos y sedimentos de fondo de la cuenca del río Sonora, por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivamente Acoplado, Método B.4 NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Apéndice de laboratorio 1B), previa digestión ácida (Método B.2.1 NOM, que es el mismo Método EPA 3051).

La estadística descriptiva de los valores de pH, CE y de las concentraciones totales de los elementos químicos de interés se presenta en la Tabla 5.4.

Parámetro	Unidad	Cuenca Río Sonora			Cuenca Río San Miguel		
		Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
pH	No aplica	5.4	9.4	8.2	6.0	8.2	9.7
CE	μS/cm	16.3	886	69.8	15.0	85.4	1380.0
Al	%	0.44	1.75	4.74	ND (*)		
As	mg/kg	No detectado	20.5	203.4	3.1	14.0	44.8
Cd	mg/kg	1.1	3.8	18.7	ND (*)		
Cr	mg/kg	0.4	31.6	109.6			
Cu	mg/kg	No detectado	41.2	1252.4	21.0	39.7	60.2
Fe	%	0.30	2.77	13.43	0.35	1.71	4.88
Mn	mg/kg	No detectado	538.4	1336.9	164.4	411.7	724.4
Ni	mg/kg	3.5	18.6	84.7	12.6	30.9	46.3
Pb	mg/kg	No detectado	31.9	935.6	9.5	23.7	82.1
Zn	mg/kg	28.3	80	196.3	11.7	50.6	185.5

Nota: Las concentraciones reportadas originalmente por el laboratorio de Al y Fe en mg/kg, se recalcularon para obtener las concentraciones en %.

Tabla 5.4 Estadística descriptiva de las concentraciones totales de los elementos químicos analizados en muestras de suelos y sedimentos fuera de la zona de influencia del derrame (Valores de fondo de suelos y sedimentos)

Las concentraciones totales de fondo de los metales de interés y obtenidas por la UNAM (2015) están dentro del intervalo de las concentraciones de fondo reportadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1995 - 2000). Solamente se obtuvieron concentraciones de aluminio un poco más altas en las muestras de roca de fondo que las obtenidas de los datos reportados por el SGM.

Otro aspecto que vale la pena resaltar es que para el caso del arsénico y plomo hay concentraciones de fondo que son más altas que los límites señalados en la normatividad ambiental mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) para suelos de uso residencial (Figura 5.7).

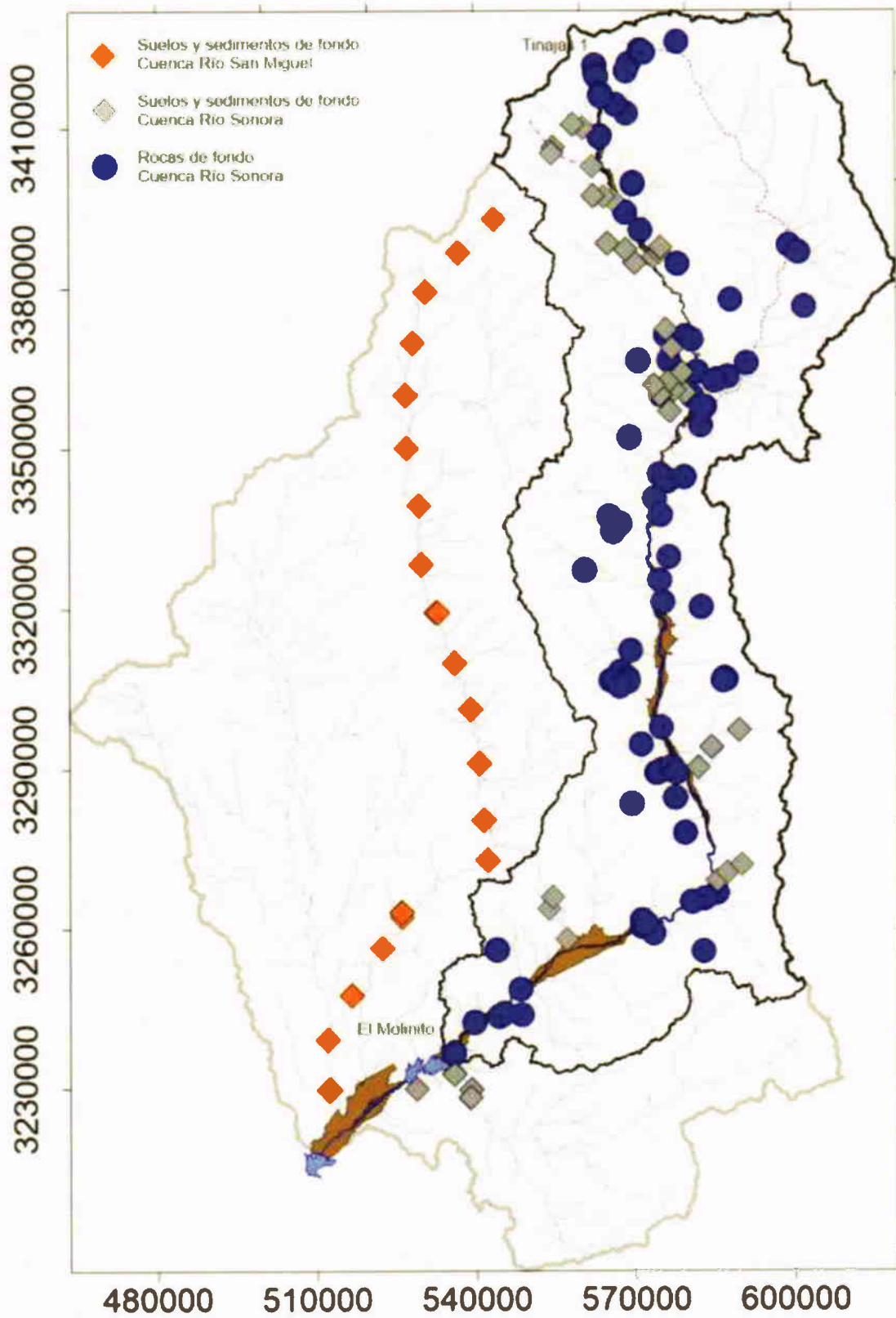
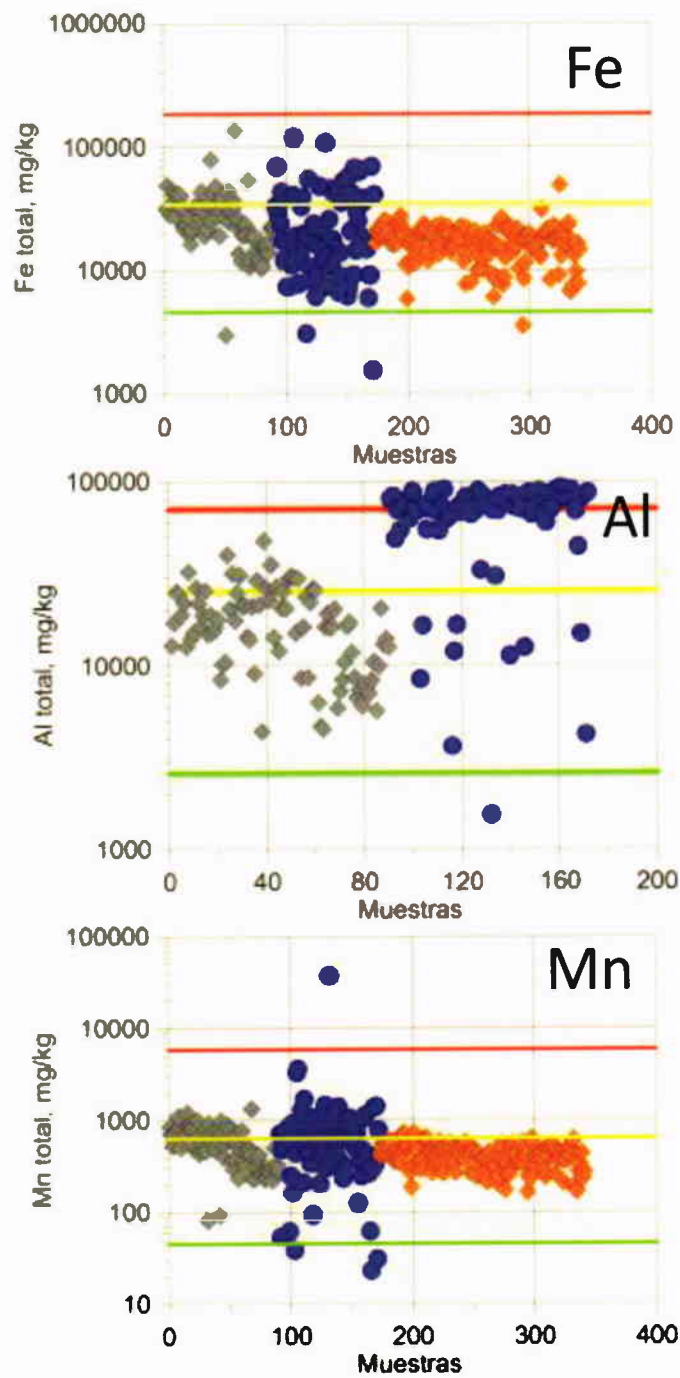
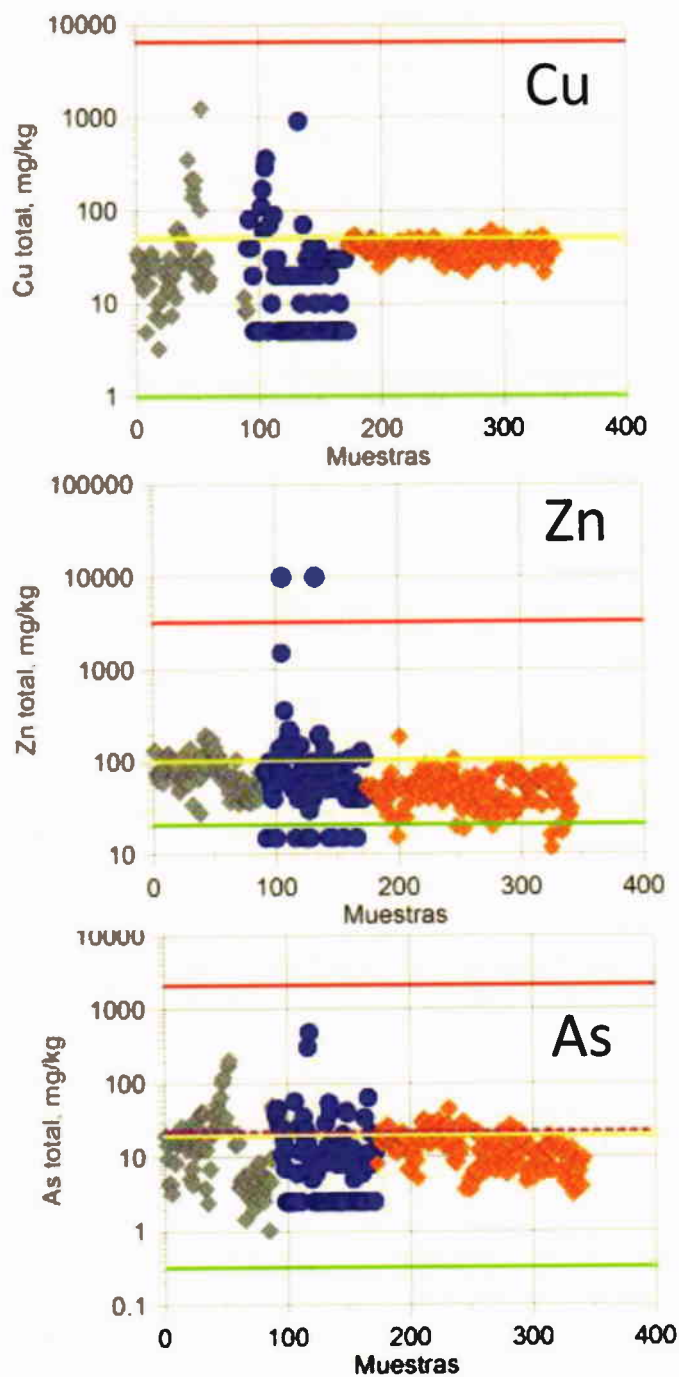


Figura 5.6 Ubicación de los sitios de muestreo realizados por la UNAM para determinar valores de fondo



- ◆ Suelo y sedimento fondo Cuenca Río Sonora, UNAM 2015
- Rocas fondo Cuenca Río Sonora, UNAM 2015
- ◆ Suelo y sedimento fondo Cuenca Río San Miguel, UNAM 2015
- Mínimo fondo SGM (1995 – 2000)
- Promedio fondo SGM (1995 – 2000)
- Máximo fondo SGM (1995 – 2000)
- - - Límite NOM-147 suelos de uso residencial

Figura 5.7 Comparación de valores de fondo determinados por la UNAM (2015) por ICP-OES con los reportados por el Servicio Geológico Mexicano (1995 – 2000)



- ◆ Suelo y sedimento fondo Cuenca Río Sonora, UNAM 2015
 - Rocas fondo Cuenca Río Sonora, UNAM 2015
 - ◆ Suelo y sedimento fondo Cuenca Río San Miguel, UNAM 2015
- Mínimo fondo SGM (1995 – 2000)
 - Promedio fondo SGM (1995 – 2000)
 - Máximo fondo SGM (1995 – 2000)
 - - - Límite NOM-147 suelos de uso residencial

Figura 5.7 Comparación de valores de fondo determinados por la UNAM (2015) por ICP-OES con los reportados por el Servicio Geológico Mexicano (1995 – 2000) (CONTINUACIÓN)

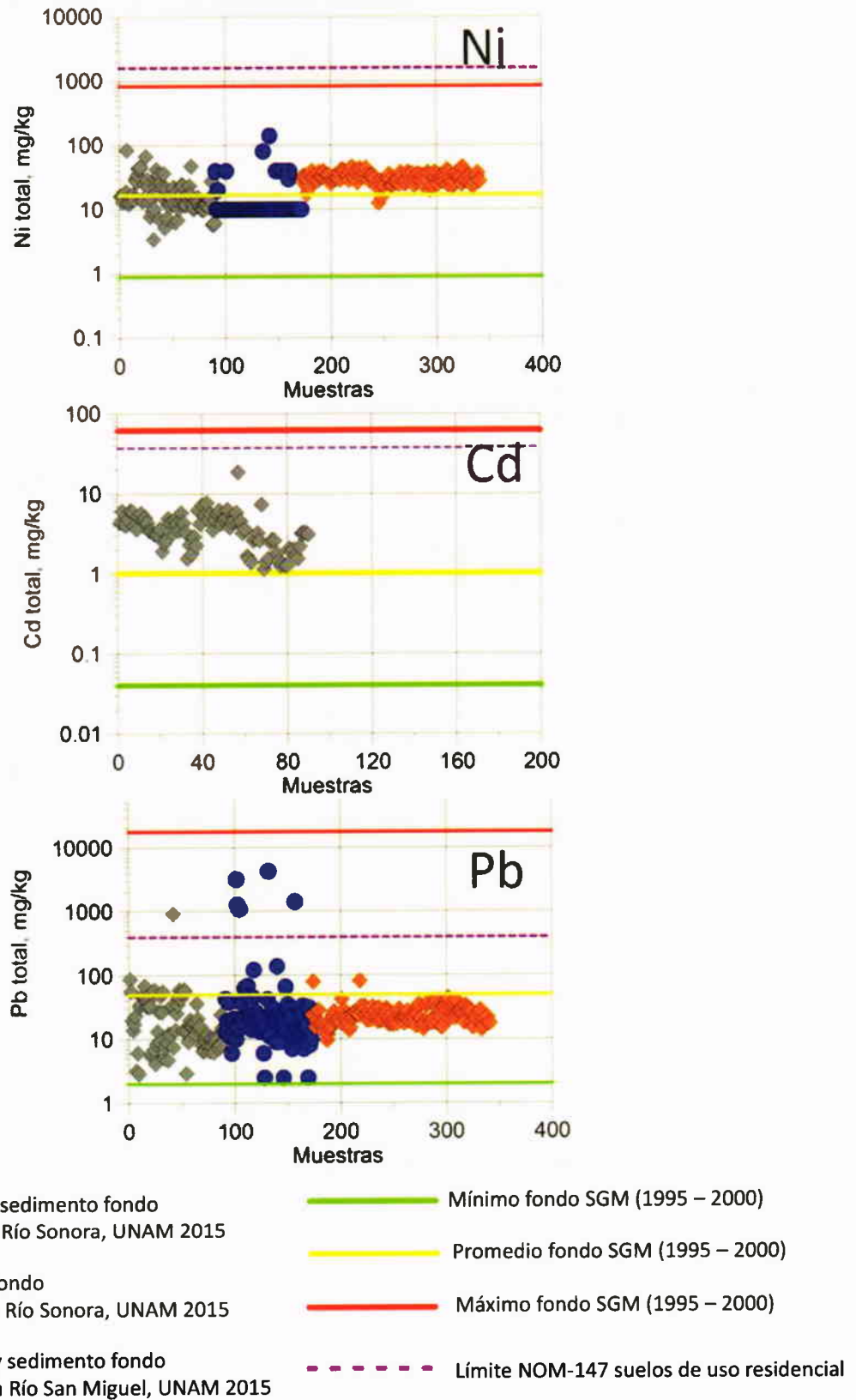


Figura 5.7 Comparación de valores de fondo determinados por la UNAM (2015) por ICP-OES con los reportados por el Servicio Geológico Mexicano (1995 – 2000) (CONTINUACIÓN)

VI. EVALUACIÓN DEL DAÑO AMBIENTAL EN LOS CUERPOS DE AGUA BAJO LA INFLUENCIA DEL DERRAME

6.1 Valores de fondo de los metales de interés en cuerpos de agua de la cuenca del río Sonora, que servirán como referencia para valorar el daño ambiental, asociado al derrame, en aguas superficiales y subterráneas.

Como concentraciones de fondo se toman las concentraciones de los metales en aguas superficiales y subterráneas reportadas 10 años antes de ocurrido el derrame de Buena Vista del Cobre en agosto de 2014.

A.1) Aguas superficiales

Los valores de fondo para metales en aguas superficiales fueron tomados del estudio "Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del río Sonora en varias localidades, de varios municipios, en el Estado de Sonora", elaborado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) para la Comisión Estatal del Agua (CEA) en junio de 2006.

Sobre las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) en los cuerpos de agua superficial, antes de ocurrido el derrame de Buena Vista del Cobre, el pasado 06 de agosto de 2014, en este informe de ITSON se lee:

- Con respecto a Zinc, en la parte norte de la cuenca se observan los niveles más altos, teniendo el valor más alto con 9.519 mg/l en el monitoreo 1 (septiembre-octubre) y reduciéndose a 3.494 mg/l en el monitoreo 2 (noviembre-diciembre).
- Con respecto a Cobre, en la parte norte se observan los niveles más altos, teniendo el valor más alto con 21.010 mg/l en el monitoreo 1 (septiembre-octubre) y con un ligero incremento a 22.740 mg/l en el monitoreo 2 (noviembre-diciembre).
- Con respecto a Fierro, en la parte norte se observan los niveles más altos, teniendo el valor más alto con 235.000 mg/l en el monitoreo 1 (septiembre-octubre), reduciéndose significativamente a 0.511 mg/l en el monitoreo 2 (noviembre-diciembre). En la parte sur, también se observa una pequeña acumulación de Fierro de 1.907mg/l en la presa Abelardo Rodríguez Lujan en el monitoreo 1 y 1.560 mg/l en la presa El Molinito, en el monitoreo 2.
- Con respecto a Manganeso, en la parte norte se observan los niveles más altos, teniendo el valor más alto con 0.413 mg/l en el monitoreo 1 (septiembre-octubre), incrementándose significativamente a 5.880 mg/l en el monitoreo 2 (noviembre-diciembre). En la parte sur, también se observa una pequeña acumulación de Manganeso de 1.513 mg/l en la presa

Abelardo Rodríguez Lujan en el monitoreo 1 y 1.665 mg/l en la presa El Molinito en el monitoreo 2.

- Con respecto a Níquel, en la parte norte se observan los niveles más altos, teniendo el valor más alto con 0.249 mg/l en el monitoreo 1 (septiembre-octubre), con un ligero incremento a 0.290 mg/l en el monitoreo 2 (noviembre-diciembre).
- Con respecto a Cadmio y Plomo, no se observan concentraciones importantes de estos metales en la cuenca del río Sonora.

Por otro lado, en un trabajo de tesis de la UNISON⁹ se reportan las siguientes concentraciones máximas (mg/L) en el agua superficial de la cuenca del río Sonora: Cd = 0.01, Cu = 2.77, Fe = 36.1 mg/L, Mn = 22.9, Pb = 1.55 y Zn = 0.58.

Así mismo, la Red de Monitoreo de agua superficial de la Conagua reporta concentraciones totales de algunos de los metales asociados al derrame en algunas zonas de la cuenca del río Sonora (Tabla 6.1).

Zona	As	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb
	mg/L					
Bacanuchi	0.133	0.115	0.115	0.0002	0.165	0.524
Arizpe	0.038	0.004	0.034	0.0007	0.052	0.113
Sonora 5	0.157	0.016	0.119	0.0006	0.224	0.493
Baviacora	0.300	0.025	0.188	0.0002	0.343	0.848
El Gavilán	ND	ND	ND	0.0001	ND	ND
Molinito	0.012	ND	ND	0.0002	ND	ND

ND: No dato

Tabla 6.1 Concentraciones de fondo de aguas superficiales en la cuenca del río Sonora (Fuente: CONAGUA)

En noviembre de 2015, la UNAM realizó un muestreo de aguas superficiales en la cuenca del río San Miguel, que es paralela a la del río Sonora. Los resultados se presentan en la Tabla 6.2.

Estos resultados indican que las concentraciones de fondo de los metales de interés son más bajos en la cuenca del San Miguel. El reporte de muestreo y laboratorio se puede consultar en los Apéndices de muestreo 2 y Apéndice de Laboratorio 2, respectivamente.

⁹ DAGOBERTO BURGOS FLORES (2001). Evaluación del riesgo ambiental por nitratos y nitritos, así como algunos metales, en la sub-cuenca central del río Sonora, México

Muestra	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Al		As		Ba		Cd		Cr	
			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
			solubles	totales	solubles	totales	solubles	totales	solubles	totales	solubles	totales
SMS-1A	7.7	616	0.004	0.011	<LOD	<LOD	0.134	0.137	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
SMS-6A	8.1	577	0.100	1.221	0.017	0.016	0.059	0.087	<LOD	<LOD	0.001	0.002
SMS-16A	8.2	632	0.004	0.152	0.007	0.009	0.093	0.095	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
SMS-17A	8.0	743	0.005	0.109	0.009	0.008	0.090	0.089	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
SMS-18A	8.1	685	0.019	0.019	0.008	0.008	0.085	0.081	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
SMA-38A	7.6	887	0.006	0.006	0.010	0.009	0.127	0.120	<LOD	<LOD	0.002	0.002
SMPS-26A	7.5	817	<LOD	0.034	0.008	0.011	0.144	0.149	<LOD	<LOD	0.002	0.002
Máximo	8.2	887	0.100	1.221	0.017	0.016	0.144	0.149	<LOD	<LOD	0.002	0.002

Muestra	Cu		Fe		Mn		Ni		Pb		Zn	
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
	solubles	totales	solubles	totales	solubles	totales	solubles	totales	solubles	totales	solubles	totales
SMS-1A	<LOD	<LOD	0.008	0.015	0.001	0.001	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
SMS-6A	<LOD	<LOD	0.098	0.815	0.006	0.111	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.012	0.012
SMS-16A	<LOD	<LOD	0.008	0.119	0.018	0.042	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
SMS-17A	<LOD	<LOD	0.007	0.095	0.004	0.023	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
SMS-18A	<LOD	<LOD	0.011	0.018	0.001	0.002	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
SMA-38A	<LOD	0.0127	0.026	0.044	0.002	0.002	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.011	0.011
SMPS-26A	<LOD	<LOD	0.008	0.049	<LOD	0.002	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Máximo	0.0000	0.0127	0.098	0.815	0.018	0.111	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	0.012	0.012

Tabla 6.2 Concentraciones de fondo de aguas superficiales en la cuenca del río San Miguel (UNAM, 2015)

A.2) Aguas subterráneas

Los valores de fondo para aguas subterráneas se tomaron del “Estudio geohidrológico de las sub-cuentas de los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri-La victoria y Cuenca Bacoachi”, elaborado por la Universidad de Sonora (UNISON) para la Comisión Estatal del Agua (CEA) en diciembre de 2004.

De acuerdo a este estudio en las aguas subterráneas de la cuenca del río Sonora, se determinaron concentraciones de fondo de Ba, Cd, Fe y Mn que son superiores a los límites señalados en la NOM-127 (Tabla 7). Por otro lado, es importante resaltar que en la sub-cuenca la Junta, que drena a la presa El Molinito por su

lado sur, las concentraciones de As, Ba, Cd y Fe son superiores a los límites señalados en la NOM-127¹⁰ (Tabla 6.3).

Parámetro	Río Bacancuhi		Río Sonora-Arízpe		Río Sonora-Ures-Topahue		Río Sonora-Banamichi		Arroyo La Junta		Límite NOM 127(*)
	n = 13		n = 23		n = 20		n = 24		n = 10		
mg/L	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
As	ND	0.009	ND	0.006	ND	0.025	ND	0.021	ND	0.061	0.025
Ba	0.008	0.222	0.009	0.422	0.043	1.87	0.016	0.143	0.022	0.823	0.7
Cd	ND	0.024	ND	0.007	0.007	0.009	0.006	0.009	ND	0.009	0.005
Cr	ND	0.005	ND	0.004	ND	0.049	ND	ND	ND	ND	0.05
Cu	0.006	0.941	0.006	0.106	0.019	0.073	0.012	0.038	0.021	0.033	2
Fe	ND	1.29	0.013	17.6	0.012	43.9	ND	3.25	0.011	1.95	0.3
Pb	ND	ND	ND	ND	ND	0.01	ND	ND	ND	ND	0.01
Mn	ND	4.97	ND	1.4	ND	0.994	ND	0.159	ND	0.117	0.15
Ni	ND	0.342	ND	0.005	ND	0.027	ND	ND	ND	0.004	0.02(*)
Zn	0.004	2	0.005	0.621	0.009	0.159	0.005	0.214	ND	0.174	5
pH	6.0	8.5	6.9	8.5	7.1	9.2	6.8	9.2	7.2	10.0	6.5 - 8.5

(*)Modificación de la NOM-127-SSA1-1994: Salud ambiental, agua para uso y consumo humano: Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización

Tabla 6.3 Valores de fondo de las concentraciones de algunos metales en el agua subterránea de la cuenca del río Sonora (Fuente: UNISON; 2004)

6.2 Calidad del agua superficial en arroyos y ríos de la cuenca del río Sonora que fue afectada por el derrame de BVC el pasado 06 agosto 2014.

A.1) Valores de pH¹¹

En aproximadamente 725 muestras (colectadas diariamente), entre el 09/08/2014 y el 17/09/2014 se realizaron determinaciones de pH para valorar la acidez del agua de los ríos, debido al derrame del represo Tinajas 1.

Los sitios de muestreo para el análisis de pH se presentan en la Figura 6.1.

Los registros de los valores de pH indican que solamente en los primeros días después del derrame (semana del 09 al 14 de agosto), se registraron valores de pH ácidos (pH = 2.6 – 3.7) entre Sinoquipe (clave 6, MET-014) y Aconchi (clave 13, MET024) (Fig. 6.2^a y 6.2B). Sin embargo, en la parte alta de la cuenca (Tinajas - Arízpe) y en la parte baja (Baviácora - El Molinito) se registraron valores de pH neutros y ligeramente básicos (pH = 5.9 y 8.4), que corresponden a los valores de fondo determinados por la UNISON en la cuenca en 2004.

¹⁰ Modificación de la NOM-127-SSA1-1994: Salud ambiental, agua para uso y consumo humano: Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización

¹¹ Información tomada a la página WEB del FIDEICOMISO RIO SONORA. Informe elaborado por ABC Laboratorios: Resultados del muestreo y análisis de agua, sedimentos y biota de los ríos Bacanuchi y Sonora contaminados por la fuga proveniente de la mina Buena Vista del Cobre en Cananea, hasta el 18 de septiembre de 2014.

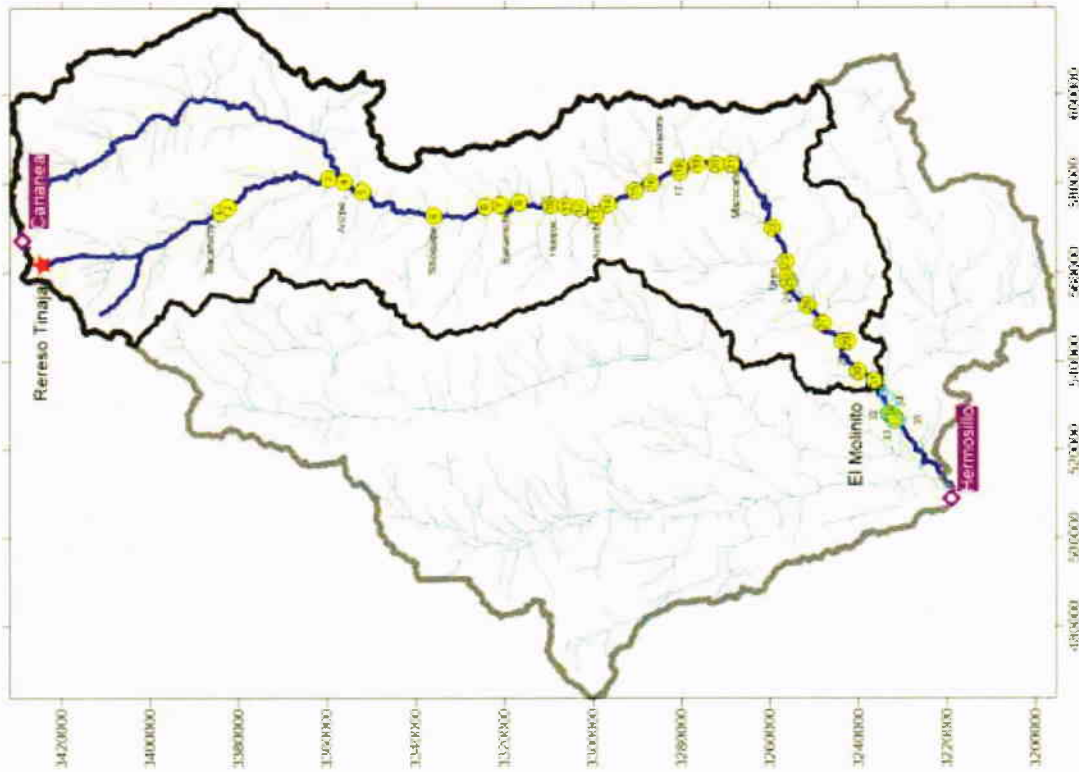
Es importante destacar que este comportamiento de los valores de pH no tiene una explicación lógica, ya que comúnmente los valores de pH en un cuerpo de agua afectado, a partir de una fuente ácida, deberán ir aumentando a medida que se aleja de dicha fuente. Debido a que desconocemos detalles de la toma de muestras y de la determinación del pH en dichas muestras, no tenemos elementos suficientes y válidos para interpretarlos adecuadamente.

Es destacable que desde el 15 de agosto los valores de pH son neutros y ligeramente básicos, lo que parece indicar, en términos de acidez, que la influencia del derrame de la solución ácida del represo Tinajas se dio en la primera semana después de ocurrido el derrame.

Bajo estos escenarios de acidez, la modelación geoquímica y los análisis de DRX indica que los metales asociados al derrame precipitaron (pasar de la fase líquida (agua del río) a la fase sólida (sedimentos)).

Los análisis mineralógicos en sedimentos afectados por el derrame (ver sección 2.5 de este informe) indican la presencia de jarosita ($XFe_3(SO_4)_2(OH)_6$); que es un mineral secundario de Fe, que se caracteriza por su coloración amarillo-naranja y por su contenido de elementos potencialmente tóxicos como Pb, Ba, As, Zn, Mn, que se atrapan en su estructura cristalina debido a procesos de sorción.

La coloración amarillo-naranja de la jarosita, más la coloración blanca del yeso (que también se identificó por DRX), fue la guía visual para la recolecta de aproximadamente de 7,398 m³ de sedimentos impactados por el derrame y depositado en los caminos de acceso de la presa de jales de Buena Vista del Cobre, durante las acciones de remediación realizadas en la zona, por la empresa.



X	Y	Clave	Descripción	Clave mapa
573504	3384203	MET-002	BACANUCHI-EL MOLINO	1
574741	3382487	MET-003	BACANUCHI-LA TRAMPA	2
581043	3359764	MET-006	TAMUICHOPA RIO	3
580405	3356200	MET-009	ARIZPE RIO SONORA	4
578189	3352059	MET-012	BAMORI RIO SONORA	5
572779	3336060	MET-014	SINOQUIPE RIO SONORA	6
575266	3320919	MET-015	BANAMICHI RIO SONORA	7
574825	3324390	MET-018	EL TAIO DE BANAMICHI	8
575756	3316681	MET-097	LAS DELICIAS RIO SONORA	9
575135	3309738	MET-020	HUEPAC RIO SONORA	10
574880	3306190	MET-022	RANCHITO DE HUEPAC RIO SONORA	11
574509	3303125	MET-091	SAN FELIPE RIO SONORA	12
572928	3299393	MET-024	ACONCHI RIO SONORA	13
575409	3296639	MET-026	LA ESTANCIA RIO SONORA	14
578330	3290580	MET-028	SAN JOSÉ DE BAVIACORA RIO SONORA	15
580017	3286815	MET-039	BAVIACORA RIO SONORA	16
582469	3280421	MET-040	LA CAPILLA RIO SONORA	17
583577	3280420	MET-041	EL MOLINOTE RIO SONORA	18
584310	3276547	MET-043	LA LABOR RIO SONORA	19
584232	3272286	MET-042	LA AURORA RIO SONORA	20
584296	3268780	MET-029	MAZOCAHUI RIO SONORA	21
570013	3259529	MET-030	PUERTA DEL SOL RIO SONORA	22
562414	3256646	MET-033	SAN PEDRO DE URES RIO SONORA	23
558830	3256282	MET-035	URES RIO SONORA	24
557763	3255815	MET-038	SANTIAGO DE URES RIO SONORA	25
552701	3251638	MET-044	GPE. DE URES RIO SONORA	26
548581	3248231	MET-045	SAN RAFAEL DE URES RIO SONORA	27
544506	3243653	MET-054	EL GAVILAN RIO SONORA	28
544510	3242600	MET-053	EL OREGANO RIO SONORA	29
537693	3240228	MET-047	SAN JOSÉ DE GRACIA RIO SONORA	30
535714	3236522	MET-056	TOPAHUE RIO SONORA	31
528268	3233152	MET-058	BOQUILLA OREGANO	32
527570	3232495	MET-059	MOLINITO VASO 1	33
527510	3231901	MET-060	MOLINITO VASO 2	34
526649	3231730	MET-061	MOLINITO OBRA DE TOMA	35

Figura 6.1 Ubicación de sitios de muestreo de agua superficial en la cuenca del río Sonora

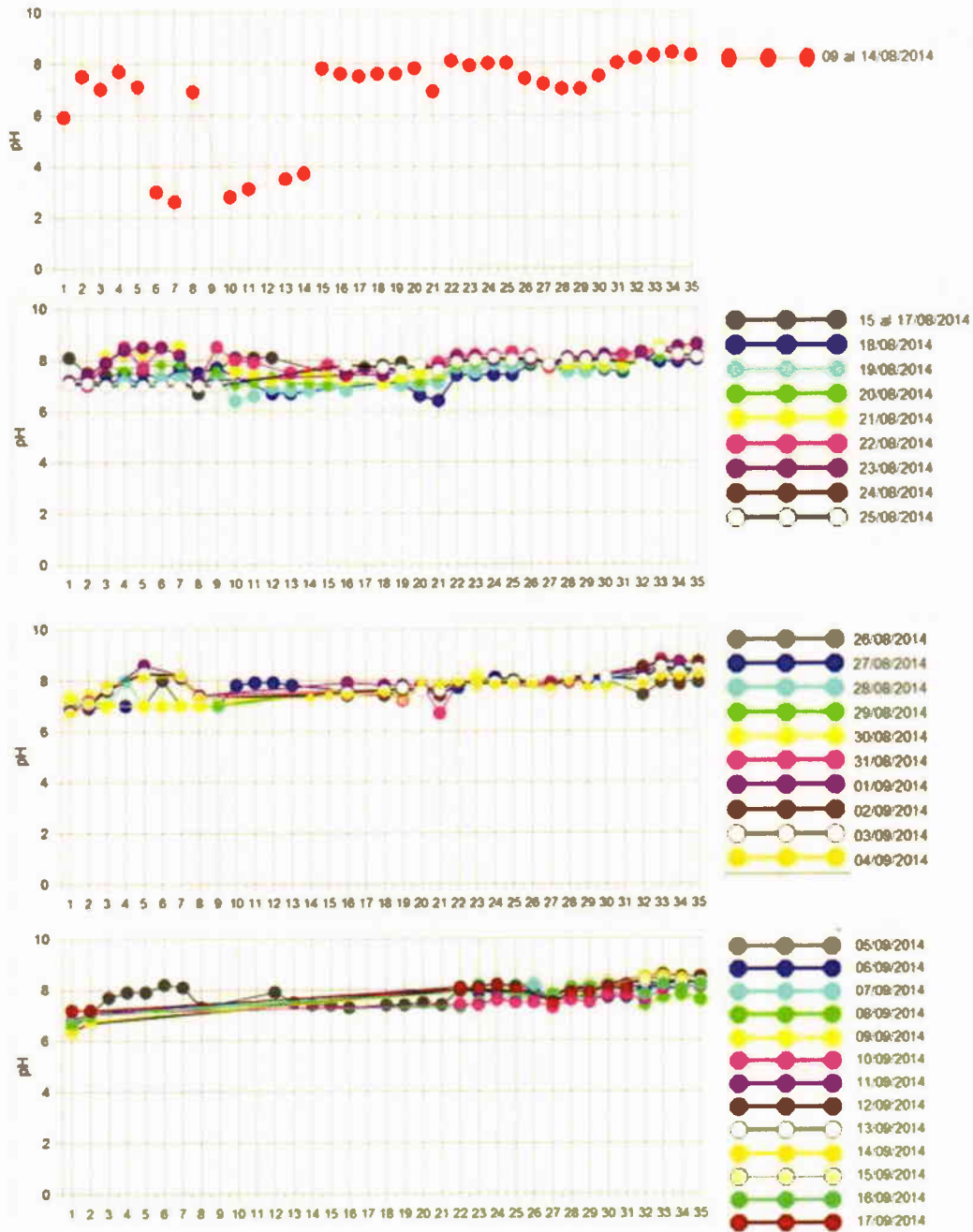


Figura 6.2 (A) Comportamiento de los valores de pH en aguas superficiales de los cuerpos de aguas de la cuenca del río Sonora

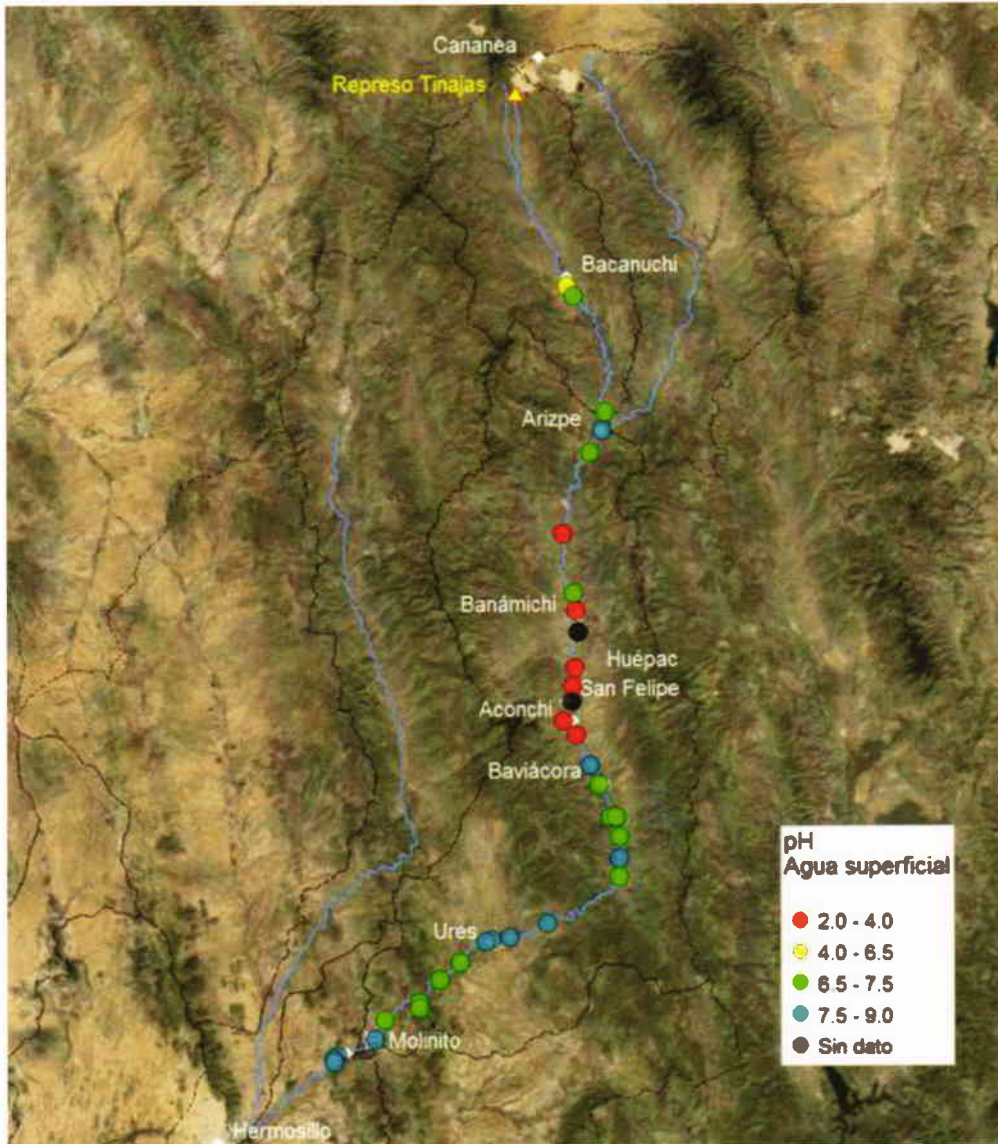


Figura 6.2 (B) Comportamiento de los valores de pH en aguas superficiales de los cuerpos de aguas de la cuenca del río Sonora

A.2) Concentración total y soluble de los metales asociados al derrame

Con la finalidad de monitorear la calidad de agua a lo largo de la cuenca del río Sonora, se monitorearon 35 sitios en aguas superficiales (Fig. 6.1). El monitoreo, considerado en este análisis se realizó entre el 18 de agosto de 2014 hasta finales de diciembre del 2015¹².

¹² La toma de muestras de agua y los análisis fueron realizados por Laboratorios ABC

Se determinaron las concentraciones totales¹³ en aproximadamente 1971 muestras y las concentraciones solubles¹⁴ en aproximadamente 1501 muestras. Para realizar la interpretación del comportamiento de las concentraciones totales y solubles de los metales asociadas al derrame se seleccionaron los representativos de los elementos mayores (Al, Fe y Mn) los representativos de los trazas (As, Cu y Pb).

En noviembre de 2015, el Instituto de Geología, UNAM realizó un único muestreo de aguas superficiales en la cuenca del río Sonora. Los resultados de los análisis son similares a los reportados proo ABC para esa fecha. El reporte del muestreo y laboratorio se puede consultar en el Apéndice muestreo 3 y el Apéndice de laboratorio 3, respectivamente. Los resultados obtenidos por la UNAM son similares a los reportados por ABC para esta fecha de muestreo.

De acuerdo al modelo geoestadístico, la distribución espacio-temporal de las concentraciones totales de todos los metales, tanto mayores como trazas, indica tres zonas anómalas (Fig. 6.3) que están localizadas a diferente distancia de la fuente de contaminación: i) hasta los 100 km, ii) entre 120 y 150 km y iii) entre 180 y 220 km. Las dos primeras anomalías se manifiestan hasta aproximadamente el 27 de septiembre y después de esta fecha desaparecen; en cambio la anomalía registrada a la distancia entre 180 y 220 km, de la fuente de contaminación, permanece en todo el periodo de monitoreo.

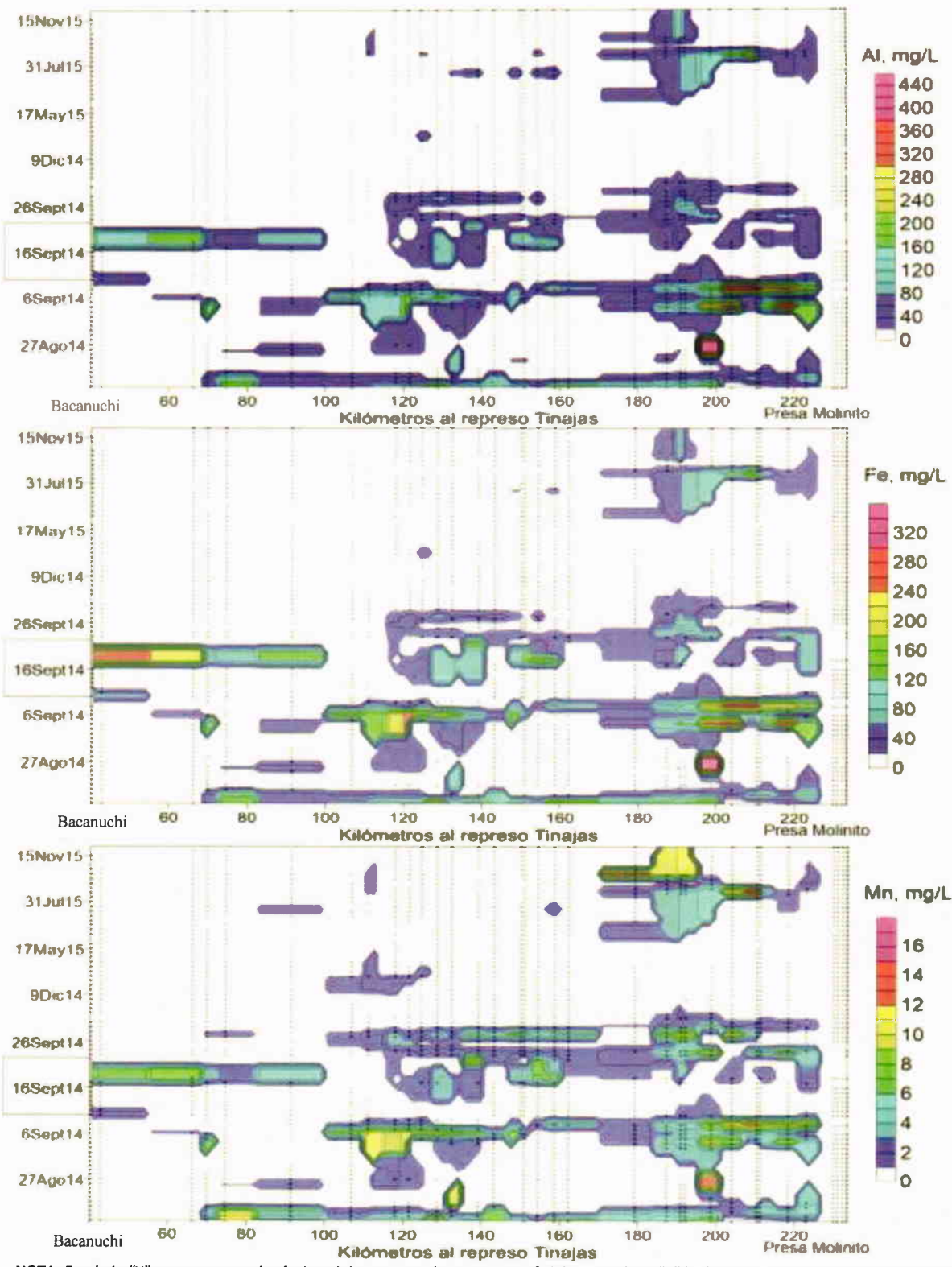
Este comportamiento indica que la anomalía que se manifiesta hasta unos 100 km, de la fuente de contaminación, debe estar relacionada con el derrame. La segunda anomalía localizada (120 y 150 km), de la fuente de contaminación, también parece estar relacionada con el derrame; sin embargo esta zona también puede estar influenciada por la mineralización de la región.

Las mayores concentraciones totales de los metales de interés se determinaron en la época de lluvias, y las concentraciones solubles son significativamente más bajas en comparación con las totales (Fig. 6.4); lo que significa que las presencia de estos metales están preferentemente asociada a la fase sólida suspendida y no están disueltas en el agua de los ríos.

En general, las concentraciones totales actuales, y desde enero de 2015, de los metales de interés, en las aguas superficiales de la cuenca, están dentro del intervalo de los valores de fondo reportados por la UNISON en el 2004 (Fig. 6.4).

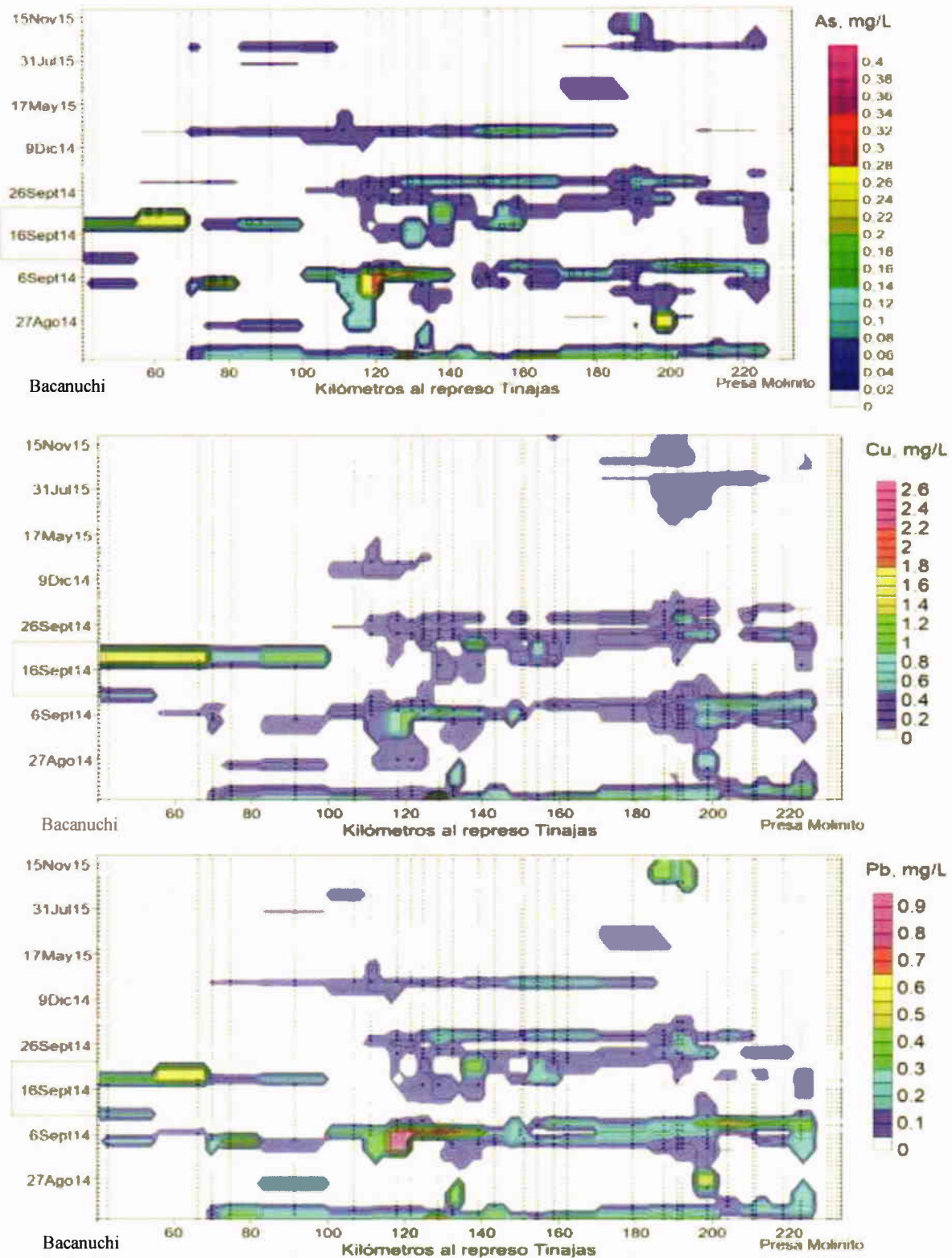
¹³ **Concentración total:** Las concentraciones totales incluyen las concentraciones de los metales disueltos en el agua más las concentraciones de éstos en las partículas suspendidas. Para determinar las concentraciones totales, en el campo las muestras de aguas sin filtrar se preservan con ácido nítrico concentrado, para lograr un valor de pH menor a 2.0; con lo cual se disuelven los metales contenidos en el material particulado del agua de los cuerpos de agua estudiados

¹⁴ **Concentración soluble:** Para determinar las concentraciones solubles de los metales de interés las muestras de aguas se filtran en campo y luego se les agrega ácido nítrico concentrado para lograr un valor de pH menor a 2.0



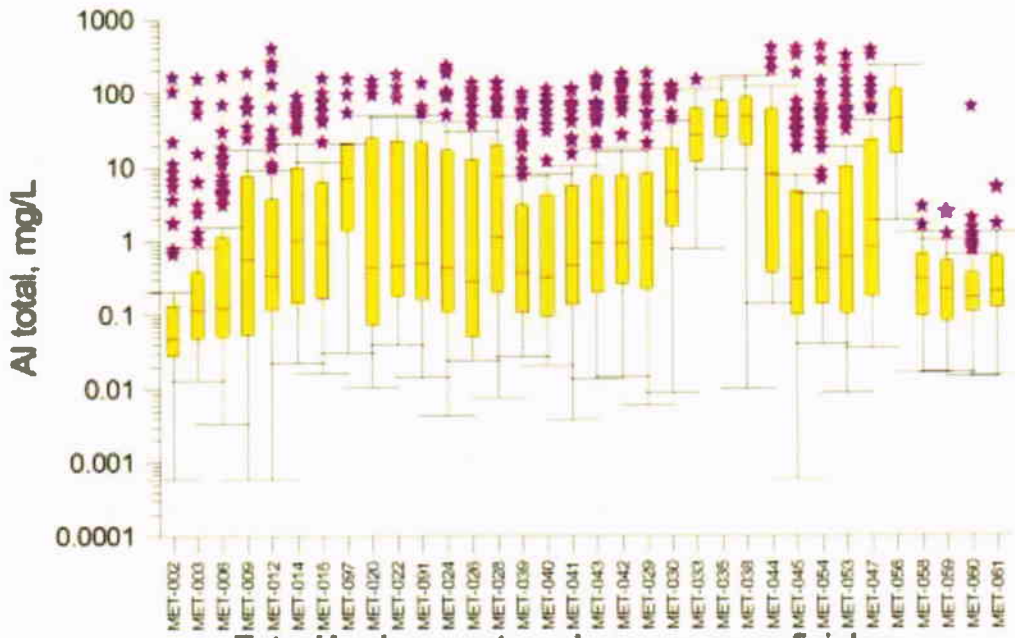
NOTA: En el eje "Y" se encuentran las fechas del muestreo de aguas superficiales. En el eje "X" la distancia de los sitios de muestreo en kilómetros en dónde la primera muestra se tomó a aproximadamente 40 km del represo Tinajas; que es donde inicia la manifestación de agua superficial en río Bacanuchi.

Figura 6.3 Comportamiento de las concentraciones totales en aguas superficiales de los metales asociados al derrame

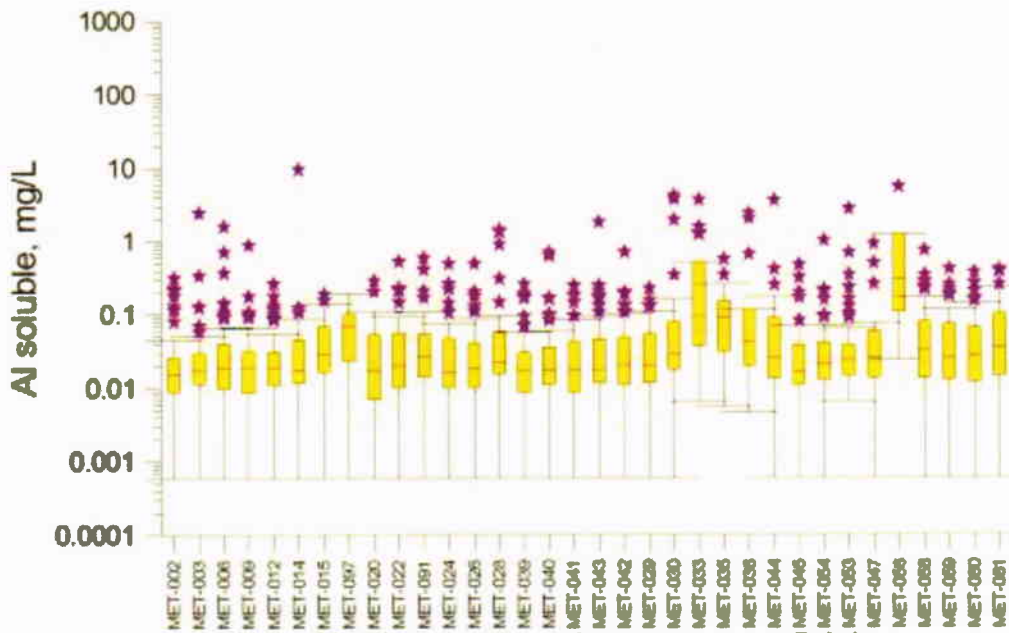


NOTA: En el eje "Y" se encuentran las fechas del muestreo de aguas superficiales. En el eje "X" la distancia de los sitios de muestreo en kilómetros en dónde la primera muestra se tomó a aproximadamente 40 km del represo Tinajas; que es donde inicia la manifestación de agua superficial en río Bacanuchi.

Figura 6.3 Comportamiento de las concentraciones totales en aguas superficiales de los metales asociados al derrame. (CONTINUACIÓN)



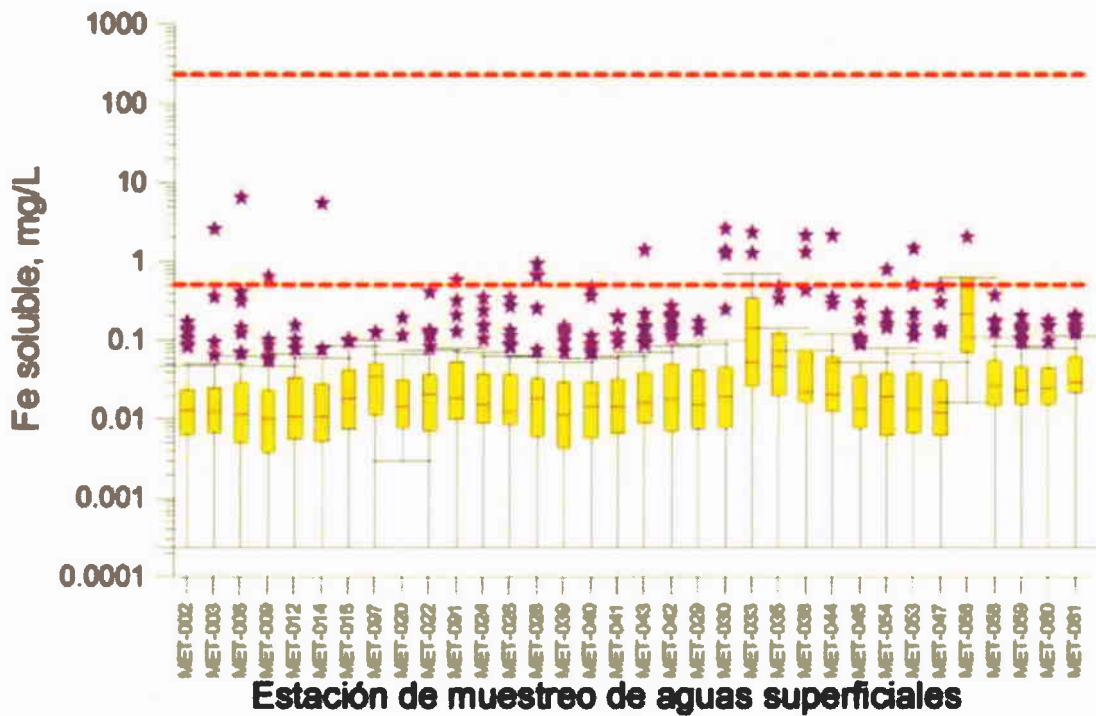
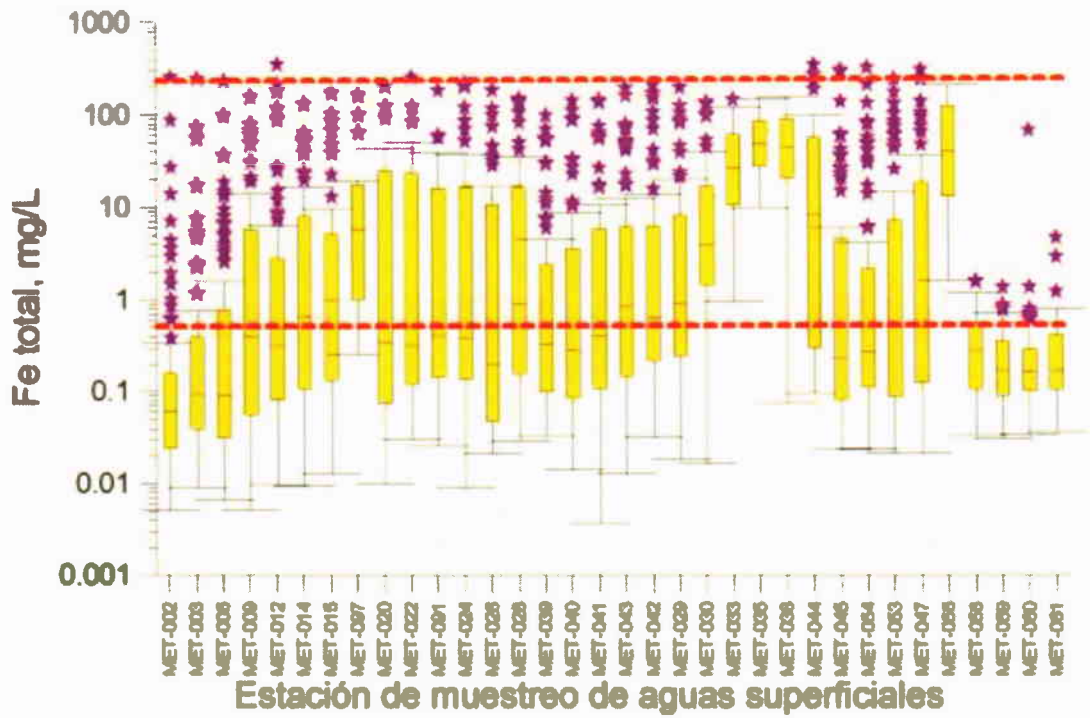
Estación de muestreo de aguas superficiales



Estación de muestreo de aguas superficiales

Nota: La figura muestra el valor de tendencia central de las concentraciones de Al (raya dentro del rectángulo amarillo), los percentiles 25 y 75 de las concentraciones de Al (parte inferior y superior del rectángulo amarillo), los mínimos y máximos de las concentraciones de Al. También se muestran los valores anómalos de las de las concentraciones de Fe (estrella de color morado)

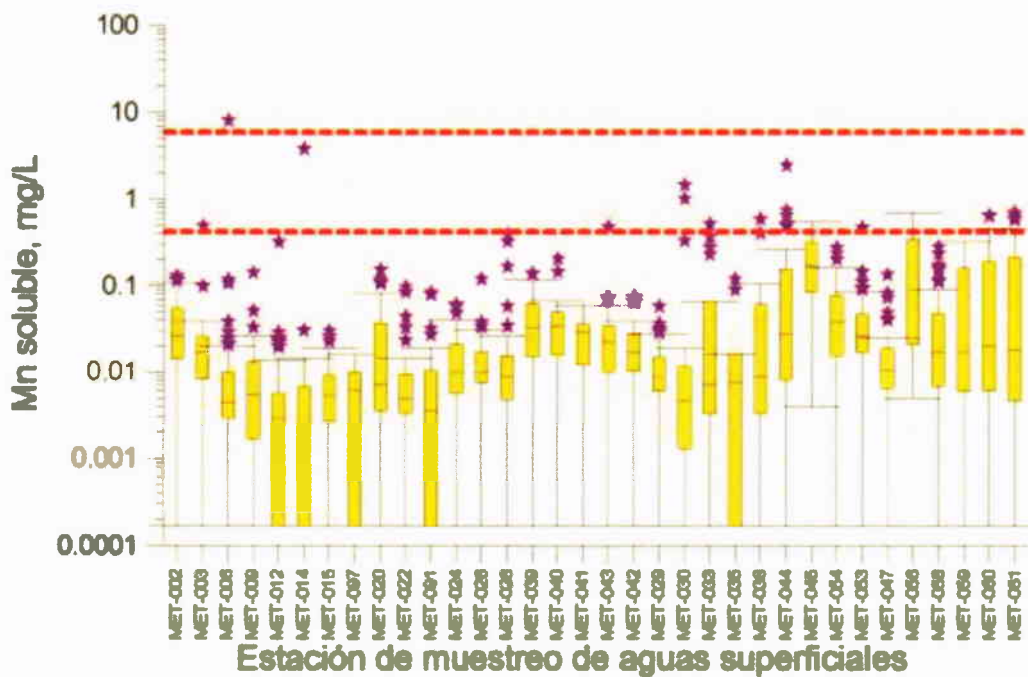
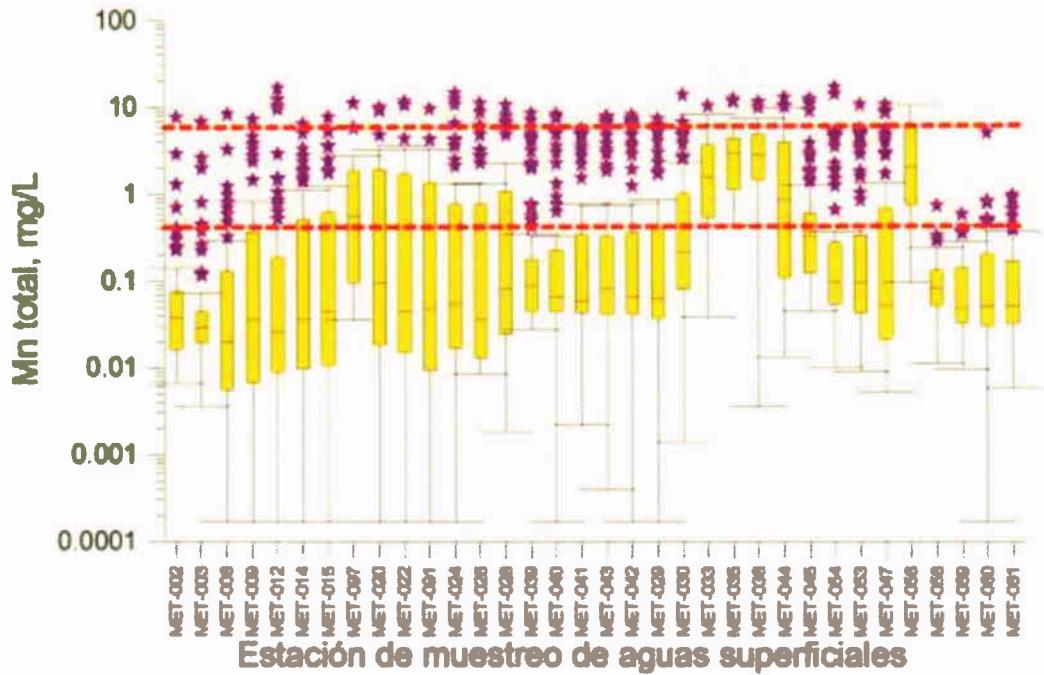
Figura 6.3 Comparación entre las concentraciones totales y solubles de aluminio (Al) en aguas superficiales



NOTA 1: La figura muestra el valor de tendencia central de las concentraciones de Fe (raya dentro del rectángulo amarillo), los percentiles 25 y 75 de las concentraciones de Fe (parte inferior y superior del rectángulo amarillo), los mínimos y máximos de las concentraciones de Fe. También se muestran los valores anómalos de las de las concentraciones de Fe (estrella de color morado)

NOTA 2: Raya discontinua roja: Mínimo y máximo de las concentraciones Pre-derrame (Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del río Sonora en varias localidades, de varios municipios, en el Estado de Sonora, elaborado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) para la Comisión Estatal del Agua (CEA) en junio de 2006)

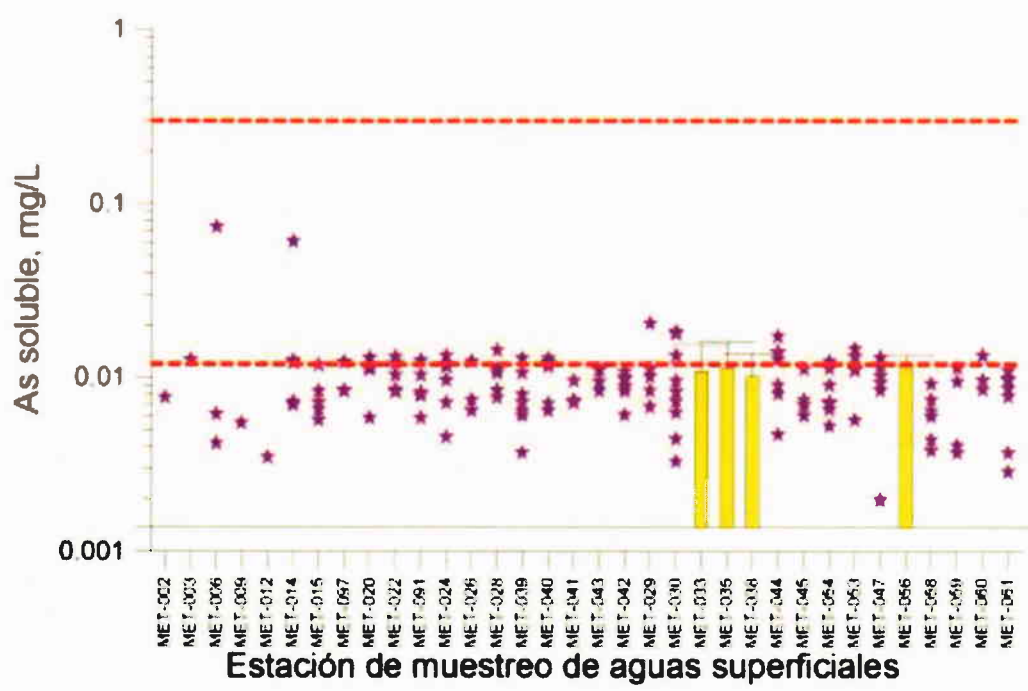
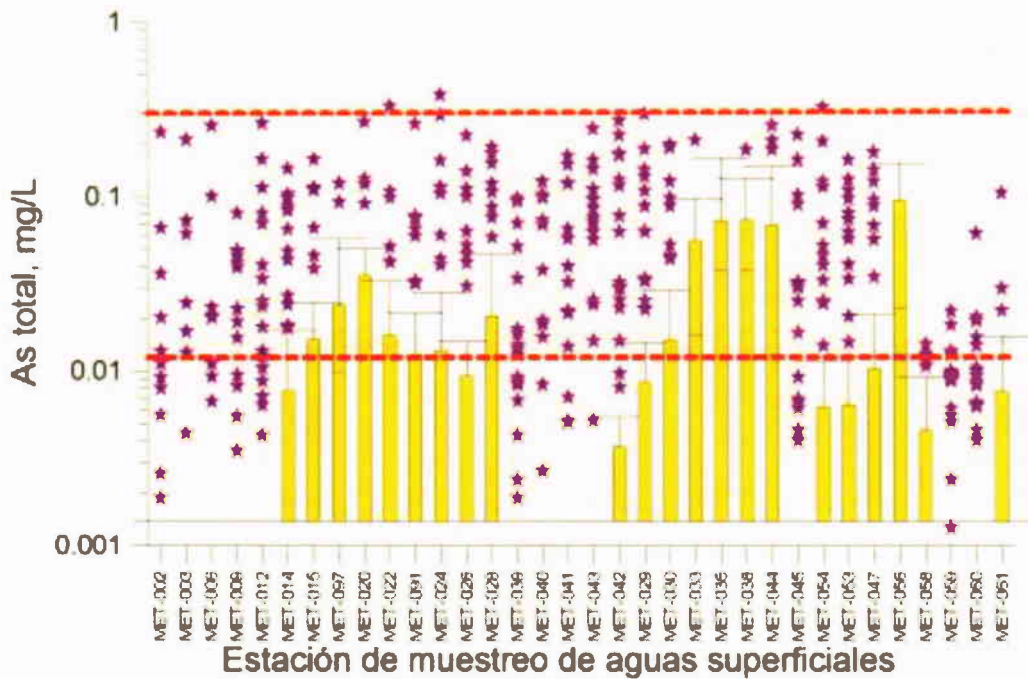
Figura 6.3 Comparación entre las concentraciones totales y solubles de hierro (Fe) en aguas superficiales (Continuación)



Nota 1: La figura muestra el valor de tendencia central de las concentraciones de Mn (raya dentro del rectángulo amarillo), los percentiles 25 y 75 de las concentraciones de Mn (parte inferior y superior del rectángulo amarillo), los mínimos y máximos de las concentraciones de Mn. También se muestran los valores anómalos de las de las concentraciones de Mn (estrella de color morado)

NOTA 2: Raya discontinua roja: Mínimo y máximo de las concentraciones Pre-derrame (Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del río Sonora en varias localidades, de varios municipios, en el Estado de Sonora, elaborado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) para la Comisión Estatal del Agua (CEA) en junio de 2006)

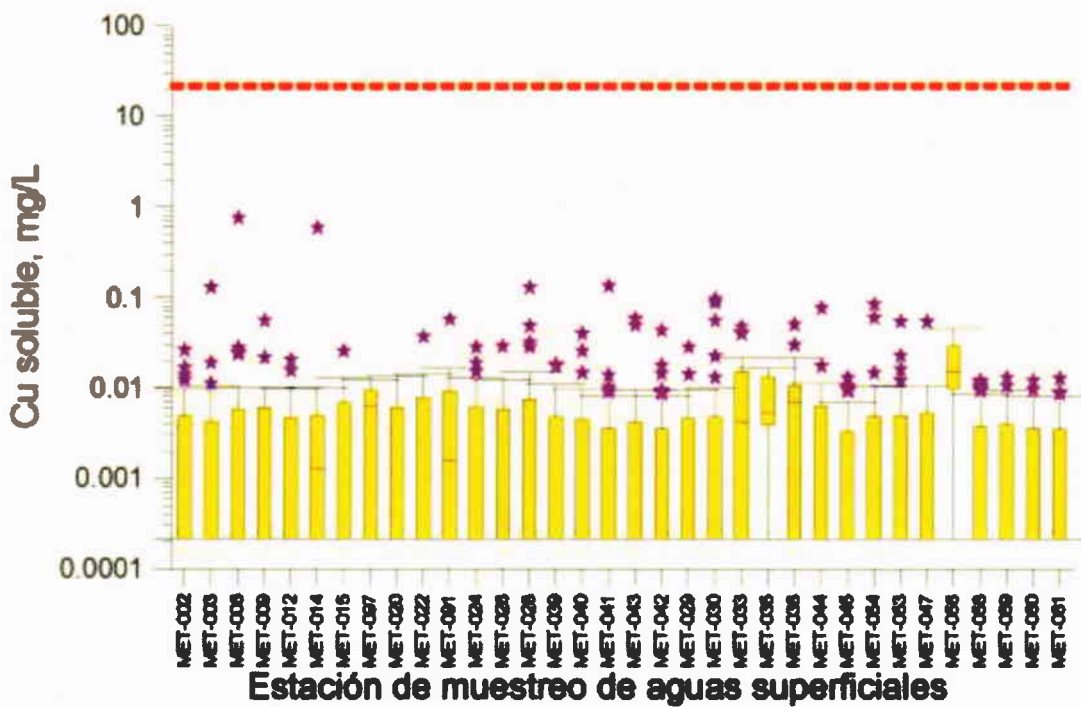
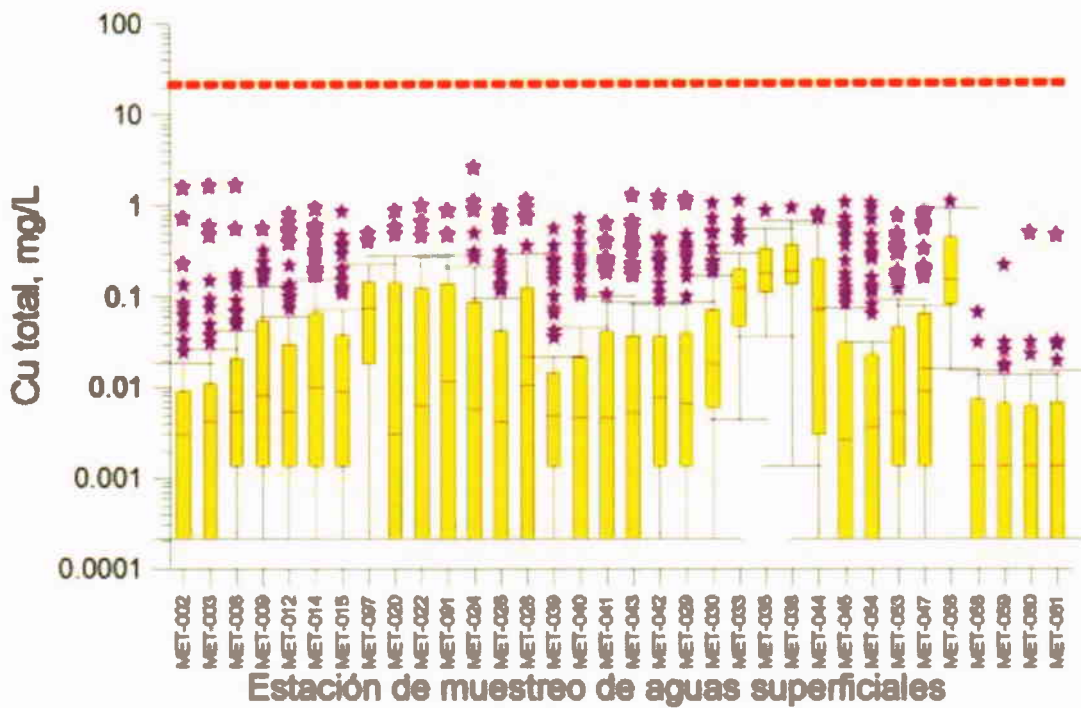
Figura 6.3 Comparación entre las concentraciones totales y solubles de manganeso (Mn) en aguas superficiales (Continuación)



Nota 1: La figura muestra el valor de tendencia central de las concentraciones de As (raya dentro del rectángulo amarillo), los percentiles 25 y 75 de las concentraciones de As (parte inferior y superior del rectángulo amarillo), los mínimos y máximos de las concentraciones de As. También se muestran los valores anómalos de las de las concentraciones de As (estrella de color morado)

NOTA 2: Raya discontinua roja: Mínimo y máximo de las concentraciones Pre-derrame (Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del río Sonora en varias localidades, de varios municipios, en el Estado de Sonora, elaborado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) para la Comisión Estatal del Agua (CEA) en junio de 2006)

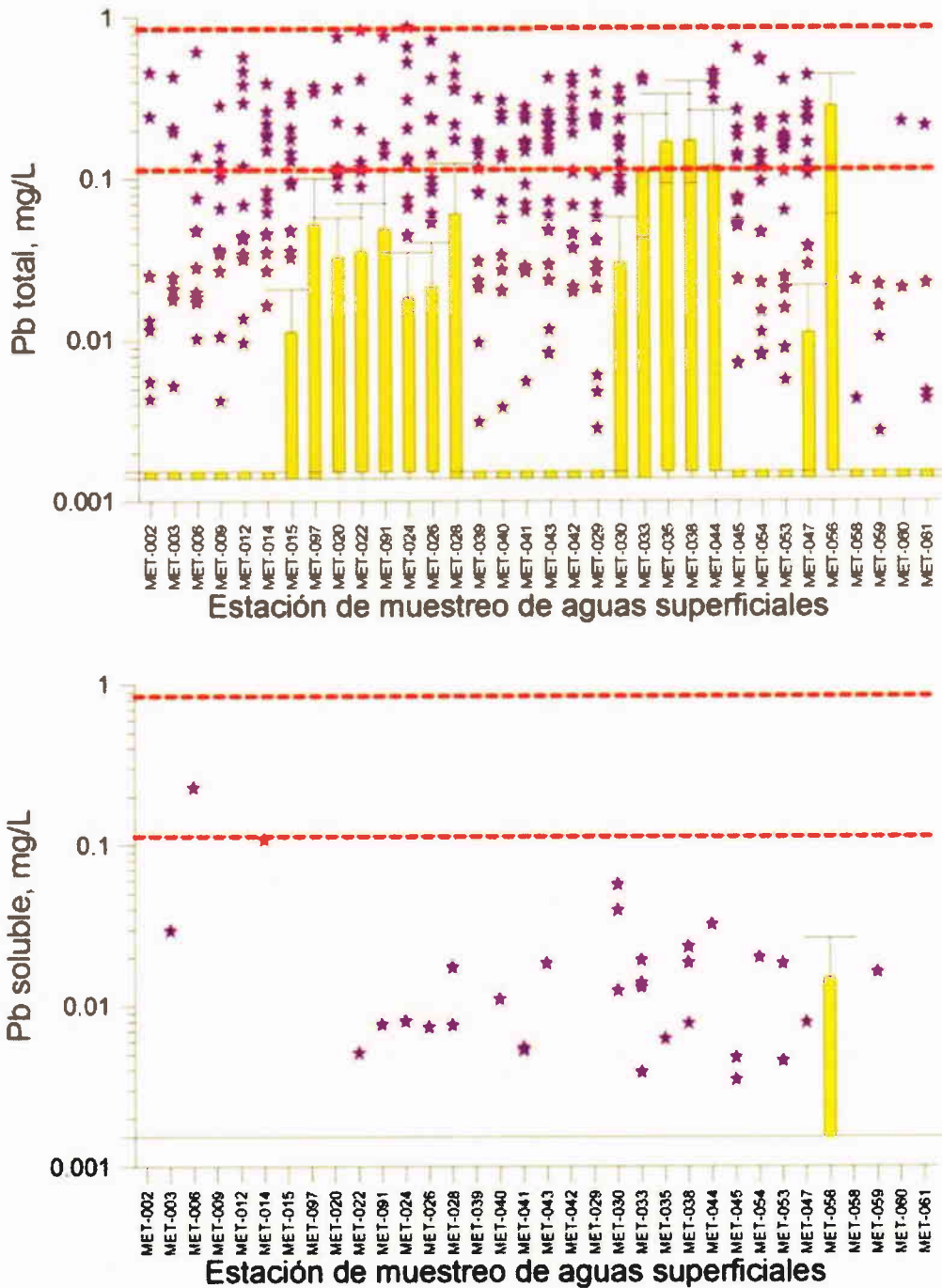
Figura 6.3 Comparación entre las concentraciones totales y solubles de arsénico (As) en aguas superficiales (Continuación)



NOTA 1: La figura muestra el valor de tendencia central de las concentraciones de Cu (raya dentro del rectángulo amarillo), los percentiles 25 y 75 de las concentraciones de Cu (parte inferior y superior del rectángulo amarillo), los mínimos y máximos de las concentraciones de Cu. También se muestran los valores anómalos de las de las concentraciones de Cu (estrella de color morado)

NOTA 2: Raya discontinua roja: Mínimo y máximo de las concentraciones Pre-derrame (Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del río Sonora en varias localidades, de varios municipios, en el Estado de Sonora, elaborado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) para la Comisión Estatal del Agua (CEA) en junio de 2006)

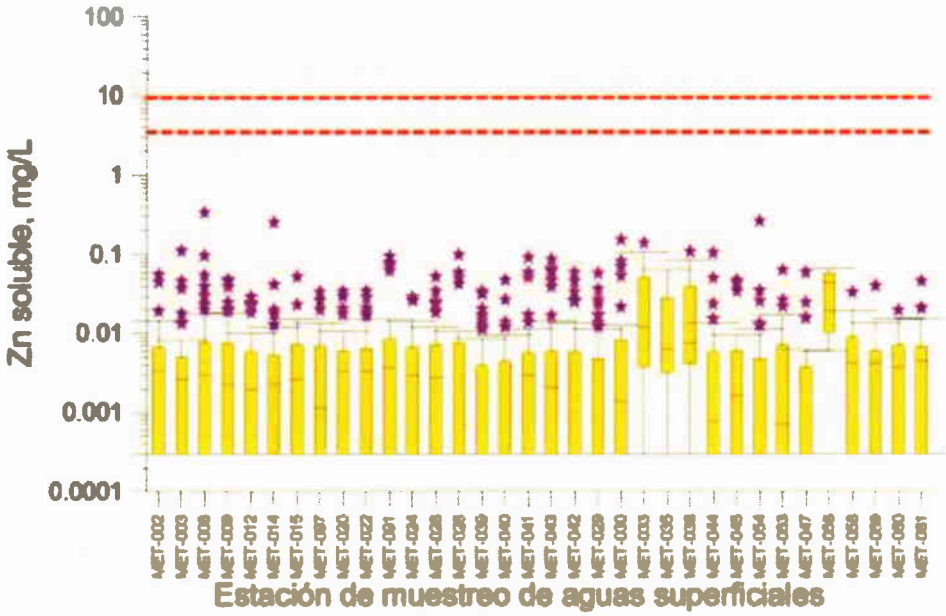
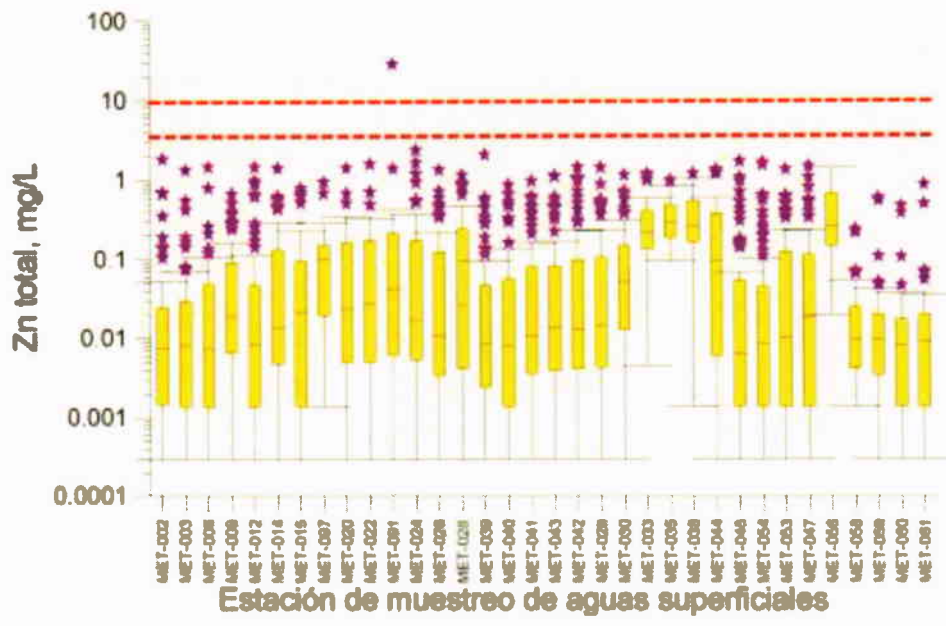
Figura 6.4 Comparación entre las concentraciones totales y solubles de cobre (Cu) en aguas superficiales (Continuación)



NOTA 1: La figura muestra el valor de tendencia central de las concentraciones de Pb (raya dentro del rectángulo amarillo), los percentiles 25 y 75 de las concentraciones de Pb (parte inferior y superior del rectángulo amarillo), los mínimos y máximos de las concentraciones de Pb. También se muestran los valores anómalos de las de las concentraciones de Pb (estrella de color morado)

NOTA 2: Raya discontinua roja: Mínimo y máximo de las concentraciones Pre-derrame (Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del río Sonora en varias localidades, de varios municipios, en el Estado de Sonora, elaborado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) para la Comisión Estatal del Agua (CEA) en junio de 2006)

Figura 6.4 Comparación entre las concentraciones totales y solubles de plomo (Pb) en aguas superficiales (Continuación)



NOTA 1: La figura muestra el valor de tendencia central de las concentraciones de Zn (raya dentro del rectángulo amarillo), los percentiles 25 y 75 de las concentraciones de Zn (parte inferior y superior del rectángulo amarillo), los mínimos y máximos de las concentraciones de Zn. También se muestran los valores anómalos de las de las concentraciones de Pb (estrella de color morado)

NOTA 2: Raya discontinua roja: Mínimo y máximo de las concentraciones Pre-derrame (Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del río Sonora en varias localidades, de varios municipios, en el Estado de Sonora, elaborado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) para la Comisión Estatal del Agua (CEA) en junio de 2006)

Figura 6.4 Comparación entre las concentraciones totales y solubles de zinc (Znb) en aguas superficiales (Continuación)

A.3) Calidad del agua de la presa El Molinito

El informe completo del estudio sobre la calidad del agua de la presa El Molinito se puede consultar en el Anexo 1.6.

A.3.1) Calidad del agua

En el periodo comprendido entre el 19 y 20 de mayo de 2015 se tomaron 76 muestras de agua en diferentes profundidades de la Presa El Molinito, con el fin de determinar su calidad actual (Fig. 6.5). Se determinaron concentraciones solubles¹⁵ y totales¹⁶ de los metales de interés y asociados al derrame en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología de la UNAM.

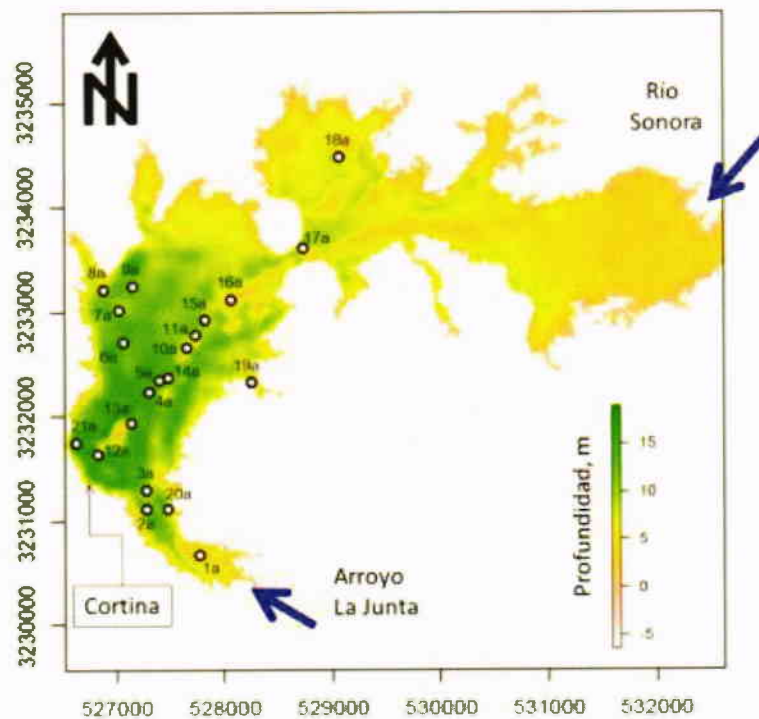


Figura 46.5 Ubicación de los sitios donde se tomaron muestras de la columna de agua, de la presa El Molinito

¹⁵ **Concentración soluble:** Para determinar las concentraciones solubles de los metales de interés las muestras de aguas se filtran en campo y luego se les agrega ácido nítrico concentrado para lograr un valor de pH menor a 2.0

¹⁶ **Concentración total:** Las concentraciones totales incluyen las concentraciones de los metales disueltos en el agua más las concentraciones de éstos en las partículas suspendidas. Para determinar las concentraciones totales, en el campo las muestras de aguas sin filtrar se preservan con ácido nítrico concentrado, para lograr un valor de pH menor a 2.0; con lo cual se disuelven los metales contenidos en el material particulado del agua de los cuerpos de agua estudiados.

Concentración soluble

- En el caso de las concentraciones solubles, NO se superó el límite máximo permisible de la NOM-127¹⁷ para aluminio (Al), Arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb) y zinc (Zn).
- Solamente, en el caso del manganeso soluble, en el 28.9% (n = 22 muestras) del total de muestras (n = 76) se supera el límite de la NOM-127.

Concentración total

- En el caso de las concentraciones totales en ninguna de las muestras se superó el límite máximo permisible de la NOM-127 para el bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), antimonio (Sb) y Zinc (Zn).
- En el caso de la concentración total del aluminio (Al), arsénico (As) y plomo (Pb) se supera el límite, de la NOM-127, en una sola muestra. Asumiendo que no hay errores de muestreo, preparación de muestras y procedimiento analítico, estos resultados indican que en el 98.7% de las muestras NO se supera el límite de la NOM-127 para el Al, As y Pb.
- En el caso del hierro total, en el 3.9% (n = 3 muestras) se supera el límite de la NOM-127.
- En el caso del manganeso total, en el 35.5% (n = 27 muestras) se supera el límite de la NOM-127.

Las muestras que superan el límite, de la NOM-127, para Mn y Fe, corresponden a muestras tomadas a profundidades mayores de 7.5 m.

Nuestros resultados, en la columna de agua de la presa "El Molinito" son similares y confirman los resultados obtenidos por ABC, que es el laboratorio acreditado que ha estado a cargo del muestreo y análisis de los cuerpos de agua (superficiales y subterráneos) de la sub-cuenca del Río Sonora, para valorar el impacto del derrame del pasado 06 de agosto de 2014 del Represo Tinajas 1, de la empresa Buena Vista del Cobre

Las concentraciones de Mn solubles (0.285 y 0.824 mg/L) y totales (0.327 y 0.944 mg/L), que superaron el límite de NOM-127, de acuerdo a los resultados de nuestro estudio de mayo de 2015, son inferiores a la concentración de Mn

¹⁷ **Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994**, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles (mg/L): Al = 0.2, As = 0.025, Ba = 0.7, Cd = 0.005, Cu = 2.0, Cr = 0.05, Fe = 0.3, Mn = 0.15, Hg = 0.001, Pb = 0.01, Zn = 5. En el caso del Sb y Ni que no están regulados en México, se toman los límites de la Organización Mundial de la salud (mg/L): Sb = 0.02 y Ni = 0.02

determinada en 2006, en el agua de la presa "El Molinito" que varió entre 1.51 y 1.66 mg/L, según lo reportado en el informe de ITSON para la Comisión Estatal del Agua en Sonora¹⁸.

Así mismo, las concentraciones de Fe total (0.35 y 1.39 mg/L), que superaron el límite de NOM-127, de acuerdo a los resultados de nuestro estudio de mayo de 2015, son inferiores a la concentración de Fe determinada en 2006, en el agua de la presa "El Molinito" que varió entre 1.56 y 1.907 mg/L, según lo reportado en el informe de ITSON para la Comisión Estatal del Agua en Sonora⁷.

Por lo antes mencionado se puede concluir que la calidad del agua de la presa El Molinito no está influenciada por el derrame de Buena Vista del Cobre, ocurrido el pasado 06 de agosto de 2014.

A.3.1) Calidad del sedimento del fondo de la presa

Entre el 27 y 29 de abril de 2015 se colectaron 20 muestras de sedimentos del fondo de la presa El Molinito, los resultados de los análisis indican que éstos se caracterizan por el enriquecimiento de los elementos mayores como aluminio (86,910 mg/kg – 100,887 mg/kg) hierro (39,017 mg/kg – 43,704 mg/kg) y manganeso (790 mg/kg -1,200 mg/kg); que son propios de las rocas de la zona. Los resultados también indican las relativamente bajas concentraciones de los elementos traza como el As (18 – 48 mg/kg), Cr (104 – 142 mg/kg), Cu (50 – 93 mg/kg), Pb (27 – 47 mg/kg) y Zn (85 – 24 mg/kg)

También se tomaron 6 muestras de sedimentos en la entrada sur de la presa El Molinito, en el denominado Arroyo La Junta; y los resultados indican que el Arroyo La Junta aporta a la Presa el Molinito sedimentos con concentraciones de Al (68,667 – 77,622 mg/kg), Fe (24,097 – 54,140 mg/kg), Mn (434 – 1293 mg/kg), As (20 – 64 mg/kg), Cr (105 – 183 mg/kg), Cu (35 - 138), Pb (11 – 18 mg/kg) y Zn (18 – 59 mg/kg).

Por otro lado, para valorar la calidad de los sedimentos del fondo de la presa El Molinito, se tomaron muestras superficiales con draga (modernas) y núcleos con nucleador Livingstone hasta llegar a la roca (históricos), que sirven como valores de referencia para valorar la calidad de los sedimentos modernos.

¹⁸ Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del Río Sonora en varias localidades, de varios municipios, en el estado de Sonora. Instituto Tecnológico de Sonora. 30 de junio de 2006. Ciudad Obregón, Sonora.

En lo que respecta al objeto que nos ocupa en este estudio (Calidad de las aguas de la presa El Molinito) en el citado estudio se afirma, literalmente, lo siguiente:

- "se observa una *pequeña* acumulación de Fierro de 1.907mg/l en la presa Abelardo Rodríguez Lujan en el monitoreo 1 y 1.560 mg/l en la presa El Molinito en el monitoreo 2"
- "también se observa una *pequeña* acumulación de Manganeso de 1.513 mg/l en la presa Abelardo Rodríguez Lujan en el monitoreo 1 y 1.665 mg/l en la presa El Molinito en el monitoreo 2.

Los resultados indican que no hay diferencias estadísticamente significativas en la composición química de los sedimentos modernos y los históricos, por lo que se puede concluir que no están afectados por el derrame.

El informe completo se puede consultar en el Anexo 1.7.

6.3 Calidad del agua subterránea de la cuenca del río Sonora que fue afectada por el derrame de BVC el pasado 06 agosto 2014.

El Laboratorio ABC realizó el monitoreo de aguas subterráneas diariamente desde el 18 de agosto de 2014 hasta el 30 de septiembre del 2014 y mensualmente desde octubre del 2014 hasta diciembre del 2015, colectándose un total de aproximadamente 1381 muestras en 32 pozos (Figura 6.5).

Estas muestras fueron analizadas en el Laboratorio ABC¹⁹. Se determinaron las concentraciones totales de 13 elementos químicos: aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, fierro, manganeso, mercurio, níquel, plomo y zinc.

En noviembre de 2015, el Instituto de Geología, UNAM realizó un único muestreo de aguas subterráneas en la cuenca del río Sonora. Los resultados de los análisis son similares a los reportados proo ABC para esa fecha. El reporte del muestreo y laboratorio se puede consultar en el Apéndice Muestreo 3 y el Apéndice de laboratorio 3, respectivamente. Los resultados obtenidos por la UNAM son similares a los reportados por ABC para esta fecha de muestreo.

Para realizar la interpretación del comportamiento de las concentraciones totales y solubles de los metales asociadas al derrame se seleccionaron los representativos de los elementos mayores (Al, Fe y Mn) los representativos de los traza (As, Cu y Pb).

A.1) Elementos mayores: hierro (Fe), aluminio (Al) y manganeso (Mn)

Para el caso del Fe en el 13.6% del total de las muestras se excede el límite de la NOM-127²⁰, mientras que para el Al y Mn se excede en el 7.9% y 2.2%, respectivamente. Sin embargo, las concentraciones actuales de Fe y Mn están dentro del intervalo de las concentraciones reportadas por la UNISON en el 2004 (Figura 6.6), por lo que no es posible asociar la presencia de estos metales con el derrame ocurrido el pasado 06 de agosto de 2014. Para el caso del Al no hay valores de fondo reportados.

¹⁹ Laboratorios ABC. Química investigación y análisis S.A. de C.V.

²⁰ Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización

A) Elementos traza: As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn y Cr

En general las concentraciones de estos elementos traza no superan los límites señaladas en la NOM-127²¹, con pocas excepciones, y están dentro del intervalo de los valores de fondo reportados por la UNISON en el 2004. En la Figura 6.7 se presenta el comportamiento de las concentraciones de As, Cu y Pb, como los elementos representativos de este grupo de elementos traza.

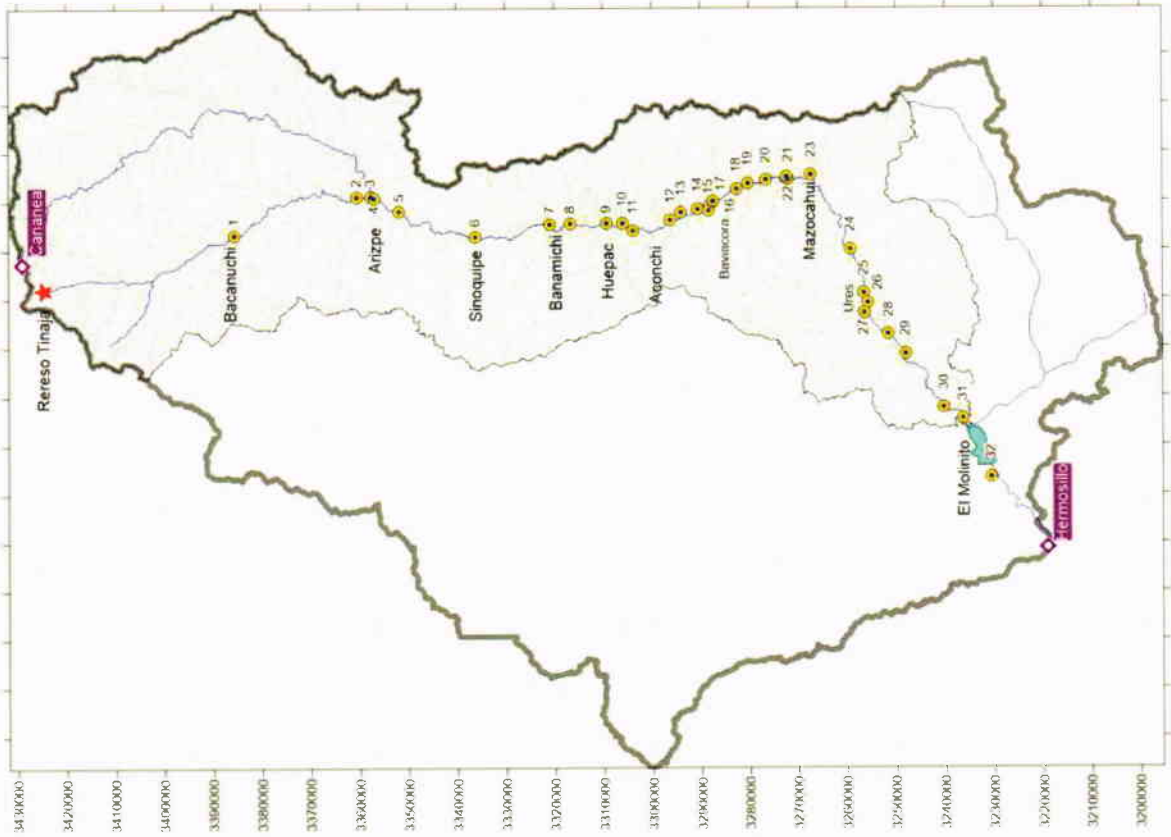
Con el fin de analizar las fluctuaciones de las concentraciones totales de los elementos mayores y traza en las aguas subterránea, en el periodo de muestreo (agosto 2014- diciembre 2015), se hizo un análisis temporal de las concentraciones de hierro (representativo de los elementos mayores) y del arsénico (representativo de los elemento traza) en las parte alta, media y baja de la cuenca del río Sonora.

En las Figuras 6.8 y 6.9 se puede observar que las fluctuaciones temporales de las concentraciones de los metales de interés se corresponden con las condiciones climáticas que cambian las tasas de recarga del acuífero de la zona de estudio; como es el caso de los huracanes Norberto y Odille ocurridos entre el 06 y 26 de septiembre de 2014, cuando precisamente se observan anomalía positivas de las concentraciones totales de los dos elementos guías (Fe y As) que estamos utilizando para esta interpretación. También se puede observar anomalías positivas de las concentraciones de Fe y As entre el 01 y 25 de octubre que se corresponden con lluvia anómalas en la zona. El detalle del comportamiento de la lluvia en la zona de estudio se puede consultar en el Anexo 1.8.

Si se considera que las rocas, suelos y sedimentos de la zona están enriquecidas en metales, es de esperarse que las fluctuaciones en las concentraciones totales tanto en aguas superficiales como subterráneas continúen ocurriendo a través del tiempo en función de la ocurrencia de lluvia y la consecuente erosión y migración de material fino hacia los ríos o hacia las aguas subterráneas someras.

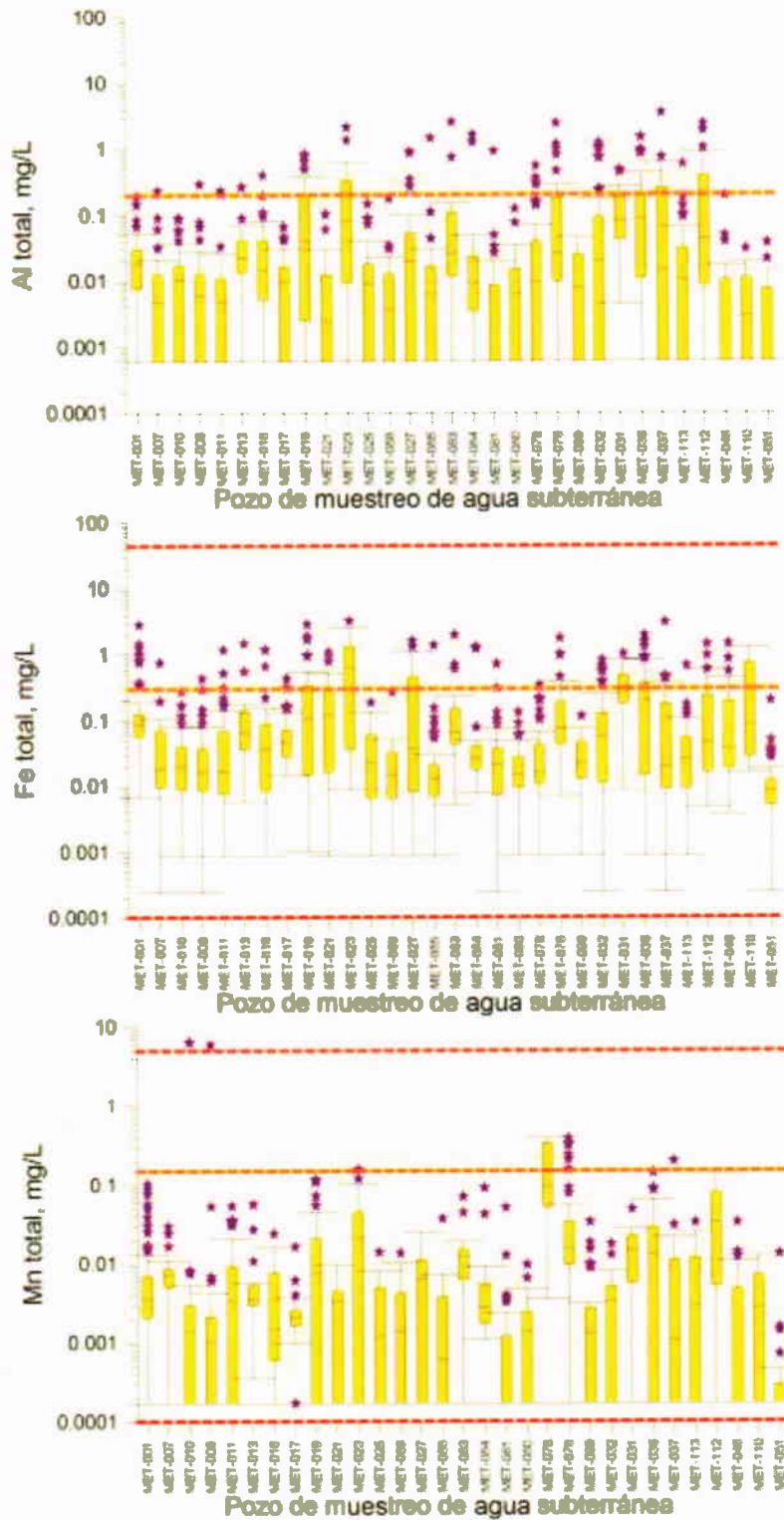
Es interesante observar que las mayores fluctuaciones se observan en los pozos de la parte media de la cuenca (Huepac – San Felipe, Baviacora y Mazacohui).

Es destacable que en la parte media de la cuenca se han identificado zonas de alteración intensa con abundante hierro y concentraciones variables de elementos traza asociados (Fig. 6.10); así como manifestaciones de aguas termales, a unos 4 km hacia el este de del poblado de Aconchi.



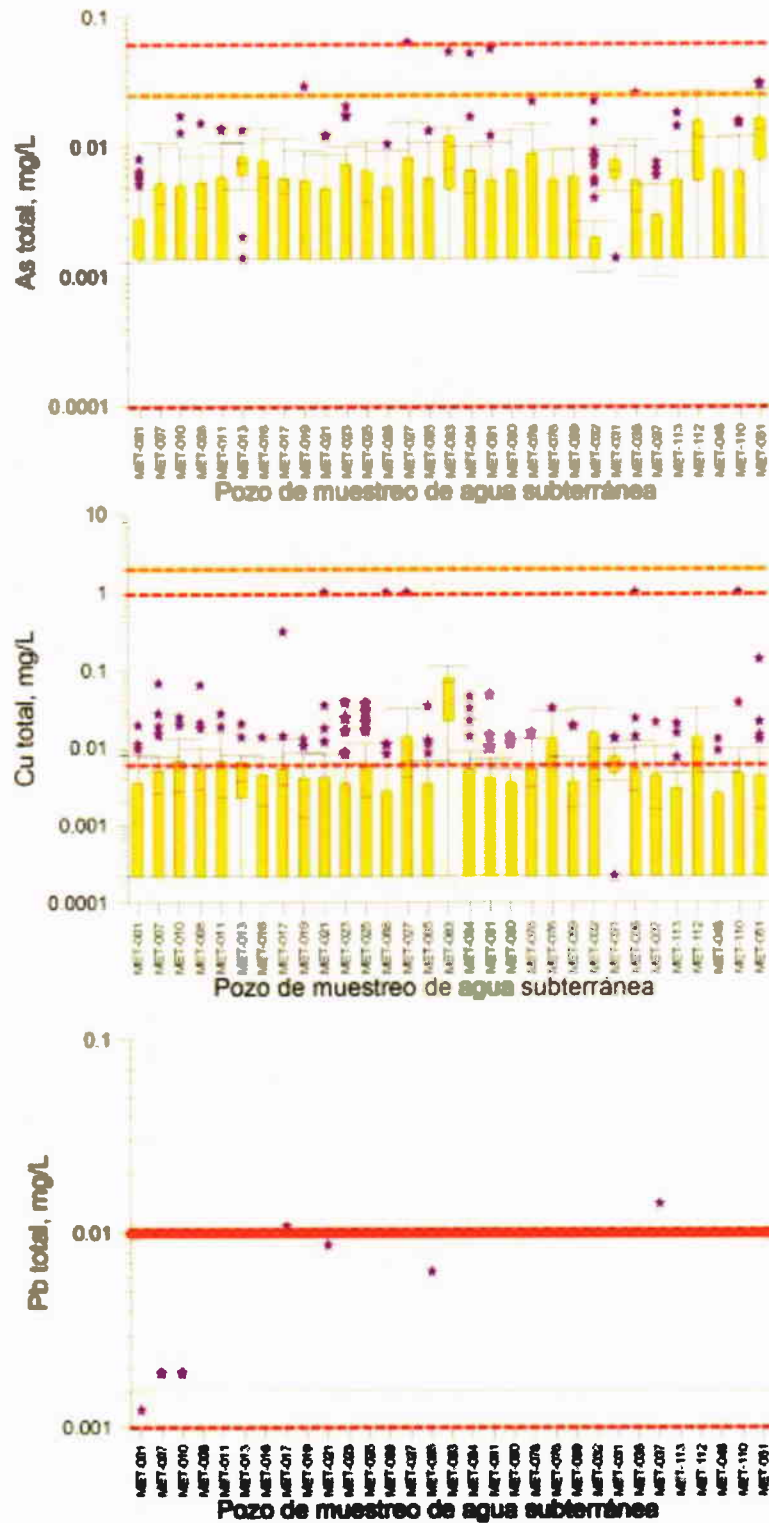
X	Y	CLAVE 2	Descripción	Clave mapa
573096	3385585	MET-001	BACANUCHI POZO	1
580915	3360457	MET-007	TAHUICHOPA POZO	2
580983	3357583	MET-010	ARIZPE POZO 3	3
580645	3356890	MET-008	ARIZPE POZO 2	4
577941	3351824	MET-011	BAMORI POZO	5
572759	3336160	MET-013	SINOQUIIPE POZO	6
575263	3320904	MET-016	BANAMÍCHI POZO	7
575407	3316670	MET-017	LAS DELICIAS POZO	8
575448	3309278	MET-019	HUEPAC POZO	9
575435	3305980	MET-021	RANCHITO DE HUEPAC POZO	10
573943	3303875	MET-023	SAN FELIPE POZO	11
576108	3296256	MET-025	LA ESTANCIA POZO	12
577658	3294047	MET-088	SAN PABLO POZO	13
578336	3290586	MET-027	SAN JOSÉ DE BAVIACORA POZO	14
578037	3288331	MET-085	BAVIACORA POZO 3	15
579857	3287436	MET-083	BAVIACORA POZO 1	16
580013	3287403	MET-084	BAVIACORA POZO 2	17
582423	3282587	MET-081	LA CAPILLA POZO	18
583588	3280300	MET-080	EL MOLINOTE POZO	19
584315	3276621	MET-078	LA LABOR POZO	20
584444	3272132	MET-076	LA AURORA POZO 1	21
584933	3272408	MET-099	LA AURORA POZO 2	22
585341	3267447	MET-032	MAZOCAHUI POZO	23
570092	3259307	MET-031	PUERTA DEL SOL POZO	24
561102	3256582	MET-034	SAN PEDRO DE URES POZO	25
559091	3255743	MET-036	URES POZO	26
557017	3256472	MET-037	SANTIAGO DE URES POZO	27
552698	3251653	MET-113	GUADALUPE DE URES POZO	28
548632	3248009	MET-112	SAN RAFAEL DE URES POZO	29
537677	3240322	MET-046	SAN JOSÉ DE GRACIA POZO	30
535422	3236348	MET-110	TOPAHUE POZO	31
523421	3230543	MET-051	EL MOLINITO POZO	32

Figura 6.5 Ubicación de los pozos utilizados para el muestreo de agua subterránea en la cuenca del río Sonora



- Mínimo y máximo concentraciones de fondo (pre-derrame, UNISON, 2004)
- Limite NOM-127

Figura 6.7 Comportamiento de las concentraciones totales de aluminio (Al), hierro (Fe) y manganeso (Mn), que son representativos de los elementos mayores, en aguas subterráneas de la cuenca del río Sonora



- - - - Mínimo y máximo concentraciones de fondo (pre-derrame, UNISON, 2004)
- - - - Limite NOM-127

Figura 6.7 Comportamiento de las concentraciones totales de arsénico (As), cobre (Cu) y plomo (Pb) que son representativas de los elementos traza, en aguas subterráneas de la cuenca del río Sonora

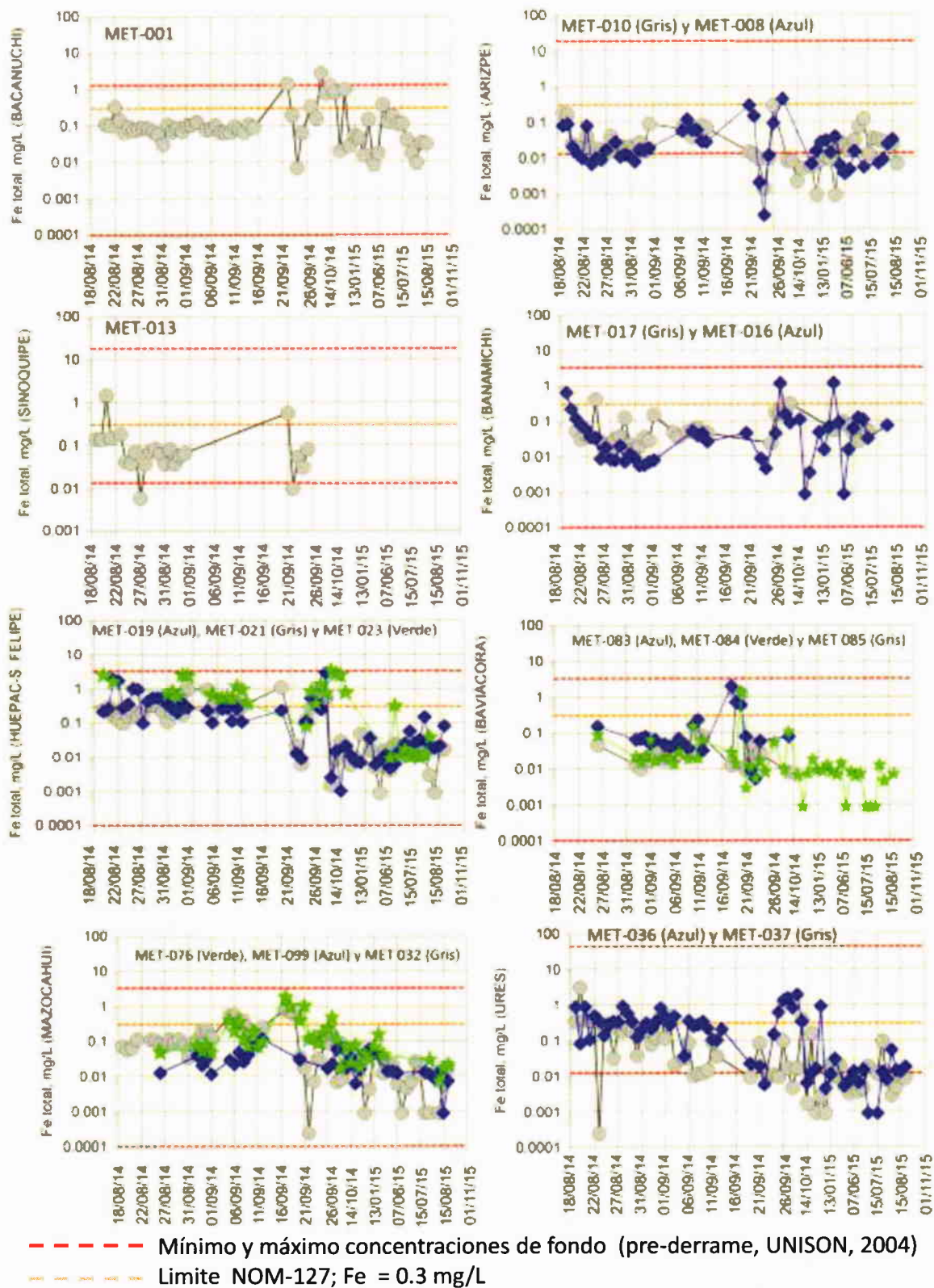


Figura 6.8 Fluctuación temporal de las concentraciones totales de hierro (Fe) en aguas subterráneas de la cuenca del río Sonora en su parte alta (Bacanuchi y Arizpe), media (Sinoquipe, Banámichi, Huépac – San Felipe, Baviácora, Mazocahui) y baja (Ures)

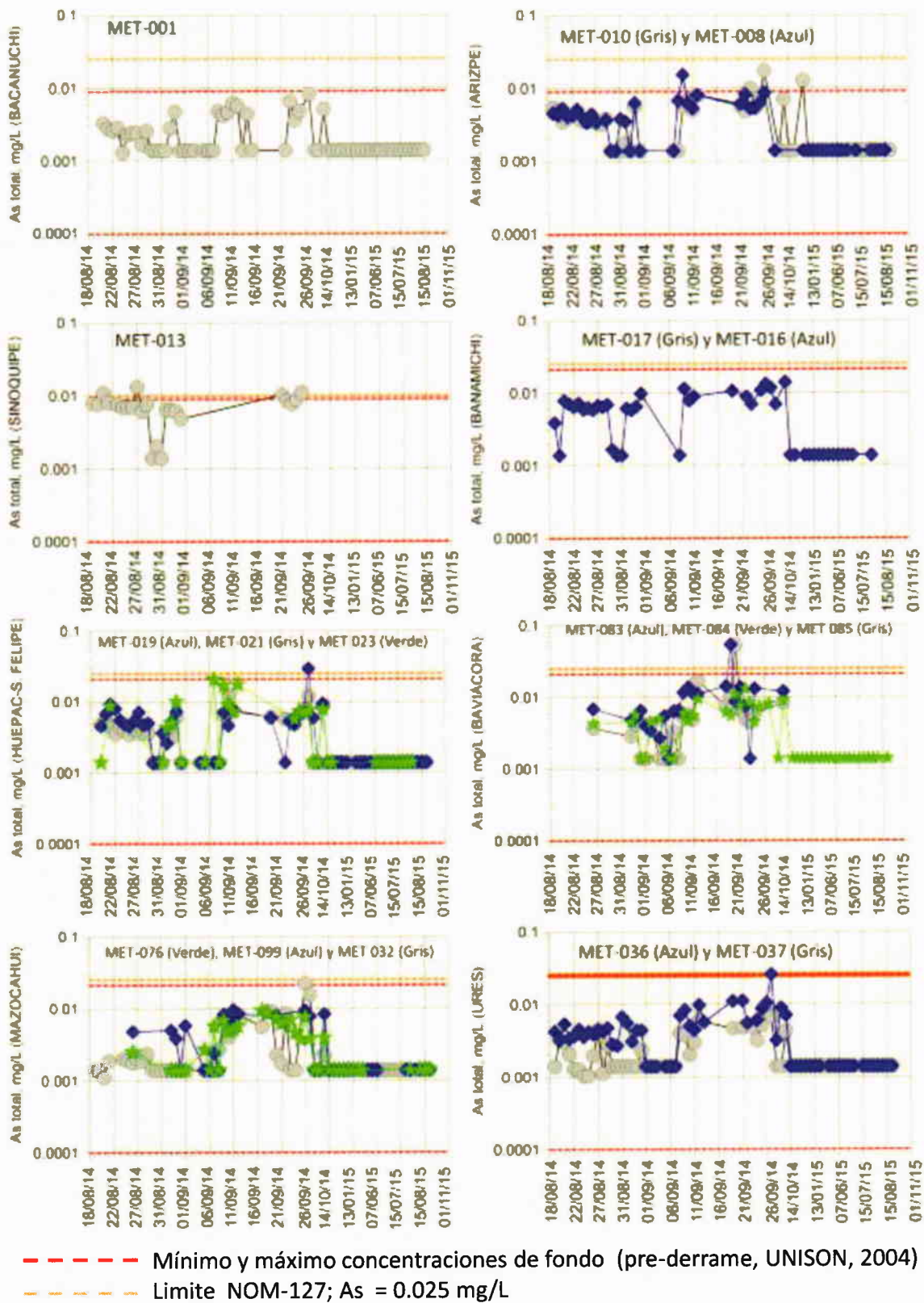


Figura 6.9 Fluctuación temporal de las concentraciones totales de arsénico en aguas subterráneas de la cuenca del río Sonora en su parte alta (Bacanuchi y Arizpe), media (Sinoquipe, Banámichi, Huépac – San Felipe, Baviácora, Mazocahui,) y baja (Ures)



Muestra de Roca	As	Cu	Pb	Zn
	mg/kg			
Roca de color BLANCO	59	26	11	29
Roca de color ROJO	674	48	33	<LOD
Roca de color NEGRO	74	165	68	114
Roca Agua Caliente (Aconchi)	99	47	1779	266

Muestra de Roca	Fe	Mn	Ti	
	mg/kg			
Roca de color BLANCO	6716	157	689	
Roca de color ROJO	91497	254	502	
Roca de color NEGRO	38192	623	2814	
Roca Agua Caliente (Aconchi)	17048	958	1031	



Figura 6.10 (A) Afloramiento de rocas alteradas en las orillas del río Sonora y su composición química determinada por Fluorescencia de rayos X. (B) Afloramiento de pirolusita *Pirolusita* (MnO_2) dendrítica en la parte norte de la cuenca

VII EVALUACIÓN DEL DAÑO AMBIENTAL EN SUELOS Y SEDIMENTOS

7.1 Caracterización del material visiblemente impactado por el derrame y recolectado durante las acciones de remediación realizada por Buena Vista del Cobre (BVC).

El informe completo, del estudio del material visiblemente impactado por el derrame y recolectado durante las acciones de remediación realizada por Buena Vista del Cobre, se puede consultar en el Anexo 1.9.

Debido a la acción de agregar cal como una acción inmediata, realizada por BVC, para elevar el pH de la solución ácida ferro-cuprífera derramada a la cuenca del río Sonora; se propició la precipitación de los metales asociados al derrame, lo que pasaron de la fase acuosa a los sedimentos de los arroyos y ríos afectados. El principal mineral que precipitó fue la jarosita ($XFe_3(SO_4)_2(OH)_6$), que tiene un color amarillo-naranja y también precipitó yeso ($CaSO_4$), que tiene una coloración blanca.

La presencia de estos dos minerales secundarios con su coloración característica muy diferente a la coloración de los minerales naturales de la zona, permitió distinguir visualmente los sedimentos y suelos afectados por el derrame, de tal manera que la empresa BVC entre agosto y octubre de 2014 recolectaron 6,096 m³ sedimentos visiblemente impactados por el derrame, y entre marzo y abril de 2015 se recolectaron 1,302 m³ de sedimentos y suelos visiblemente impactados por el derrame. Estos sedimentos y suelos impactados que se recolectaron fueron depositados en los caminos de acceso de la presa de jales de la empresa BVC (Figura 7.1).

Con el fin de caracterizar los materiales visiblemente impactados, y recolectados durante la remediación, realizada por BVC, el Instituto de Geología (IGL) de la UNAM realizó un muestreo orientativo y exploratorio de los materiales recolectados y que actualmente están almacenados en los caminos de acceso de la presa de jales de la mina Cananea (Fig. 7.1 y 7.2).

En las muestras se realizaron análisis de pH, conductividad eléctrica, concentración total de elementos mayores y traza, asociados al derrame. Todos los análisis se realizaron en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía del Instituto de Geología de la UNAM.

Las concentraciones totales de los elementos mayores se determinaron utilizando la técnica de fluorescencia de rayos X, con un espectrómetro RIGAKU, PRIMUS II, y las concentraciones totales de los elementos traza por Fluorescencia de Rayos X, Método EPA 6200 (Anexo 1.9).

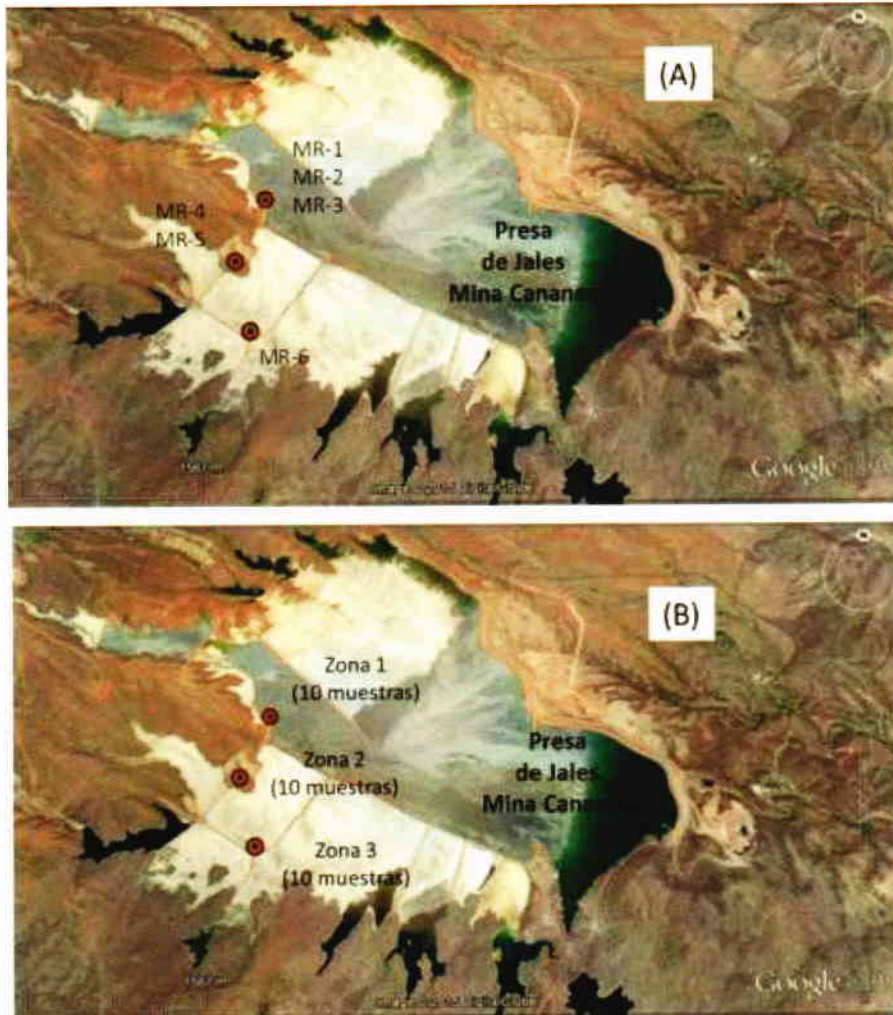


Figura 7.1 Ubicación de las muestras del material producto de la remediación de BVC, almacenados en los caminos de acceso de la Presa de Jales de la mina Cananea. (A) Muestreo Orientativo de febrero de 2015. (B) Muestreo exploratorio de abril 2015



Figura 7.2 Fotografías de sedimentos impactados por el derrame y recolectados durante la remediación. NOTESE en las fotografías de detalle la coloración amarillo-naranja y blanca debido a la presencia de jarosita y yeso, respectivamente

Por otro lado, se determinaron las concentraciones totales de los metales de interés traza determinadas por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES); previa digestión ácida (Tabla 7.1. El detalle e informe de laboratorio se puede consultar en el Apéndice 4. Los resultados obtenidos por ICP-OES son comparables a los ya reportados que fueron obtenidos por FRX.

En el Informe de Avances No.2, elaborado el 07.05.215 y entregado al FIDEICOMISO RÍO SONORA, (Anexo 1.9); se reportó que considerando la composición química de la solución ácida ferro-cuprífera derramada y conociendo el volumen que se dispersó en los cauces de los arroyos y ríos (37,634,000 litros), y asumiendo una densidad unitaria, se estimó que la carga contaminante vertida a los arroyos de la cuenca del río Sonora es, en orden descendente, de: 40,645 kg de hierro (Fe); 17,349 kg de aluminio (Al); 4,290 kg de cobre (Cu); 3,692 kg de manganeso (Mn); 1919 kg de zinc (Zn); 1,607 kg de arsénico (As); 414 kg de níquel (Ni); 292 kg de cadmio (Cd); 94 kg de plomo (Pb) y 58 kg de cromo (Cr).

Por otro lado, utilizando el mismo procedimiento del Informe de Avances No.2 (Anexo 1.9), pero considerando las concentraciones totales de los metales de interés determinadas por ICP-OES, se estima que en los materiales removidos durante la remediación están contenidos: 377,063 kg de Fe, 279,465 kg de Al,

4,237 kg de Cu, 7,491 kg de Mn, 1,801 kg de Zn, 540 kg de As, 217 kg de Ni, 59 kg de Cd, 552 kg de Pb y 318 k de Cr.

Sin embargo, es importante aclarar que la cantidad de metales contenidos en los materiales removidos en la remediación es una mezcla de los metales liberados por el derrame más los metales de origen natural que existen en la cuenca; y no es posible diferenciarlos; por lo tanto se puede concluir que hubo una colecta importante, aunque difícilmente cuantificable, de los metales vertidos por la ruptura del represo Tinajas 1.

Parámetro	Estadígrafo		Parámetro	Estadígrafo	
pH	Mínimo	3.2	Zinc (Zn), mg/kg	Mínimo	105.3
	Máximo	9.1		Máximo	559.9
	Promedio	6.2		Promedio	185.9
CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$	Mínimo	149	Arsénico (As), mg/kg	Mínimo	12.1
	Máximo	2300		Máximo	345.2
	Promedio	799		Promedio	55.7
Hierro (Fe), mg/kg	Mínimo	27918	Níquel (Ni), mg/kg	Mínimo	11.6
	Máximo	91268		Máximo	34.7
	Promedio	38909		Promedio	22.4
Aluminio (Al), mg/kg	Mínimo	13979	Cadmio (Cd), mg/kg	Mínimo	4.1
	Máximo	57770		Máximo	12.8
	Promedio	28838		Promedio	6.1
Cobre (Cu), mg/kg	Mínimo	94.1	Plomo (Pb), mg/kg	Mínimo	35.7
	Máximo	1031.9		Máximo	155.9
	Promedio	437.3		Promedio	57.0
Manganeso (Mn), mg/kg	Mínimo	131.8	Cromo (Cr), mg/kg	Mínimo	13.0
	Máximo	2023.0		Máximo	73.9
	Promedio	773.0		Promedio	32.8

Tabla 7.1 Estadística descriptiva de parámetros generales (pH y conductividad eléctrica "CE") y de las concentraciones totales de los metales asociados al derrame, determinadas por ICP-OES

Es importante resaltar que los materiales contaminados que se colectaron, y se depositaron en los caminos de acceso de la presa de jales de BVC, se caracterizan por una coloración amarillo-naranja (presencia de jarosita) y blanco (presencia de yeso) (Fig. 23); además de presentar valores de conductividad eléctrica (CE) altos (media = 799 $\mu\text{S}/\text{cm}$, máximo = 2300 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Estos resultados indican que los sedimentos y suelos impactados por el derrame se caracterizan por presentar una coloración amarillo-naranja y blanca; y además por presentar altos valores de CE, por lo que estos parámetros, de naturaleza física, son un buen indicador para seguir el rastro de la contaminación residual, después de la remediación, en los cauces de arroyos y ríos por donde fluyó el derrame de Buena Vista del Cobre.

En la figura 7.3 se observa que la proporción entre metales obtenida de las muestras del material visiblemente impactado y del precipitado de la Tinaja 1 (ver Capítulo IV de este informe) son variables y difieren de los valores de fondo de la zona norte (ver Capítulo V de este informe), por lo cual van a ser utilizadas para discutir la afectación ambiental en los apartados siguientes del presente informe.

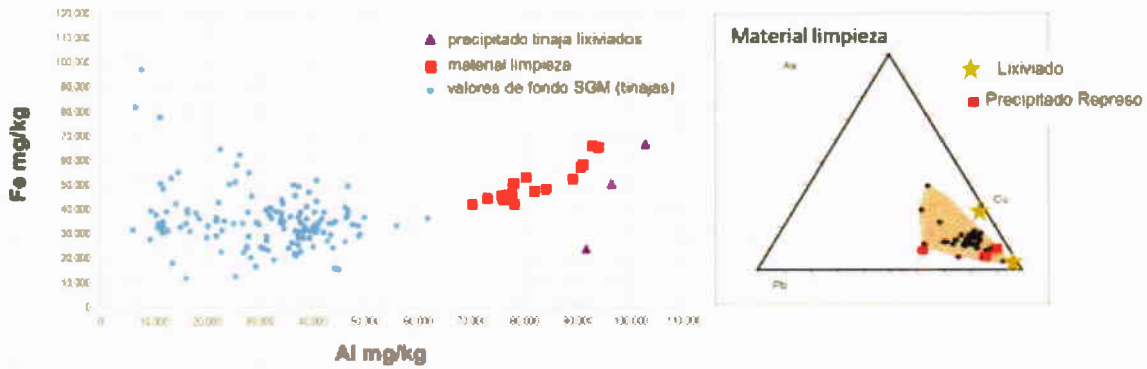


Figura 7.3 Proporción de Fe, Al, As, Cu y Pb en muestras del material visiblemente impactado recolectado por BVC.

7.2 Evaluación de la calidad de suelos y sedimentos superficiales y hasta 3.5 de profundidad

En el periodo entre el 25 y 28 de febrero de 2015, se tomaron un total de 313 muestras de suelos y sedimentos distribuidas en 12 transectos de hasta 0.5 m de profundidad. Las concentraciones totales de los metales de interés se determinaron por Fluorescencia de Rayos X, Método EPA 6200. El respectivo informe de muestreo, informe de laboratorio y la interpretación se puede consultar en el Informe de Avances No.1, elaborado el 22.05.2015 y entregado al FIDEICOMISO RIO SONORA (Anexo 1.3).

Sin embargo, en el 2016 se determinaron las concentraciones de los metales de interés por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES); previa digestión ácida. El informe de laboratorio se puede consultar en el Apéndice de Laboratorio 1..

Así mismo, en el periodo entre el 04 y 11 de julio de 2015 se tomaron un total de 865 muestras de suelos y sedimentos en zanjas de hasta 3.50 m de profundidad distribuidos en 26 transectos perpendiculares al arroyo Tinajas y ríos Bacanuchi y Sonora (Fig. 7.4). El reporte de muestreo se puede consultar el Apéndice de Muestreo 1.

Los transectos se trazaron perpendiculares al cauce de los arroyos y ríos para la excavación de zanjas en cada uno de los transectos. En cada una de estas zanjas se tomaron muestras de suelos y sedimentos en tres diferentes profundidades.

Las concentraciones totales de los metales de interés se determinaron por Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES); previa digestión ácida. El informe de laboratorio se puede consultar en el Apéndice de Laboratorio 1.

Cuando se hace la comparación de las concentraciones totales de los metales en suelos y sedimentos del arroyo Tinajas y ríos Bacanuchi y Sonora con los valores generales de fondo de toda la cuenca, se observa que en general, que las concentraciones de los metales en las muestras de suelos y sedimentos colectadas en ambos muestreos están dentro del intervalo de los valores de fondo (Fig. 7.5).

Sin embargo un análisis de los datos considerando los valores de fondo para cada parte de la cuenca indica que:

- A) En la zona del arroyo Tinajas, en algunas muestras se supera ligeramente el valor máximo de fondo para Al, Mn, Cu y Cd (Fig. 7.6). También se determinaron valores relativamente bajos pH y los valores relativamente altos de conductividad eléctrica, en algunas muestras, (Fig. 7.7 y 7.8) que son indicadores indirectos de la afectación asociada al derrame, del pasado

06 de octubre de 2014. Observaciones de campo permiten identificar estratos con una coloración café-amarilla, que parece indicar afectación asociada al derrame (Fig. 7.9).

- B) En la zona de la parte alta del río Bacanuchi, en algunas muestras se supera ligeramente el valor máximo de fondo para Al, Mn, Cu y Cd (Fig. 7.10). Así mismo, los valores de conductividad eléctrica son relativamente altos en algunas muestras; pero los valores de pH son neutros y ligeramente básicos (Fig. 7.11 y 7.12); lo que no corresponde a la afectación ocasionada por el derrame del pasado 06 de agosto de 2014.
- C) En la zona del río Sonora, los resultados de las concentraciones de los metales son inferiores a los valores de fondo, los valores de pH son neutros y ligeramente básicos y los valores de CE son relativamente bajos; lo que indica que tanto los suelos como los sedimentos de la zona del río Sonora no están afectados por el derrame del pasado 06 de agosto de 2014.

Por otro lado, el análisis de la relación Fe/Al (Fig. 7.13) indica que:

- A) En las muestras colectadas en el arroyo Tinajas y la parte alta del río Bacanuchi; las relaciones Fe/Al se ubican entre las relaciones Fe/Al de los valores de fondo y de los materiales impactados por el derrame, que fueron recolectados, durante la remediación, y depositadas en los accesos de la presa de jales de la empresa; lo que parece indicar la contaminación residual asociada al derrame.
- B) En las muestras colectadas en la parte baja del río Bacanuchi y en todo el río Sonora las relaciones Fe/Al son similares a las relaciones en las muestras de fondo, lo que indica que no hay contaminación residual en esta parte de la cuenca.

Así mismo, el análisis ternario As-Pb-Cu indican que:

- A) En las muestras del arroyo Tinajas y río Bacanuchi se observan concentraciones de Cu mayores con respecto a Pb y As, similares a las de los materiales impactados por el derrame, que fueron recolectados, durante la remediación, y depositadas en los accesos de la presa de jales de la empresa material de limpieza. Lo que parece indicar la presencia de contaminación residual (Fig. 7.14)
- B) En las muestras de río Sonora la relación Cu-As-Pb son similares a la de los valores de fondo (Fig. 7.15)

De acuerdo a estos resultados se delimita una zona de aproximadamente 50 km, arroyo Tinajas y parte alta del río Bacanuchi, hasta antes del poblado del mismo nombre (Fig. 7.16), donde se identifican anomalías geoquímicas intermitentes (concentraciones totales de algunos metales superiores a valores de fondo, valores bajos de pH y valores altos de conductividad eléctrica).

En esta zona de aproximadamente 50 km se requiere estudios adicionales para responder a la pregunta: ¿Estas anomalías se deben al derrame del pasado 06 de agosto del 2014, o se deben a eventos antropogénicos diferentes al derrame en cuestión, o se deben a las condiciones naturales geológicas de la zona?

Para dar respuesta a esta pregunta es necesario realizar los siguientes estudios:

1. Caracterización mineralógica. Como ya se argumentó en este informe, la presencia de jarosita, mineral secundario de Fe, es una guía mineralógica para identificar al medio abiótico afectado por el derrame del pasado 06 de agosto de 2014.
2. Valoración del riesgo ambiental, a través de la determinación de las concentraciones de los metales. La hipótesis planteada es que los metales del medio abiótico afectado por el derrame del 06 de agosto de 2014 deben ser más geodisponibles que los metales asociados a eventos antropogénicos muy viejos o que ocurren naturalmente por la naturaleza geológica de la zona.

Sin embargo, independientemente de que la presencia de los metales pesados determinados en la zona no saturada se deba a la naturaleza geológica de la zona o al derrame del 06/08/16 o a otros eventos antropogénicos históricos, es necesario valorar el riesgo de la liberación de los metales pesados, que ponga en riesgo la calidad de las aguas subterráneas de la zona de estudio, ante dos eventos antropogénicos futuros que son probables en la zona:

- 1) Otro derrame de solución ácida de la empresa BVC

Bajo las condiciones ácidas que prevalecerían ante otro derrame de los repesos de solución ácida ferro-cuprífera de BVC, los metales que actualmente están en formas minerales estables podrían volverse inestables, al aumentar la acidez del medio, y liberar a los metales pesados, con lo que se pondría en riesgo la calidad de las aguas subterráneas, que abastecen a las poblaciones de la cuenca del río Sonora.

- 2) Descarga de aguas negras de los poblados cercanos a los ríos Bacanuchi y Sonora.

La descarga de aguas negras a las aguas superficiales de los ríos Bacanuchi y Sonora imprimirían un ambiente reductor capaz de desestabilizar los minerales primarios de Fe y Mn que ocurren de manera natural, o a los minerales secundarios (de Fe y Mn) que se formaron debido a derrame del 06/08/2014 y que actualmente están estables y retenidos a uno 1.0 y 2.0 m e profundidad; y conteniendo en su estructura cristalino a algunos elementos tóxicos traza como As, Pb, etc.

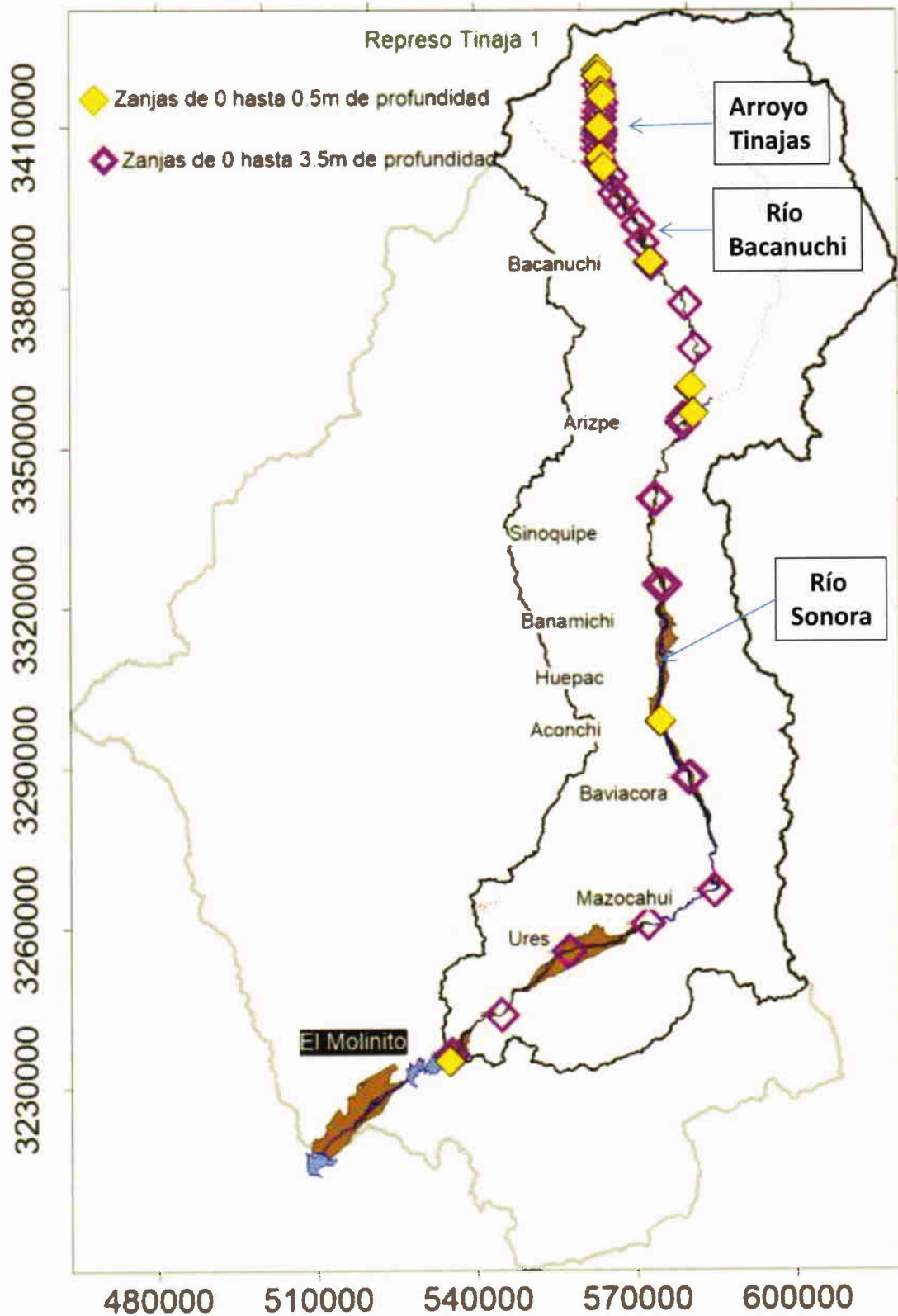
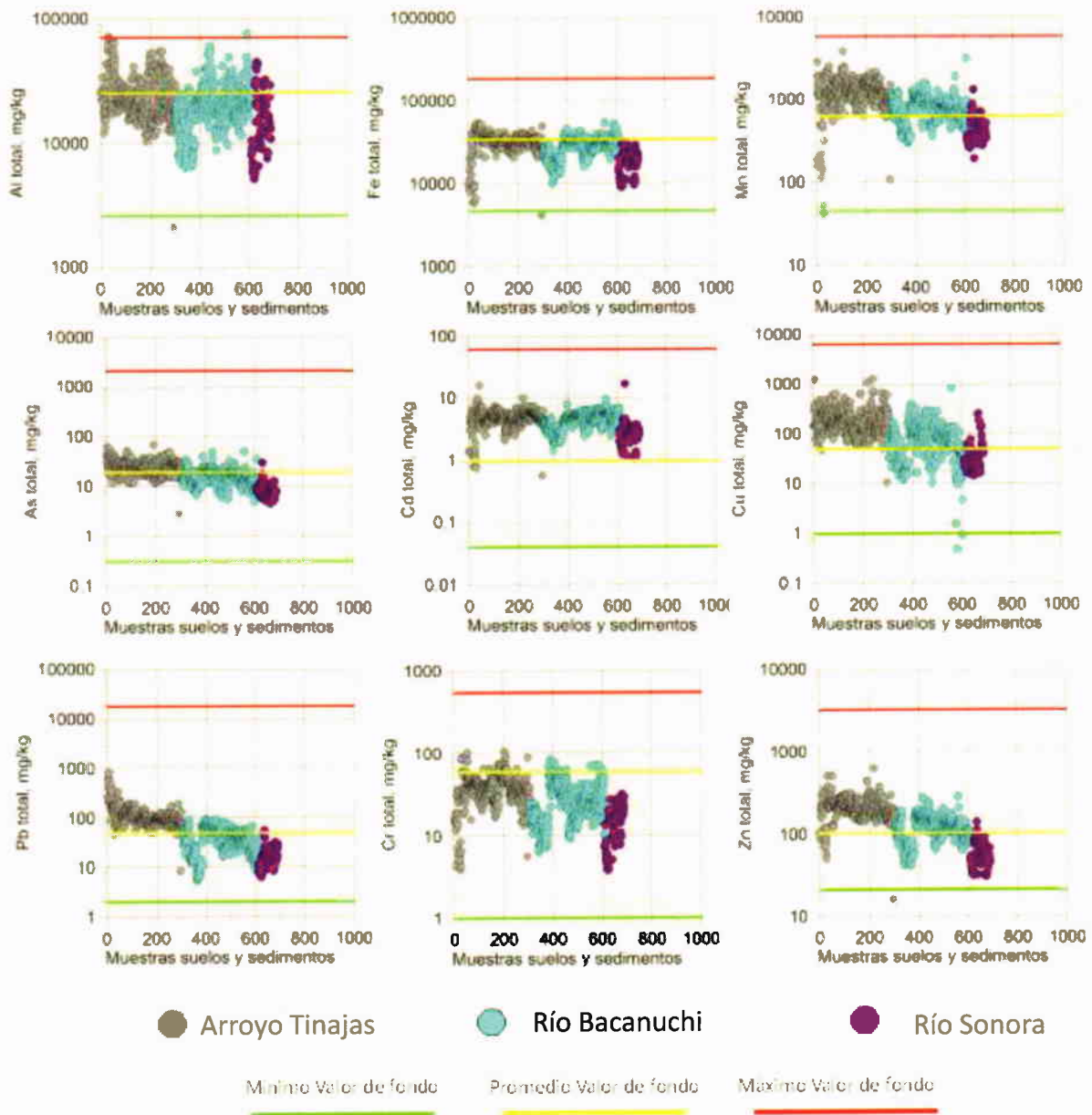


Figura 7.4 Ubicación de transectos donde se colectaron muestras de suelo y sedimentos a diferentes profundidades en zanjas de 0.0 – 0.5 m y de 0.0 – 3.5 m de profundidad, en el arroyo Tinajas, ríos Bacanuchi y río Sonora



Servicio Geológico Mexicano: valores para toda la cuenca

Figura 7.5 Comparación entre las concentraciones totales, en suelos y sedimentos, de los metales asociados, al derrame, en arroyo Tinajas y ríos Bacanuchi y Sonora, con los valores de fondo de toda la cuenca

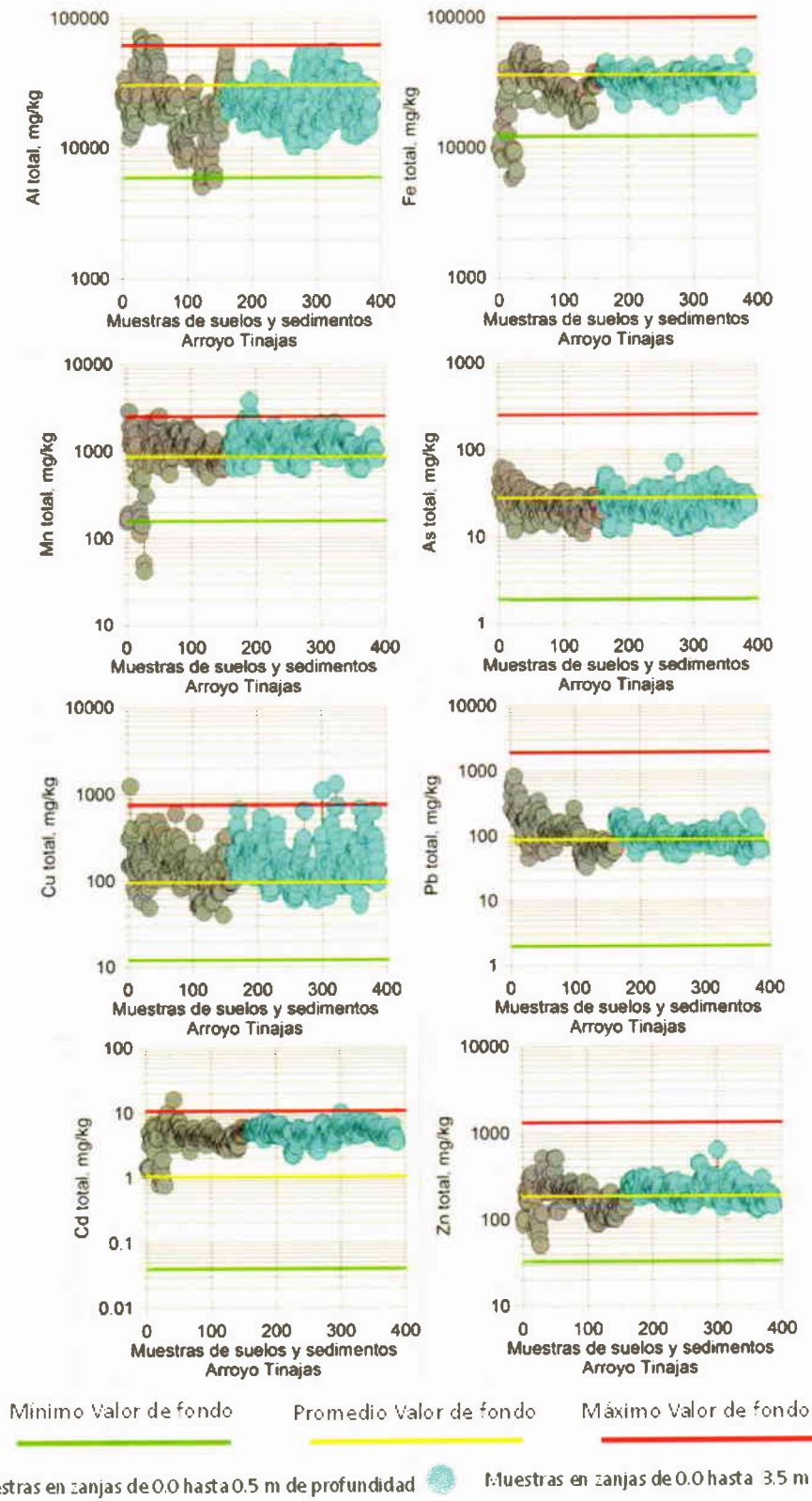


Figura 7.6 Comparación entre las concentraciones totales, en suelos y sedimentos, de los metales asociados, al derrame, en la zona de arroyo Tinajas, con los valores de fondo de la zona de Tinajas

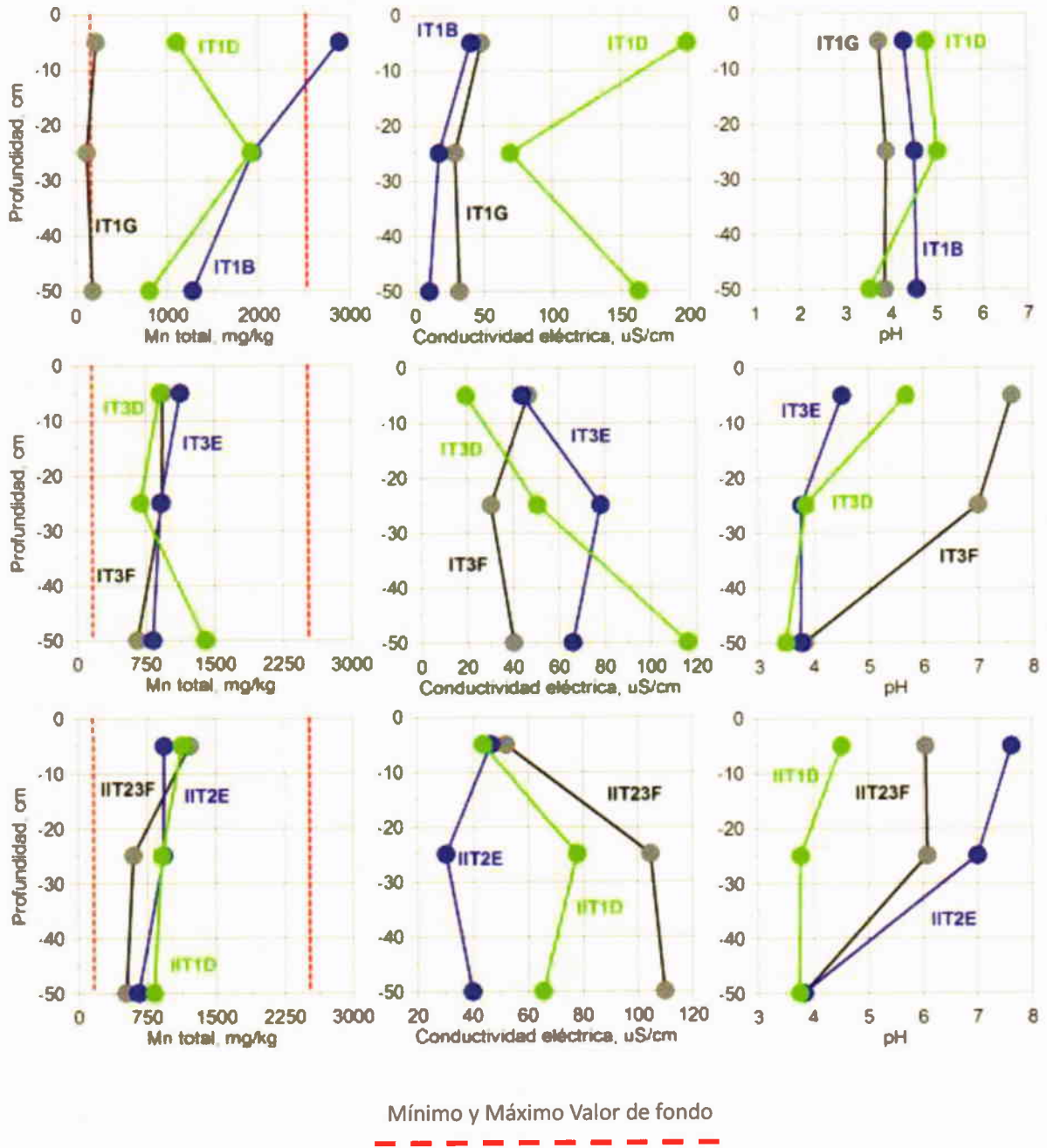


Figura 7.7 Perfiles geoquímicos de manganeso, conductividad eléctrica y pH en zanjas (0.0 – 0.5 m) excavadas en la zona del arroyo Tinajas

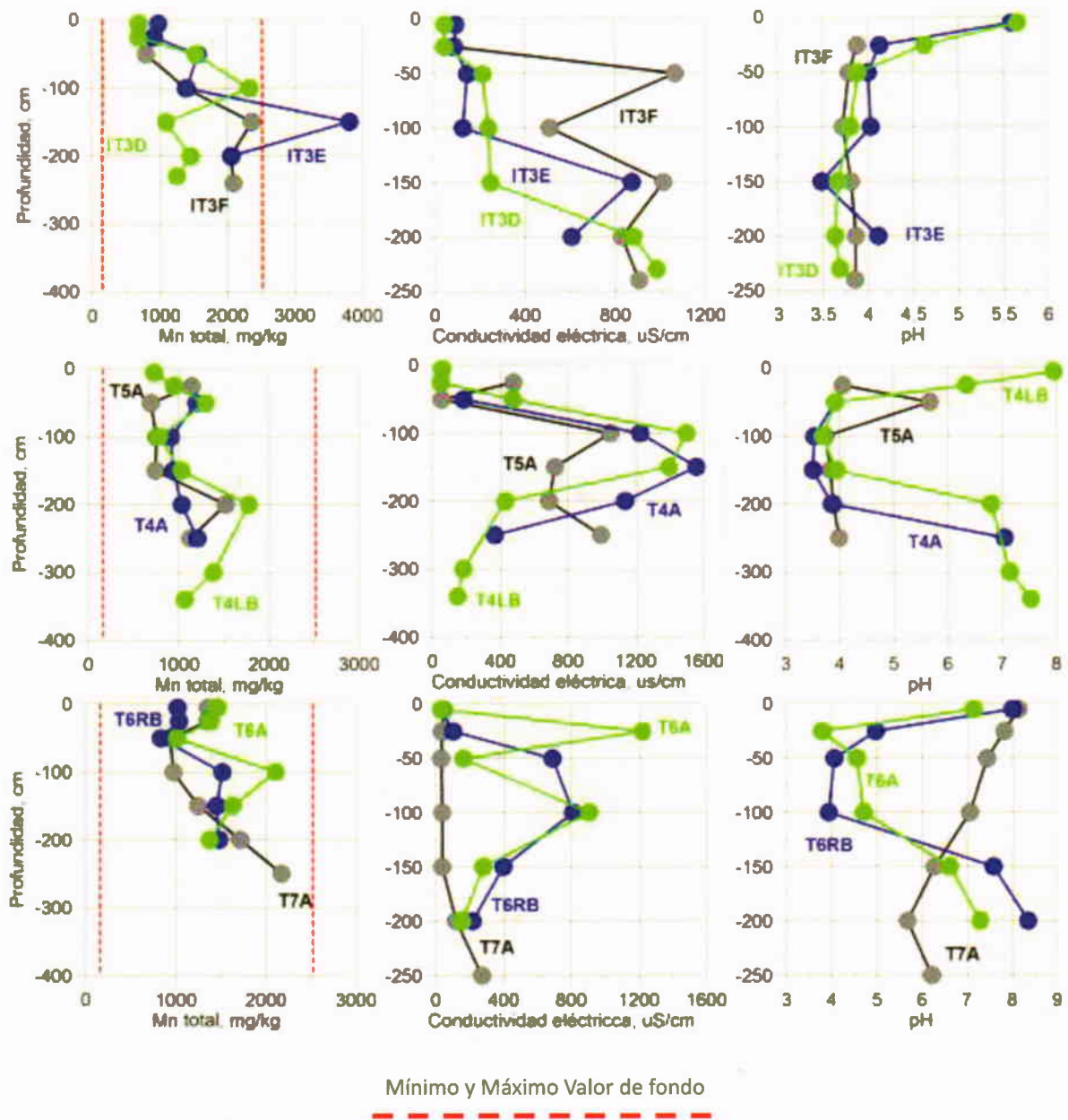


Figura 7.8 Perfiles geoquímicos de manganeso, conductividad eléctrica y pH en zanjas (0.0 – 3.5 m) excavadas en la zona del arroyo Tinajas



Figura 7.9 Fotografías de zanjas excavada en el lecho del cauce del Arroyo Tinajas

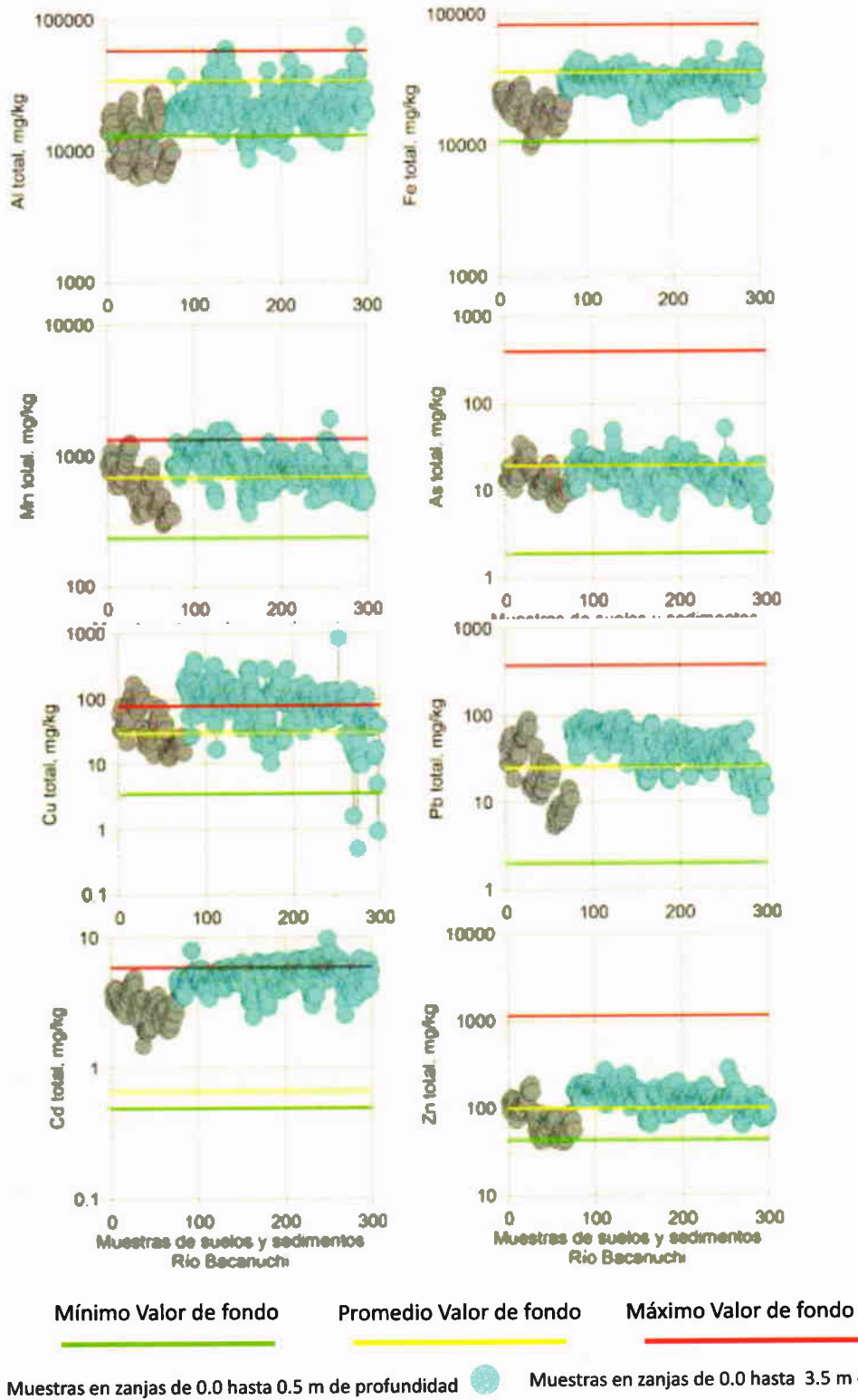


Figura 7.10 Comparación entre las concentraciones totales, en suelos y sedimentos, de los metales asociados, al derrame, en la zona del río Bacanuchi, con los valores de fondo de la zona

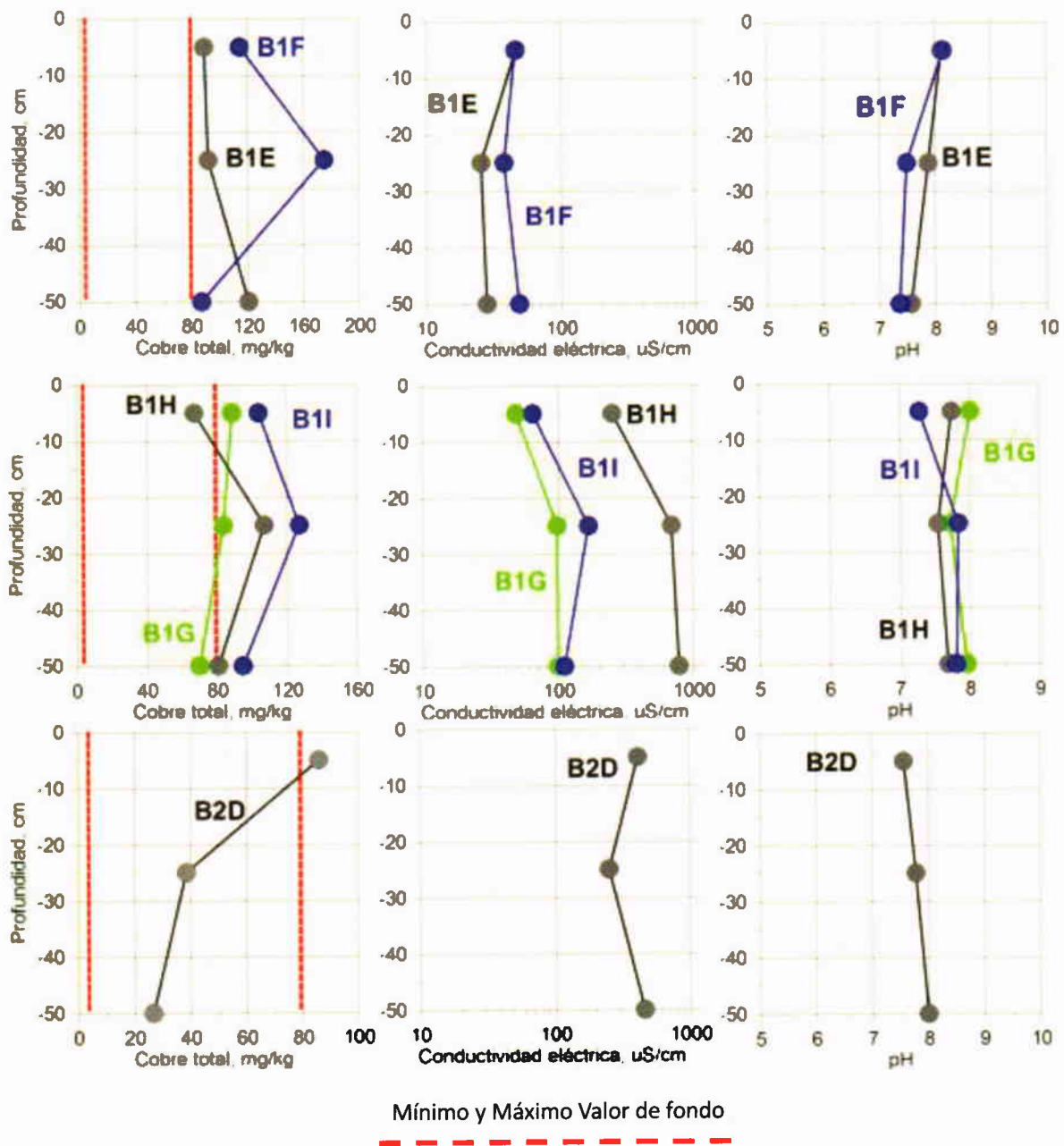


Figura 7.11 Perfiles geoquímicos de manganeso, conductividad eléctrica y pH en zanjas (0.0 – 0.5 m) excavadas en la zona del río Bacanuchi

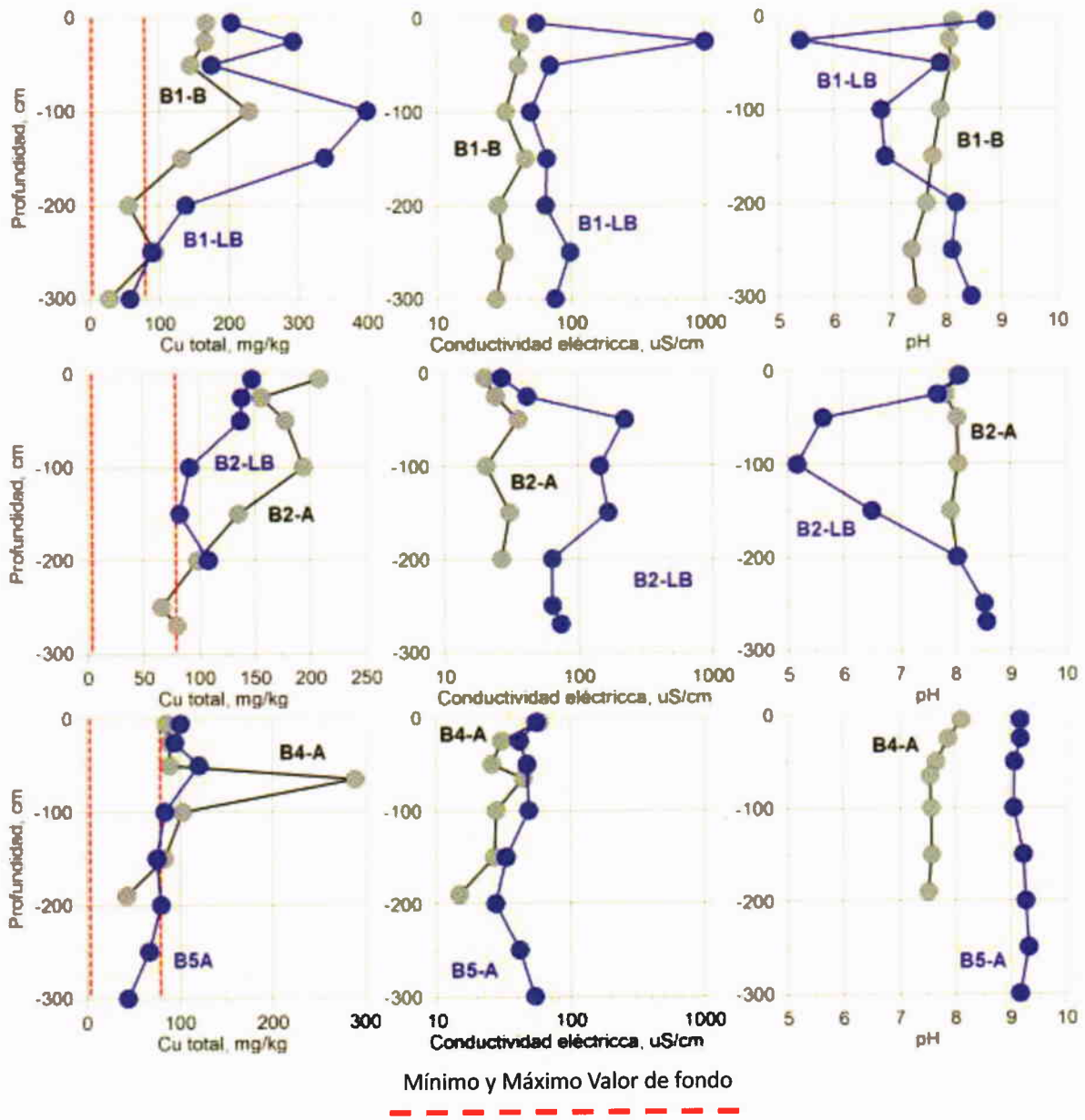


Figura 7.12 Perfiles geoquímicos de manganeso, conductividad eléctrica y pH en zanjas (0.0 – 3.5 m) excavadas en la zona del río Bacanuchi

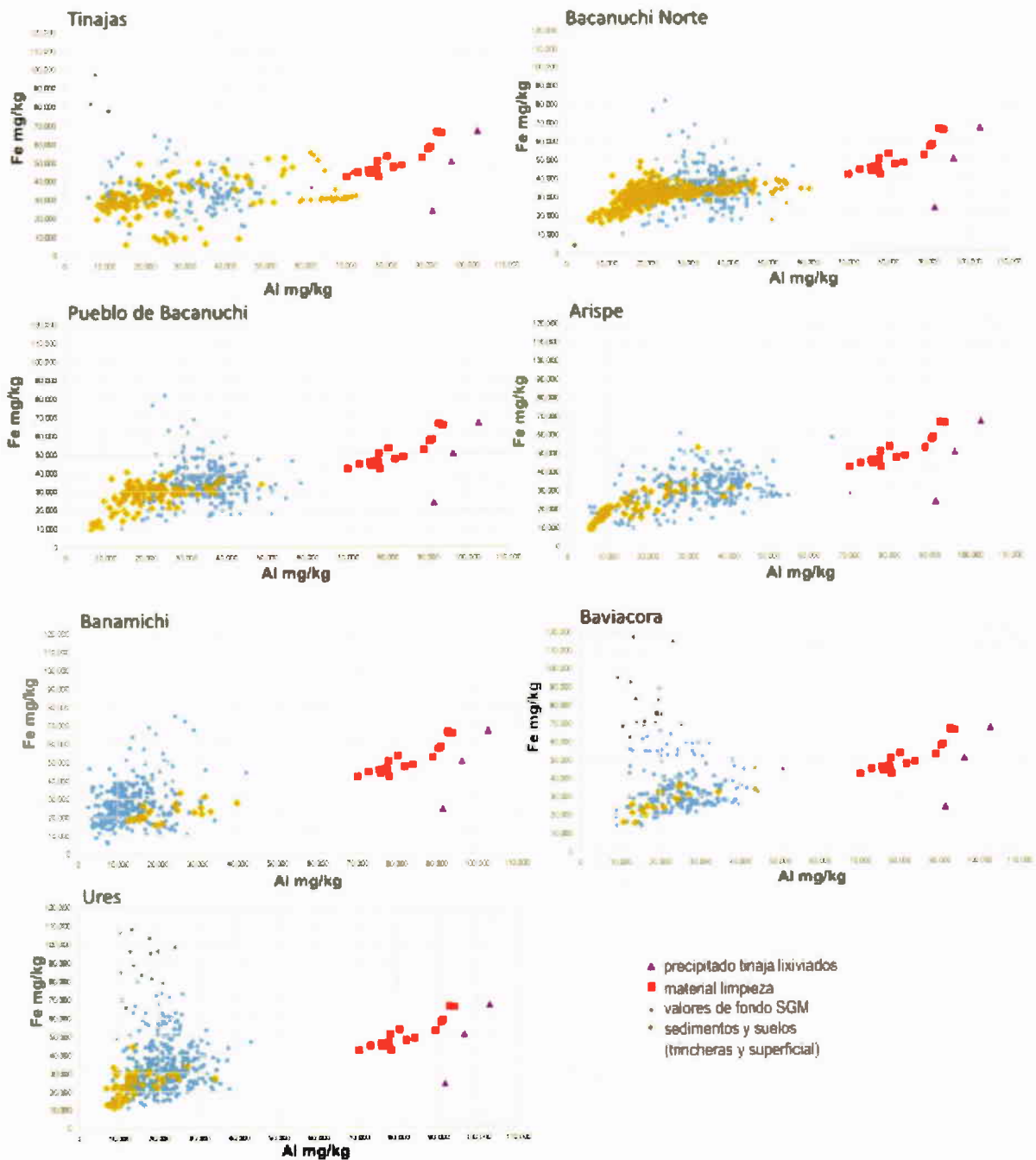


Figura 7.13 Relación entre la concentración de hierro (Fe) y aluminio (Al) de los sedimentos y suelos muestreados (rombos café), con respecto al material visiblemente impactado colectado por Grupo México (cuadros rojos) y a las composiciones del precipitado en la tinaja (triángulos morados), con respecto a los valores de fondo del SGM (círculos azules). Las proporciones anómalas se encuentran en las muestras colectadas en el Arroyo Tinajas y Río Bacanuchi.

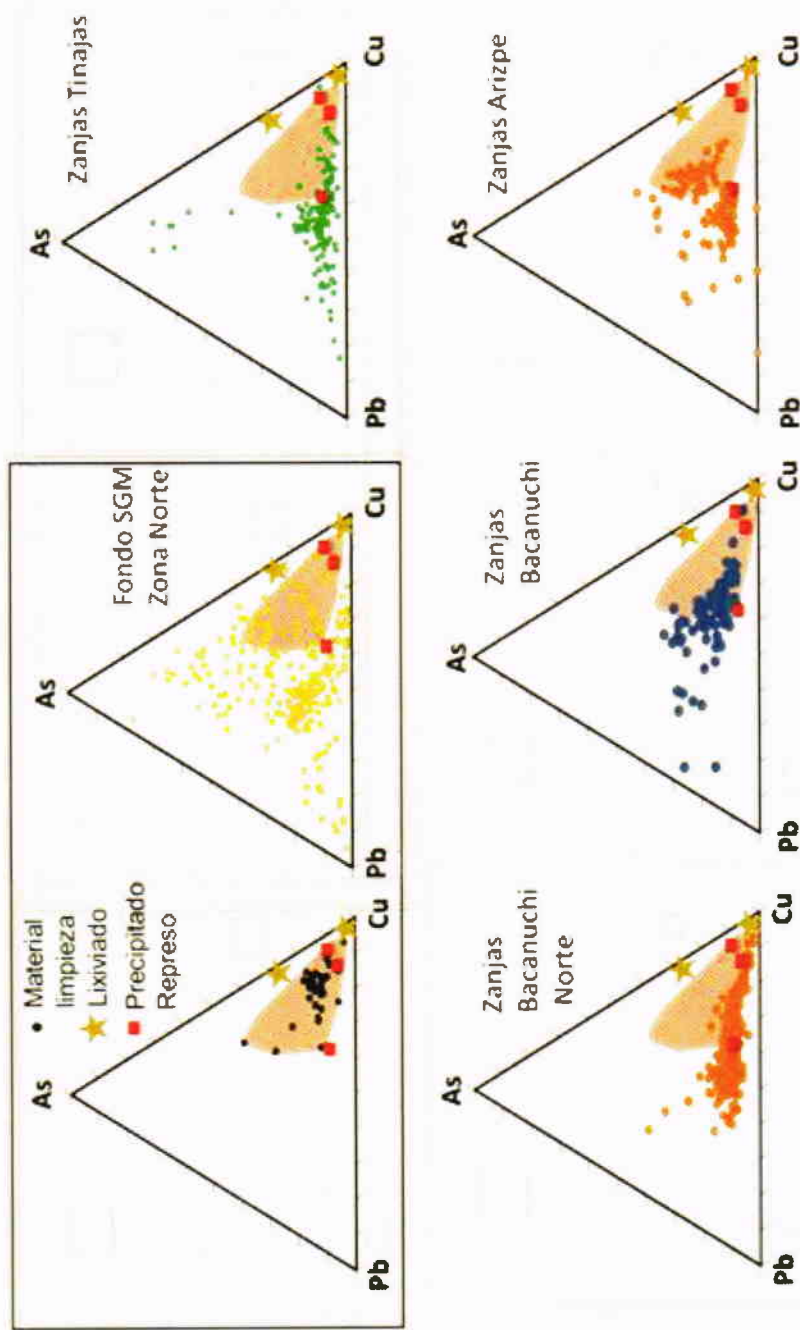


Figura 7.14 Diagrama ternario que compara la proporción de plomo (Pb), arsénico (As) y Cobre (Cu). En el recuadro superior izquierdo se presenta la proporción de estos 3 elementos en los materiales colectados por Minera México durante el proceso de limpieza, la proporción en el lixiviado y en los precipitados en la Tinaja 1 (cuadros rojos), en el mismo recuadro se muestra la proporción de los 3 metales de las muestras de fondo para la zona norte. Fuera del recuadro se encuentra por regiones los resultados de los análisis de muestras colectadas en trincheras. Desde el arroyo Tinajas hasta la zona de Arizpe se presentan muestras con altas concentraciones de Cu con respecto a Pb y As, similares a las del material de limpieza. Esto aunado a la coloración amarilla-naranja observada en las trincheras (figura VIII.2), indica la presencia de contaminación residual.

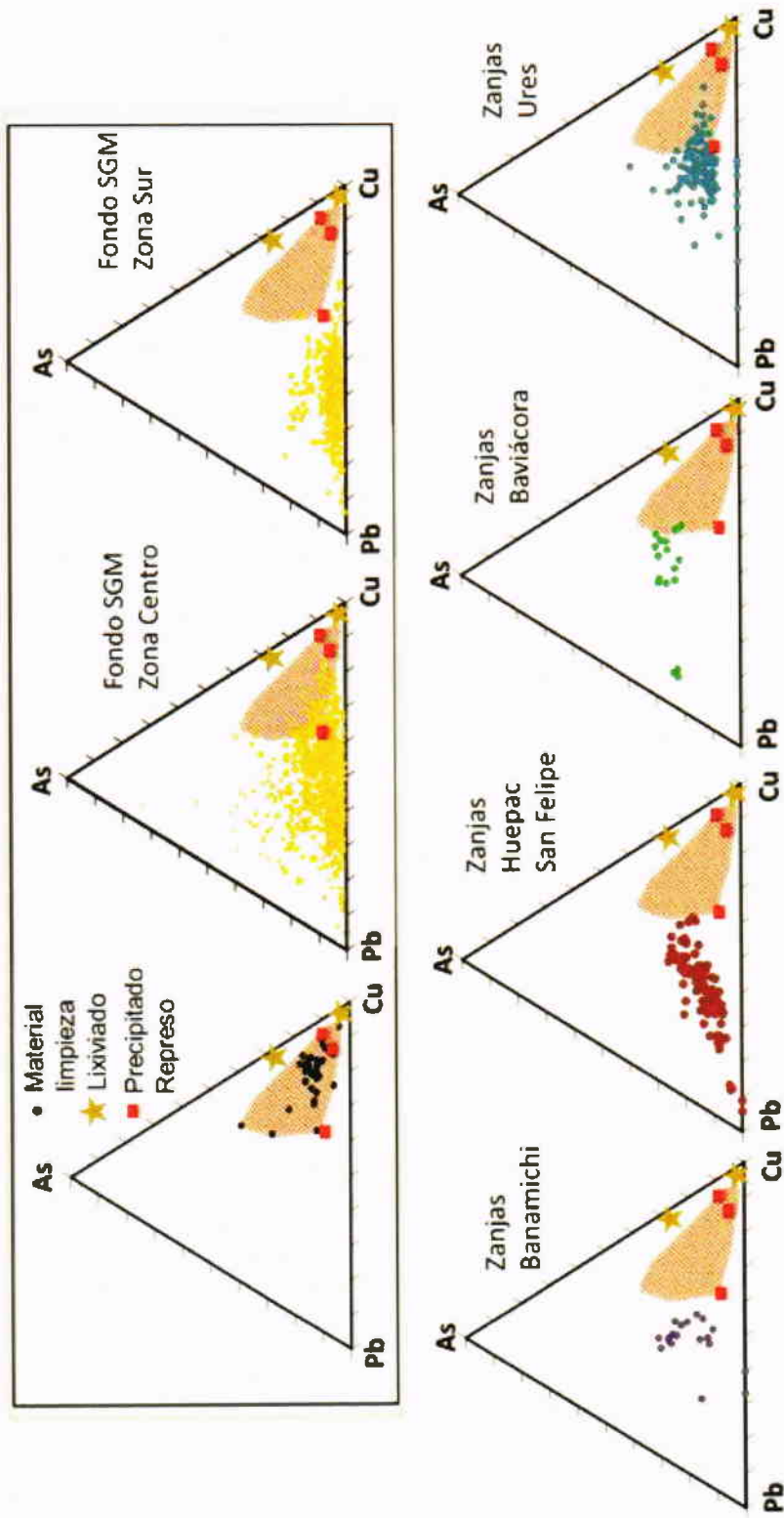


Figura 7.15 Diagrama ternario de plomo (Pb), arsénico (As) y Cobre (Cu). En el recuadro superior izquierdo se presenta la proporción en los materiales colectados por la empresa, la proporción en el lixiviado y en los precipitados en la Tinaja 1 (cuadros rojos), en el mismo recuadro se muestra la proporción de los 3 metales de las muestras de fondo para las zonas centro y sur. Fuera del recuadro se encuentra por regiones los resultados de los análisis de muestras colectadas en trincheras. En las zanjas de la zona de Banamichi y Baviácora los resultados se encuentran en el campo de valores de fondo. En las zanjas de Ures hay valores similares a los observados en el material de limpieza, con altas concentraciones de Cu con respecto a Pb y As, similares a las del material de limpieza. En Huepac-San Felipe se presenta una concentración de Pb mayor a la observada en el material impactado, por lo que se recomienda estudiar su origen. Se requiere de mayor estudio para determinar el origen de las concentraciones de Cu en la zona de Ures.

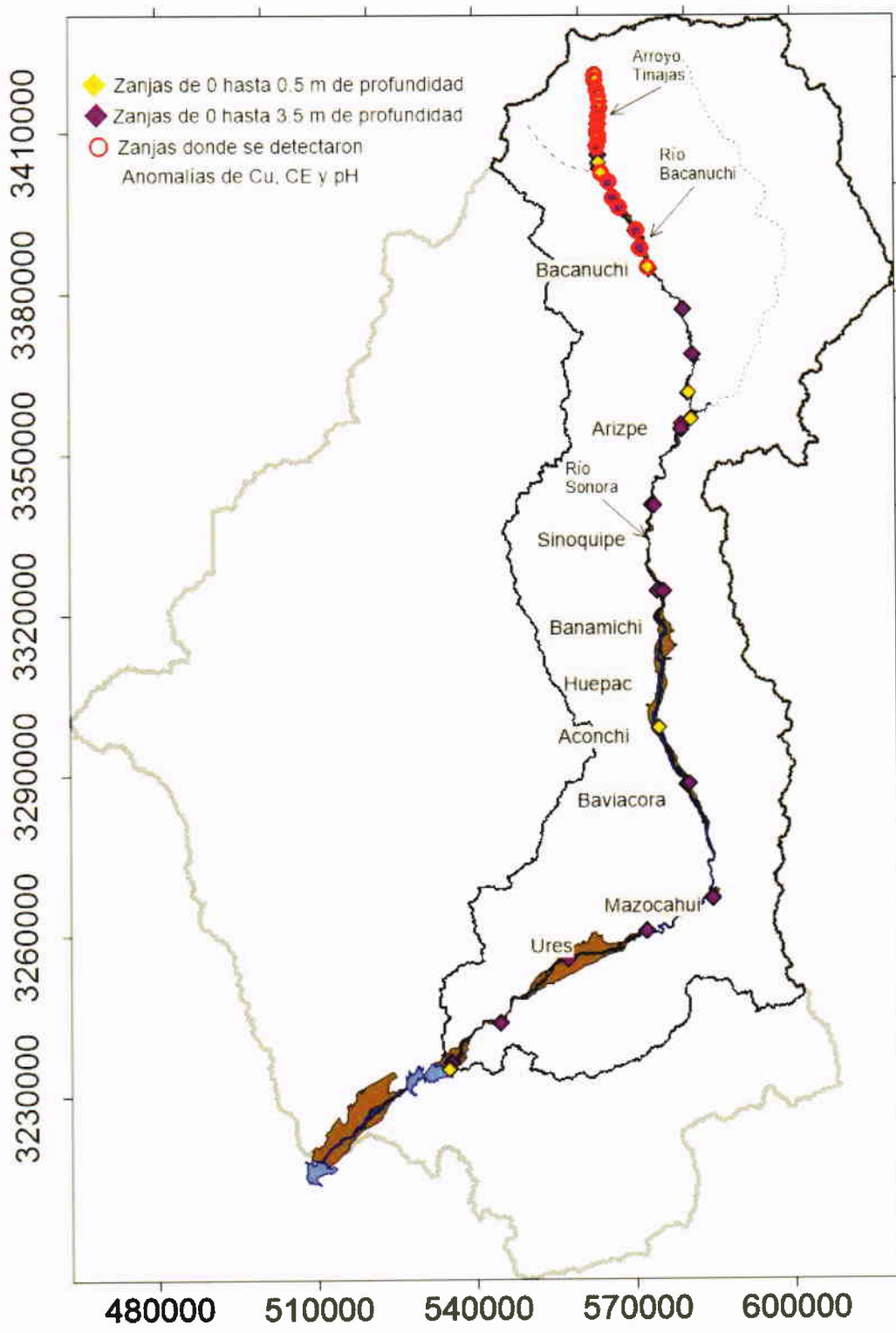


Figura 7.16 Delimitación de la zona que requiere estudios adicionales debido a la presencia de anomalía geoquímicas (cobre, cadmio, pH y conductividad eléctrica)

7.3 Estudio de movilidad de metales en suelos y sedimentos

Para evaluar la movilidad de los metales contenidos en el Drenaje Acido de Mina (DAM) en suelos/sedimentos, se realizaron experimentos en columnas intactas de suelo y en columnas empacadas con sedimentos.

Se colectaron columnas de suelo y sedimentos del río, en cinco sitios localizados en la parte alta de la cuenca del Río Bacanuchi y un sitio en el cauce del Río Sonora a la altura del Pueblo de Sinoquipe (Cerro Colorado).

En el experimento se aplicaron uno o varios riegos con el DAM, y uno o varios riegos con una solución de fuerza iónica similar a la del agua del río. El detalle de este estudio se puede consultar en el Anexo 1.8.

Los resultados muestran que el paso del DAM modifica la estructura y la distribución de tamaño de poros del suelo/sedimento, modificando con ello la velocidad de infiltración/tiempo de contacto del DAM con las partículas de suelo/sedimento.

En cuanto a la retención, se observaron comportamientos diferentes entre los diferentes metales contenidos en el DAM, así como entre los diferentes suelos/sedimentos estudiados: algunos metales fueron inertes y el resto retenidos, de estos últimos, solo en algunos casos fue reversible el proceso. Además, el paso de la solución del DAM por el suelo/sedimento, desorbe elementos naturales.

Fue posible identificar el comportamiento de cada uno de los metales en cada uno de los suelos y sedimentos estudiados. El conjunto de resultados permite concluir que los suelos de la región tienen la capacidad de amortiguar el paso del DAM, dicha capacidad es variable entre suelos y aumenta a medida que nos alejamos del arroyo Tinajas, en dirección sur.

La tabla 7.2 presenta el resumen de la capacidad de absorción-desorción en suelos del área que fue mayormente afectada por el derrame:

Tabla resumen:	
Adsorción – desorción de elementos en/desde el suelo/sedimento	
<u>Suelo Parte Alta Arroyo Tinajas</u>	
Elementos que se liberan	Elementos que son retenidos
Sr>Na>Pb>Mn,Ca	Fe>Al>Zn>As,Cu>Li, Cr,Co,Cd,Ni
<u>Sedimento Salida Arroyo Tinajas</u>	
Elementos que se liberan	Elementos que son retenidos
Sr>Na>Pb>Ca>Mn>Mg>Co>Cd	Fe>Al>Zn>Cu>As>Cr>Li>Ni
<u>Sedimento Cauce Río Bacanuchi</u>	
Elementos que se liberan	Elementos que son retenidos
Sr>Na>Pb>Ca	Fe>As>Al>Cu,Ni>Cd>Co,Li>Zn,Mg>Mn
<u>Suelo terraza Río Bacanuchi</u>	
Elementos que se liberan	Elementos que son retenidos
Sr>Na>Ca	Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Zn>>Li, Mg

Tabla 7.2 Comportamiento de los metales en experimentos controlados para modelar la capacidad del suelo y sedimento de retener o liberar metales ante el paso de una solución ácida, similar al lixiviado y ante el paso de agua de lluvia.

VIII EVALUACIÓN DEL RIESGO A LA SALUD HUMANA

El informe completo, del estudio del riesgo a la salud humana, se puede consultar en el Anexo 1.10.

El objetivo de esta investigación es proporcionar evidencia científica y racional acerca del riesgo a la salud humana por exposición crónica a metales en suelos de 7 comunidades del Río Sonora, que pudieron estar expuestas al derrame de agosto de 2014: Arizpe, Banamichi, Huépac, San Felipe de Jesús, Baviácora, Aconchi, y Ures.

Así mismo, se seleccionó y se valoró el riesgo en una comunidad localizada en la "zona control" (Bacoachi) que no estuvo expuesta al derrame de agosto de 2014.

Los contaminantes prioritarios considerados en este estudio de riesgo a la salud son: arsénico (As), cobre (Cu), manganeso (Mn), plomo (Pb) y zinc (Zn); que están asociados al derrame de agosto de 2014.

La investigación se centra no solo en la determinación de concentración total de metales en suelos, sino también en su bioaccesibilidad oral (fase gástrica).

Para el caso de se valoró el riesgo a la salud para los efectos No cancerígenos; para lo cual se calculó el denominado Coeficiente de Peligro (HQ)²¹, a través de la relación de las Dosis de exposición (Dexp) y las dosis de referencia oral (RfD), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$HQ_{ij} = \frac{Dexp_{ij}}{RfD_{ij}}$$

La evaluación de riesgo a la salud por exposición a plomo se centra en niños por ser la población más vulnerable y se trabajó con el modelo de la EPA de los Estados Unidos de América denominado "Integrated Exposure, Uptake, and Biokinetic" (IEUBK) incluyendo datos de valores máximos de contenido de plomo encontrados en alimentos analizados para las áreas estudiadas.

Par todos los casos, el escenario para el cálculo de riesgo es siempre el más conservador, es decir, se consideran los valores máximos encontrados en las matrices de suelos, pruebas de bioaccesibilidad oral y alimentos.

En cada una de las comunidades se colectaron muestras de suelos superficiales²² de acuerdo el procedimiento establecidos en la NMX-AA-132-SCFI-2006²³.

²¹ Modelo de la EPA de los Estados Unidos de América

²² Muestreo superficial de suelo se refiere a aquel entre los 0 cm y 5 cm.

Se colectaron un total de 409 de suelo superficial en las 8 localidades de estudio.

Las concentraciones totales de los metales de interés y asociados al derrame se determinaron por Fluorescencia de rayos X, de acuerdo al método 6200 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos²⁴. Se utilizó un equipo marca ThermoScientific Modelo NITON XLt3 del Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM).

La determinación de las concentraciones bioaccesibles, en fase gástrica, de los metales de interés se determinaron de acuerdo a los procedimientos descritos en el Apéndice Normativo "C" de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental del LANGEM. El reporte de laboratorio se puede consultar en el Apéndice de Laboratorio 5.

A continuación se describen los principales resultado de este estudio.

3. La aplicación de los modelos de riesgo a la salud humana indica que no existe riesgo a la salud humana por exposición a suelos contaminados con arsénico, cobre, manganeso, plomo y zinc en las poblaciones de Bacoachi (zona control), Arizpe, Aconchi, Banamichi, Huepac, Baviácora y Ures.
4. En San Felipe de Jesús tampoco se identificó riesgo a la salud humana por exposición a suelos contaminados con arsénico, cobre, manganeso y zinc.

Sin embargo, el modelo IEUBK indica un riesgo para la población de San Felipe de Jesús por exposición a plomo con un 71.75 % de afectación probable (Figura 8.1).

No es posible asociar este riesgo con el derrame de agosto de 2014, ya que en esta zona de San Felipe de Jesús se localizan actividades mineras históricas y sus desechos (jales), a la intemperie, localizados a 4 kilómetros del poblado de San Felipe de Jesús (Figura 8.2), hacia el oeste del mismo, con una orientación del drenaje hacia el poblado y al Río Sonora.

En San Felipe de Jesús se explotaron yacimientos de plomo, lo que explica las elevadas concentraciones totales de plomo en los jales generados: mínimo = 1,726 mg Pb/kg; máximo = 16,225 mg Pb/kg; promedio = 7,825 mg Pb/kg.

23 Norma Mexicana que establece el procedimiento para el "Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra"

24 Method 6200: "Field portable X-ray Fluorescence Spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment". Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846). <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/6200.pdf>

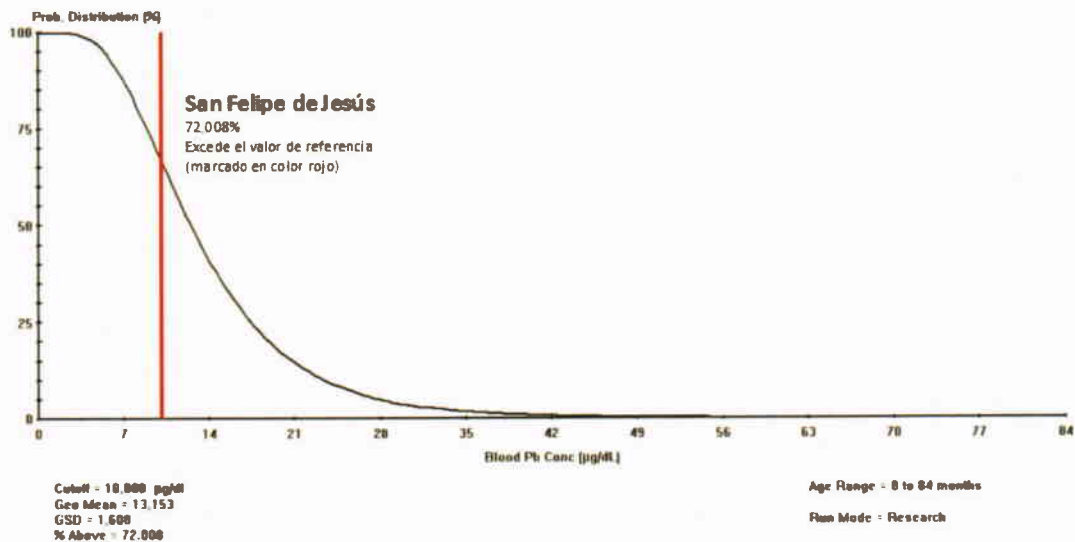


Figura 8.1 Riesgo estimado para niños por ingestión de plomo en suelos de San Felipe de Jesús, Sonora. Probabilidad de tener niveles superiores a 10 microgramos por decilitro de plomo en sangre

Jal San Felipe de Jesús

...

San Felipe de Jesús, SON.

- ☞ Área total: 16,300 m².
- ☞ Altura de taludes: Max. 5 m y Min. 2 m.
- ☞ Granulometría: Partículas finas a clastos gruesos 2 - 5 cm.
- ☞ Método de beneficio: Flotación Selectiva.

Figura 8.2 Jales expuestos a la intemperie y provenientes de la explotación minera de plomo en de San Felipe de Jesús, Sonora