

# ANEXO

## 1.2

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. Informe elaborado por el Instituto de Geología de la UNAM el 26.11.14. Este Informe fue entregado al Fideicomiso Río Sonora en 2014



DIAGNÓSTICO - ESTUDIO RÍO SONORA  
UNAM-UNISON-ITSON

**AVANCES**  
**DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN AMBIENTAL ACTUAL ASOCIADA AL  
DERRAME DE LA SOLUCIÓN ÁCIDAS FERRO-CUPRÍFERA DE BUENA VISTA  
DEL COBRE, HACIA LA CUENCA DEL RIO SONORA**

**Elaborado por:**

Instituto de Geología (IGL), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)  
Estación Regional del Noroeste (ERNO), IGL-UNAM,  
Universidad de Sonora (UNISON)  
Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON)

**Noviembre- Diciembre de 2014**



## Resumen

El día 06 de agosto de 2014 se derramaron, al Arroyo Tinajas del Municipio de Cananea, Sonora, unos 40,000 m<sup>3</sup> de solución ácida enriquecida con cobre, hierro y otros metales pesados disueltos (solución ácida ferro-cuprífera).

De acuerdo a información pública de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el derrame alcanzó los siguientes cuerpos de agua: arroyo "Tinajas" (17.6 km), el río Bacanuchi (64 km) y el Río Sonora (190 km), que alimenta a la presa "El Molinito".

Hasta a la fecha se han hecho estudios para valorar la calidad de los cuerpos de aguas, sedimentos y suelos, asociados al derrame. Sistemáticamente se han analizado los siguientes elementos químicos en los cuerpos de agua: aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb) y zinc (Zn). En los suelos y sedimentos se han evaluado, adicionalmente los elementos regulados en la NOM-147<sup>1</sup>.

El grupo de interdisciplinario e interinstitucional conformado por investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad de Sonora y el Instituto Tecnológico de Sonora analizó y reinterpreto los resultados de los estudios mencionados anteriormente y los integró con los resultados propios obtenidos del denominado "muestreo orientativo" que se realizó en dos periodos: 13 – 15 de septiembre de 2014 y 01 – 04 de octubre de 2014.

La interpretación de los datos generados por otros grupos y del muestreo orientativo realizado por el grupo de la UNAM nos permite puntualizar algunos de

---

<sup>1</sup> NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio

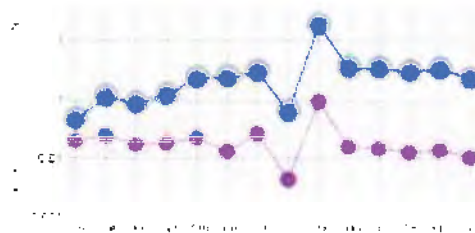


los resultados sobre la situación ambiental actual y realizar algunas recomendaciones sobre actividades que se requiere llevar a cabo para pronosticar la situación ambiental en el mediano y largo plazo.

## I. Resultados sobre la situación ambiental actual

### 1. Fuente de contaminación (solución derramada)

- De acuerdo a resultados reportados por CONAGUA y de los resultados del muestreo orientativo realizado por el grupo de la UNAM se puede afirmar
  - ✓ La solución derramada no contiene mercurio (Hg), bario (Ba) y antimonio (Sb).
  - ✓ La carga contaminante asociada al derrame y vertida a los arroyos de la cuenca del río Sonora es en orden descendente: 43200 kg de Fe, 19,440 kg de Al, 4560 kg de Cu, 3924 kg de Mn, 204 kg de Zn, 1,708 kg de As, 440 kg de Ni, 310 kg de Cd, 100 kg de Pb y 62 kg de Cr.
- Los resultados del muestreo orientativo del grupo de la UNAM indican que el patrón de los ETR de los lixiviados asociados al derrame es muy particular y al parecer el fenómeno de dilución no parece afectarlos, por lo que podemos pensar que puede ser un buen trazador para seguir el rastro de la afectación de los cuerpos de aguas de la cuenca del río Sonora, afectados por el derrame de la solución ácido ferro-cuprífera que se almacenaba en el represo Tinajas 1.



**Patrón de tierras raras en las diferentes muestras de lixiviados asociadas a la fuente de contaminación (derrame)**



## 2. Análisis de la calidad del agua superficial y subterránea

La interpretación de los resultados del monitoreo de la calidad de los cuerpos de agua subterránea y superficial reportados por el laboratorio ABC, nos permite concluir lo siguiente:

- Los registros de los valores de pH, en aguas superficiales, indican que solamente en los primeros días después del derrame (semana del 09 al 14 de agosto), se registraron valores de pH ácidos ( $\text{pH} = 2.6 - 3.7$ ) entre Sinoquipe y Aconchi. Sin embargo, en la parte media-baja y baja (Baviácora - El Molinito) se registraron valores de pH neutros y ligeramente básicos ( $\text{pH} = 5.9$  y  $8.4$ ). A partir del 15 de agosto los valores de pH son neutros y ligeramente básicos, lo que indica, 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.
- En general se puede afirmar que actualmente las concentraciones disueltas de los contaminantes asociados al derrame, tanto en aguas superficiales como subterráneas, están por debajo de lo límite permisibles para aguas de consumo humano<sup>2</sup>.
- Los eventos meteorológicos que provocaron lluvias intensas (Huracanes Norberto y Odile ocurridos entre del 5 al 9 y del 17 al 18 septiembre, respetivamente) fueron claves para lograr la dilución de los contaminantes asociados al derrame a lo largo de los cuerpos de agua superficiales.
- Las concentraciones de totales de algunos elementos traza y de elementos mayores (Al, Fe y Mn) en los ríos de la parte baja de la cuenca se pueden asociar con las anomalía geoquímicas en los sedimentos reportados por el

---

<sup>2</sup> 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.



SGM (1995 – 2003); lo que implicaría una fuente de contaminación adicional al derrame.

### **3. Análisis de la calidad de sedimentos**

No se cuenta con una caracterización geoquímica confiable de los valores base o de fondo, por lo cual no es posible determinar la magnitud del impacto.

Utilizando de manera preliminar los datos obtenidos por el muestreo de sedimentos realizado por el Servicio Geológico Mexicano, se obtuvo un valor promedio para la interpretación de los resultados del monitoreo de la calidad de sedimentos reportados por la Universidad de San Luis Potosí, dicho valor tiene un valor de incertidumbre alto. Sin embargo, nos permite realizar las primeras estimaciones de las concentraciones en sedimentos:

- Las concentraciones totales de Cd, Hg y Sb son inferiores al límite de detección de la técnica de análisis. Por otro lado, las concentraciones totales de Cr y Zn son inferiores a los valores de fondo regionales (promedio de las concentraciones totales reportadas por el SGM en aproximadamente 1,682 muestras de sedimentos de arroyo realizados entre 1995 y 2005)

Estos resultados permiten concluir que desde el punto de vista ambiental, estos contaminantes (Cd, Cr, Hg, Sb y Zn) no representan un peligro y riesgo para el medio ambiente en general.

- De los elementos traza (ET) que fueron detectados por la técnica de análisis, y que en algunas de las muestras se superó el valor de fondo están el As, Cu, Ni y Pb. Por lo que se recomienda dirigir los estudios futuros a la valoración a corto, mediano y largo plazo de dichos elementos.



La distribución de las concentraciones totales de dichos los elementos traza en sedimentos, parece indicar que el impacto del derrame en dichos sedimentos probablemente se extiende desde el Represo "Tinajas 1" hasta Bacanuchi y posiblemente hasta Arizpe. Desde Arizpe hasta Boquilla de Orégano se observa que las concentraciones de algunos ET superan ligeramente el valor de fondo. Sin embargo, dadas las anomalías de los elementos traza desde Banamichi hasta Mazacohauí en los flancos este y oeste de la cuenca permite especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame del represo "Tinajas 1" que pueda deberse a zonas mineralizadas de la zona. Esto se tiene que corroborar con un estudio detallado.

- En cuanto a los elementos mayores (Al, Fe y Mn), su distribución, también parece indicar que el impacto del derrame en los sedimentos probablemente se extiende desde el Represo "Tinajas 1" hasta Bacanuchi y posiblemente, hasta Arizpe. Al igual que en el caso de los elementos traza, desde Arizpe hasta Boquilla de Orégano se observa que las concentraciones de Mn superan el valor de fondo. Sin embargo, dada las aparentes anomalías de Mn, obtenidas por el Servicio Geológico Mexicano, y de otros elementos mayores, desde Huepac hasta Mazacohauí, en los flancos este y oeste de la cuenca, se puede especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame y que puede deberse a zonas mineralizadas de la zona.
- Los resultados del muestreo orientativo realizado por el grupo de la UNAM son similares a los resultados obtenidos por la UASLP.

### **3. Análisis de la calidad de suelos**

Los resultados del monitoreo de la calidad de suelos reportados por la Universidad de san Luis Potosí, se interpretaron considerando los valores



genéricos de referencia señalados en Norma Oficial Mexicana NOM-147<sup>3</sup>. Para los elementos no contemplados en la NOM-147 se seleccionaron los valores de referencia de la US-EPA<sup>4</sup>. Estos valores genéricos de referencia están calculados considerando el riesgo a la salud humana y asumiendo la biodisponibilidad total de los contaminantes considerados.

La interpretación de los resultados del monitoreo de la calidad de sedimentos reportados por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, nos permite concluir lo siguiente:

- Las concentraciones totales de Se, Be, Cd, Ag, Tl, Hg y Cr VI son inferiores al límite de detección de la técnica de análisis. Por otro lado, las concentraciones totales de Ba, Ni, Al, Cr, Mn, Zn y Cu son inferiores a los valores genéricos de referencia. Estos resultados permiten concluir que estos metales (Se, Be, Cd, Ag, Tl, Hg y Cr VI, Ba, Ni, Al, Cr, Mn, Zn y Cu) no representan un riesgo para la salud humana.
- Entre los elementos traza que fueron detectados por la técnica de análisis y que en alguna de las muestras se superó el valor de referencia genérico están el As, V y Pb.

La distribución de las concentraciones totales de arsénico parece indicar que el impacto del derrame en los suelos parece extenderse desde el Represo "Tinajas 1" hasta Bacanuchi y posiblemente, hasta Arizpe. Desde Arizpe hasta casi el Molinito, hay algunas muestras con valores de As que superan el valor genérico de referencia. Sin embargo, las anomalías, naturales o asociadas a actividades mineras antiguas, de As, y de otros elemento traza, desde Banamichi hasta Mazacohauí, en el flanco este de la

<sup>3</sup> Elementos regulados en la NOM-147: arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

<sup>4</sup> Regional Screening Level (RSL) Resident Soil Table (TR=1E-6, HQ=1) May 2014





cuenca, permite especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame del represo "Tinajas 1" que pueda deberse a zonas mineralizadas de la zona.

En el caso del plomo (Pb), solamente en dos muestras (una cercana a Huepac y otra unos 15 km antes de El Molinito). Con base en la información del Servicio Geológico Mexicano, se infiere la existencia de anomalías naturales naturales o asociadas a actividades mineras antiguas de Pb desde Banamichi hasta Mazacohau, en el flanco este de la cuenca, permite especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame del represo "Tinajas 1" que pueda deberse a zonas mineralizadas de la zona.

- En el caso de los elementos mayores (Al, Fe y Mn), solamente en el caso del Fe se superó el valor genérico de referencia, en un par de muestras (en las cercanías de el Molinito).

Al igual que en el caso del plomo (Pb), con base en la información del Servicio Geológico Mexicano, se infiere la existencia de anomalías naturales naturales o asociadas a actividades mineras antiguas, de Fe a partir de Baviácora hasta Mazacohau, tanto en el flanco oeste y este de la cuenca, por lo que se puede especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame del represo "Tinajas 1" que pueda deberse a zonas mineralizadas de la zona.

## **II. Recomendaciones sobre actividades que se requiere llevar a cabo para pronosticar la situación ambiental en el corto mediano y largo plazo**

Los resultados generados hasta la fecha indican que la calidad de los cuerpos de agua superficial y subterránea cumple con la norma de agua para consumo



humano. Sin embargo se recomienda un monitoreo constante para confirmar que se mantiene dicha condición a mediano y largo plazo.

Nos se cuenta con una caracterización geoquímica confiable de los valores base o de fondo, por lo cual no es posible determinar la magnitud del impacto en los sedimentos. Sin embargo, y con base en los datos obtenidos hasta el momento, en la parte alta de la cuenca (Represo "Tinajas 1" hasta Bacanuchi) los sedimentos, y en menor proporción, los suelos parecen estar afectados, por lo que en esta parte de la cuenca es necesario detallar la caracterización e implementar acciones de remediación.

En la parte media y baja de la cuenca es necesario realizar estudios que permitan definir cuál es el aporte antropogénico (derrame) y el natural (geología de la zona) es de suma importancia para valorar el daño asociado al derrame, pues la fuente asociada al derrame es finita (desde pocos días después del derrame ya no aporta activamente una contaminación), en cambio una fuente natural es constante y podría estar impactando negativamente los cuerpos de agua del río Sonora por tiempo indefinido.

**Para poder elaborar el plan de remediación-restauración-compensación es indispensable contar con la evaluación del impacto a la flora y fauna silvestre y el riesgo a la salud humana**, por lo que cualquier acción de remoción física o de neutralización química podría potencializar el daño al ecosistema, y no remediarlo.

Se cuenta solo con una caracterización química de metales en agua (superficial-subsuelo) suelo y sedimento, pero no se ha llevado a cabo la evaluación del riesgo al ecosistema y a la salud humana, ya que no se conoce la biodisponibilidad y el comportamiento de dichos elementos en el subsistema biótico.



Se desconoce el estado base del medio abiótico y biótico por lo tanto es necesario realizar dichos estudios para poder determinar el daño asociado al derrame.

Hacen falta estudios que permitan determinar el destino final de los contaminantes asociados al derrame, que permitiría pronosticar en el mediano y largo plazo consecuencias en el ambiente y ecosistema en general. Entre los estudios prioritarios se recomienda estudios en la zona no saturada (a través de perforaciones y excavaciones en la zona entre la superficie y el nivel freático), así como el estudio de los sedimentos en el represo de El Molinito.

Para evitar este tipo de contingencias se recomienda que se lleven a cabo las obras de ingeniería necesarias que garanticen la estabilidad física y estructural en las instalaciones de la Empresa Buenavista de Cobre.



## INTRODUCCIÓN

El día 06 de agosto de 2014 se derramaron, al Arroyo Tinajas del Municipio de Cananea, Sonora, unos 40,000 m<sup>3</sup> de solución ácida enriquecida con cobre, hierro y otros metales pesados disueltos (solución ácida ferro-cuprífera).

Esta solución ácida ferro-cuprífera se derramó del represo de "solución preñada"<sup>5</sup> denominado "Tinajas 1", que se encuentra ubicado dentro de las instalaciones de la Empresa Buenavista del Cobre (BVC), subsidiaria de Grupo México (GM).

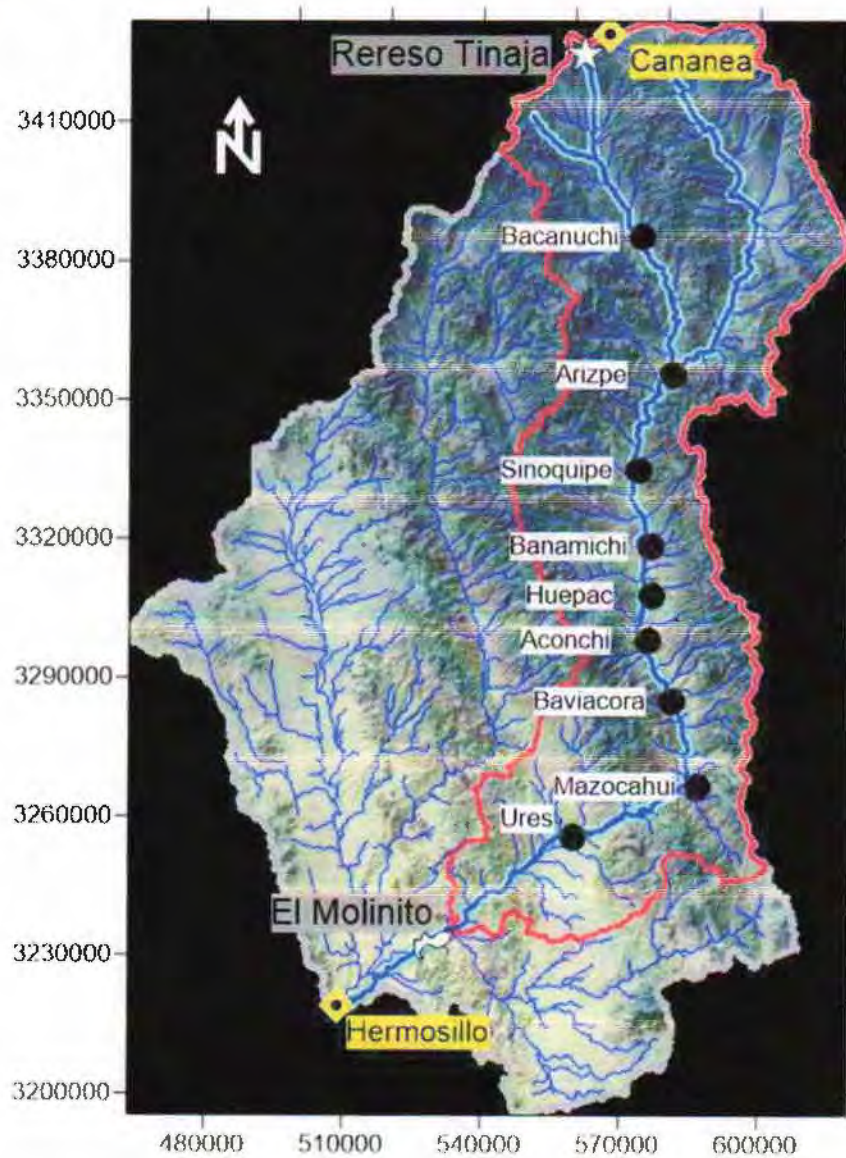
De acuerdo a información pública de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el derrame alcanzó los siguientes cuerpos de agua: arroyo "Tinajas" (17.6 km), el río Bacanuchi (64 km) y el Río Sonora (190 km), que alimenta a la presa "El Molinito".

La ubicación del represo "Tinajas 1" y los cuerpos de aguas potencialmente afectados por el derrame se presenta en la Figura 1.

Entre el 08 de agosto y el 21 de octubre del 2014 se han realizados muestreos y análisis de aguas superficiales y subterráneas de la zona que se presume afectada por el derrame en los sitios seleccionados por CONAGUA. El muestreo y análisis han estado a cargo del laboratorio acreditados ante la EMA (Laboratorio ABC).

---

<sup>5</sup> Solución preñada: Aquella en estado acuoso que proviene del patio o terrero, cargada con los elementos de valor económico (cobre), una vez recuperada del proceso de lixiviación. Definición 4.26 de la Norma Oficial NOM-159-SEMARNAT-2011, Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.



**Figura 1** Cuerpos de aguas superficiales potencialmente afectadas, por el derrame del Represo Tinaja, y algunas de las poblaciones localizadas en sus riberas

Sistemáticamente se han analizado los siguientes elementos químicos en los cuerpos de agua: aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu),



cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb) y zinc (Zn).

Así mismo, el 28 de octubre, la empresa BVC-GM presentó los resultados de un estudio de caracterización de suelos y sedimentos, que estuvo a cargo de especialistas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y de firmas consultoras de Sonora. Se presentaron los resultados de las concentraciones totales<sup>6</sup> de los elementos químicos regulados en la Norma Oficial Mexicana aplicable (NOM-147<sup>7</sup>) y otros de interés ambiental<sup>8</sup> en suelos y sedimentos dentro de la zona que se presume afectada por el derrame.

Para definir número y distribución de muestras de suelo se aplicaron los criterios de muestreo señalados en la normatividad aplicable<sup>9</sup> (NMX-132). El muestreo de sedimentos fue a juicio de experto, dado que no existen normas oficiales, ni mexicanas, que regulen este medio abiótico.

El grupo de interdisciplinario e interinstitucional conformado por investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad de Sonora y el Instituto Tecnológico de Sonora analizó y reinterpretó los resultados de los estudios mencionados anteriormente y los integró con los resultados propios obtenidos del denominado "muestreo orientativo" que se realizó en dos periodos: 13 – 15 de septiembre de 2014 y 01 – 04 de octubre de 2014. Los objetivos de este muestreo orientativo fueron: (i) Caracterizar la fuente de contaminación, (2) Valorar el

---

<sup>6</sup> Realizadas por el laboratorio INTERTEK, S.A. de CV, que está acreditados ante la EMA

<sup>7</sup> NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio

<sup>8</sup> Elementos regulados en la NOM-147: arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.  
Otros elementos de interés ambiental en la zona : aluminio, antimonio, cobre, hierro, manganeso y zinc

<sup>9</sup> NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.



impacto del derrame en los sedimentos de la cuenca del río Sonora en su parte alta, media y baja.

## **I. DESCRIPCIÓN DE CUENCA DEL RIO SONORA**

### **1.1 Cuerpos de agua superficiales**

De acuerdo a la información de la SEMARNAT, el derrame de los aproximadamente 40,000 m<sup>3</sup> de solución ácida ferro-cuprífera de la empresa Buena Vista del Cobre afectó los siguientes cuerpos de agua superficiales: arroyo "Tinajas" (17.6 km), el río Bacanuchi (64 km) y el Río Sonora (190 km), que alimenta a la presa "El Molinito".

Estos cuerpos de agua pertenecen a la denominada Cuenca del río Sonora (Región hidrológica número 09, Sonora Sur) y específicamente a las sub-cuencas 9Dd (Río Bacanuchi), 9Dc (Río Sonora-Arizpe), 9Db (Río Sonora-Banámichi) (Figura 1.1).

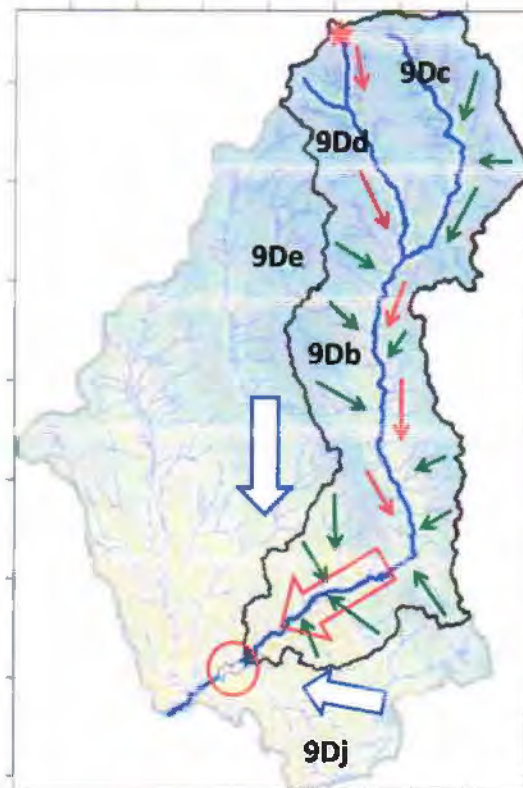
El Río Sonora, es el rasgo hidrográfico más notable de la cuenca del río Sonora. Tiene sus orígenes en el parteaguas con el río Bavispe; a una elevación de 2400 m.s.n.m. en la Sierra de Magallanes a 32 km al oriente de Cananea.

En su inicio tiene un rumbo general (en la cuenca alta) ligeramente al sureste con deflexiones al suroeste y recibe el primer afluente importante por margen derecha que es el río Bacanuchi, a la altura del poblado de Arizpe (Figura 1.2). Después de esta confluencia la corriente adquiere una dirección al sur y cruza por las poblaciones de Sinoquipe, Banámichi, Huepac, Aconchi, Baviácora y al sur de Mazocahui presenta una deflexión importante al suroeste. Y antes de cruzar la



localidad de Ures confluyen por ambas márgenes los arroyos Suribiate y La Salada. Posteriormente aguas abajo se une por la margen izquierda el arroyo de San Francisco.

Sigue su rumbo general hacia el oriente aguas abajo de esta confluencia y a 3.5 km aproximadamente, se encuentra la estación hidrométrica El Orégano, en la que se ha observado un escurrimiento medio anual de unos 121 millones de m<sup>3</sup>. Luego deposita sus aguas en la Presa Rodolfo Félix Valdez (El Molinito) para su mejor control con un recorrido total de aproximadamente 280 km. Antes de llegar a este punto, por margen izquierda recibe los caudales de los afluentes del río San Miguel y Zanjón.



**Figura 1.1 Drenaje hacia la presa El Molinito y cuerpos de agua afectados por el derrame del Represo Tinaja**





Es importante destacar que a la presa El Molinito drenan corrientes de agua provenientes de la sub-cuenca 9Dj (Arroyo La Junta) localizada hacia el este de la misma (Figura 1.1), que no tienen relación con el drenaje que llega desde la parte norte donde ocurrió el derrame del represo Tinaja 1.

## **1.2 Aspectos climáticos históricos y eventos meteorológicos extremos de septiembre de 2014**

### **A) Precipitaciones históricas**

El clima predominante es seco y semi-seco con lluvias en verano. De acuerdo con el análisis de los datos climatológicos de las estaciones, de las cuatro sub-cuencas que pertenecen a la cuenca del río Sonora<sup>10</sup>, la precipitación anual varía entre 513.9 y 338.2 mm (Figura 1.2), para un periodo de 32 años (1982 – 2013). De acuerdo a los datos mensuales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), los valores más altos de lluvia se registran en los meses de julio (125 – 145 mm) y agosto (102 – 110 mm). En el mes de septiembre, las precipitaciones disminuyen hasta valores entre 45 y 55 mm.

En el año 2014, se registraron valores anómalos de precipitaciones. Específicamente en septiembre de 2014 presentaron dos eventos ciclónicos (Huracán Norberto y Huracán Odile) que produjeron lluvias extraordinarias. Considerando que el derrame de la solución ácida ferro-cuprífera ocurrió el pasado 06 de agosto de 2014 y que la dispersión y dilución de los metales asociados a este derrame pudieron haber sido influenciados determinadamente por las lluvias anómalas de septiembre, se procedió a realizar un análisis detallado de los datos de precipitación de julio, agosto y septiembre de 2014 y su incidencia en la magnitud de los escurrimientos de la cuenca del Río Sonora.

---

<sup>10</sup> Tomado del Estudio de caracterización del sitio afectado por el derrame de solución acidulada con sulfato de cobre de Buenavista del Cobre, S.A. de C.V.

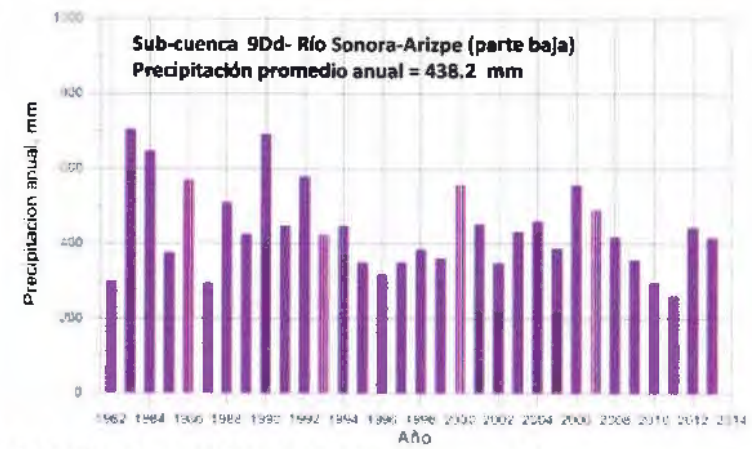
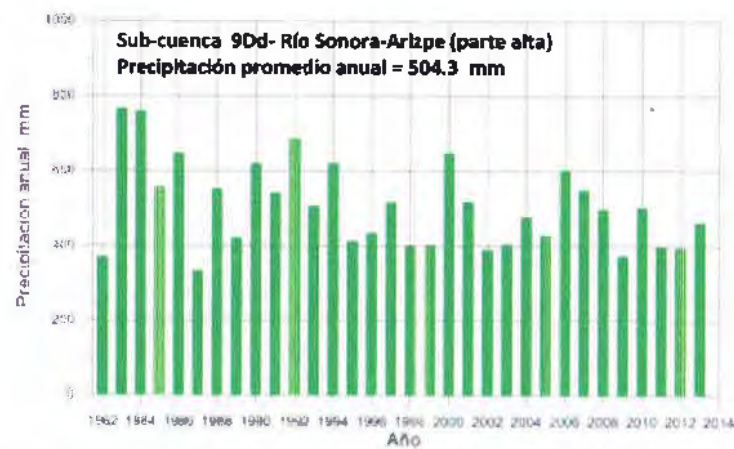
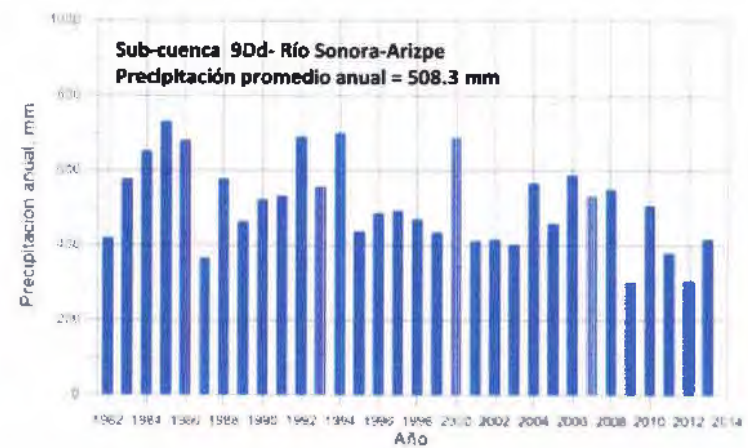
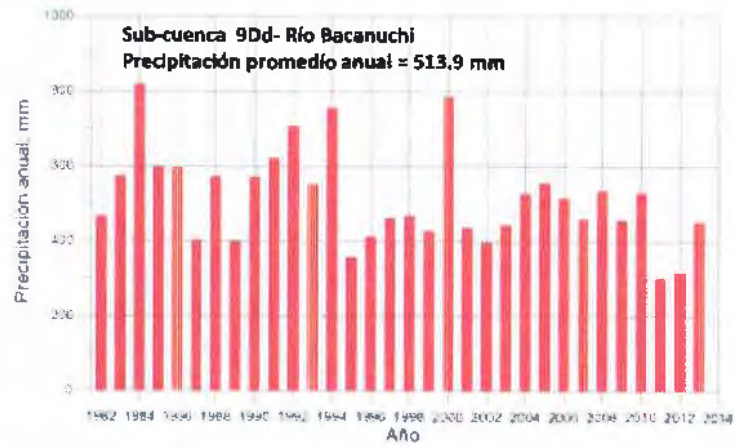


Figura 1.2 Registro de precipitación anual (1982 – 2013) en las sub-cuencas de interés de la cuenca del río Sonora



## B) Impacto en los escurrimientos de los Huracanes Norberto y Odile en la Cuenca Alta del Río Sonora

### B.1) Precipitación pluvial durante los huracanes Norberto y Odile

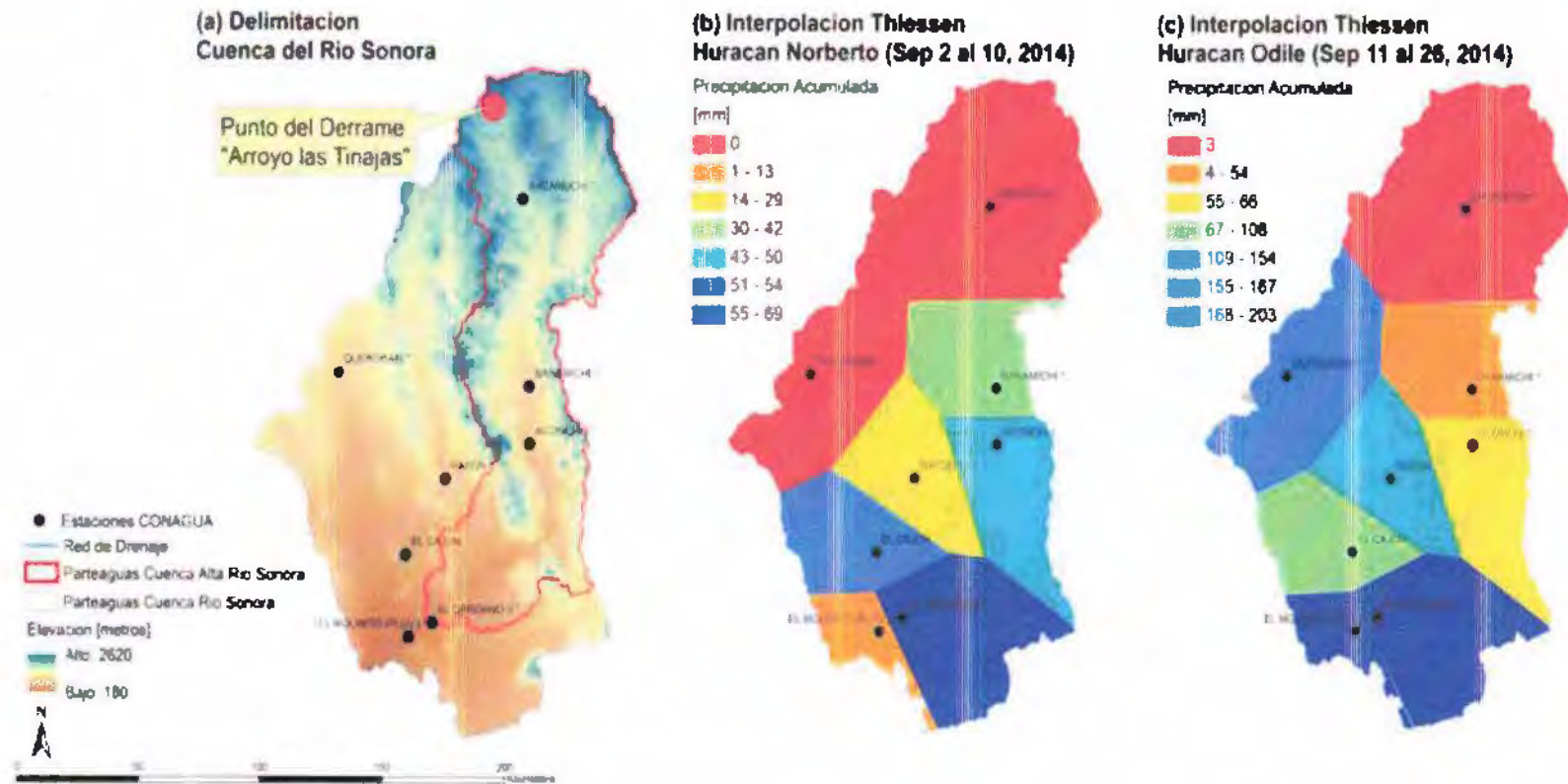
Se realizó el análisis de datos y modelación de escurrimientos para evaluar el impacto de los Huracanes Norberto y Odile durante el mes de Septiembre, 2014 en la cuenca alta del Río Sonora.

Se obtuvieron datos precipitación de 8 estaciones de la Comisión Nacional del Agua / Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA / SMN) y de escurrimientos de la estación hidrométrica del Orégano II (Figura 1. 3a).

La Tabla 1.1 muestra los datos observados de precipitación para los dos eventos extremos. Con los datos de precipitación se generaron mapas de precipitación correspondiente para los dos eventos utilizando el método de interpolación de Thiessen (Figura 1.3b y 1.3c). Sin embargo, debido a la falta de estaciones climatológicas en la región los mapas de interpolación de Thiessen no reflejan la variabilidad espacial de la lluvia adecuadamente, tal y como se observa en las Figuras 1.3b y 1.3c, existen regiones muy grandes en la parte norte de la cuenca donde las precipitaciones son muy bajas debido a la falta de estaciones.

Estacion	Precipitacion [mm]			
	Norbert, Sep 2 al 10		Odile, Sep 11 al 26	
	Accumulada	Maxima	Accumulada	Maxima
Aconchi	50	23	66	29
Bacanuchi	0	0	3	3
Banamichi	42	15	54	27
El Cajon	54	40	108	43
El Molinito	13	11	203	155
El Oregano	69	24	193	164
Querobabi	0	0	167	110
Rayon	29	16	154	87

**Tabla 1.1 Precipitación acumulada y máxima registrada para los Huracanes Norberto y Odile en Septiembre del 2014 (datos de la CONAGUA)**



**Figura 1.3 (a) Delimitación de las fronteras de la cuenca del Río Sonora y de los límites de la parte alta de la cuenca Variabilidad espacial de la precipitación acumulada utilizando el método de interpolación de Thiessen (n=8) para (a) Huracán Norberto y (b) Odile en Septiembre del 2014**



Considerando que las estaciones con datos de precipitación disponibles de la CONAGUA son muy limitados se extrajeron los datos de lluvia correspondientes para cada estación disponible del Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte America (North American Land Data Assimilation System, NLDAS por sus siglas en ingles).

En el análisis de la precipitación se compararon los datos de las estaciones de CONAGUA con los pixeles correspondientes de NLDAS y se obtuvieron factores de sesgo para cada tormenta.

La Tabla 1.2 muestra los datos de precipitación correspondientes a las estaciones de CONAGUA y a los pixeles correspondientes de NLDAS antes y después de ser ajustados en dichos puntos. Los factores de sesgo obtenidos fueron aplicados al producto crudo de NLDAS para producir mapas de precipitación de alta resolución (~12km) donde se refleja la intensidad de las lluvias así como una mejor representación de la variabilidad espacial de la lluvia (Figura 1.4).

Estacion	Precipitacion [mm]					
	Norbert (Sep 2 al 10, 2014)			Odile (Sep 11 al 26, 2014)		
	CONAGUA	NLDAS	NLDAS Ajustado	CONAGUA	NLDAS	NLDAS Ajustado
Aconchi	50	36	30	66	137	111
Bacanuchi	0	44	35	3	152	124
Banamichi	42	56	30	54	135	110
El Cajon	54	41	32	106	149	121
El Molinito	13	32	25	203	130	105
El Oregano	69	38	29	193	137	112
Querobabi	0	53	42	167	174	142
Rayon	29	43	34	154	149	121
Factor de Sesgo de Campo de NLDAS =	0.7645			0.6140		

**Tabla 1.2 Precipitación acumulada (mm) registrada para los Huracanes Norberto y Odile en Septiembre del 2014 utilizando estaciones disponibles de la CONAGUA y del Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte América (NLDAS por sus siglas en inglés).**





## **B.2 Estimación de Escurrimientos**

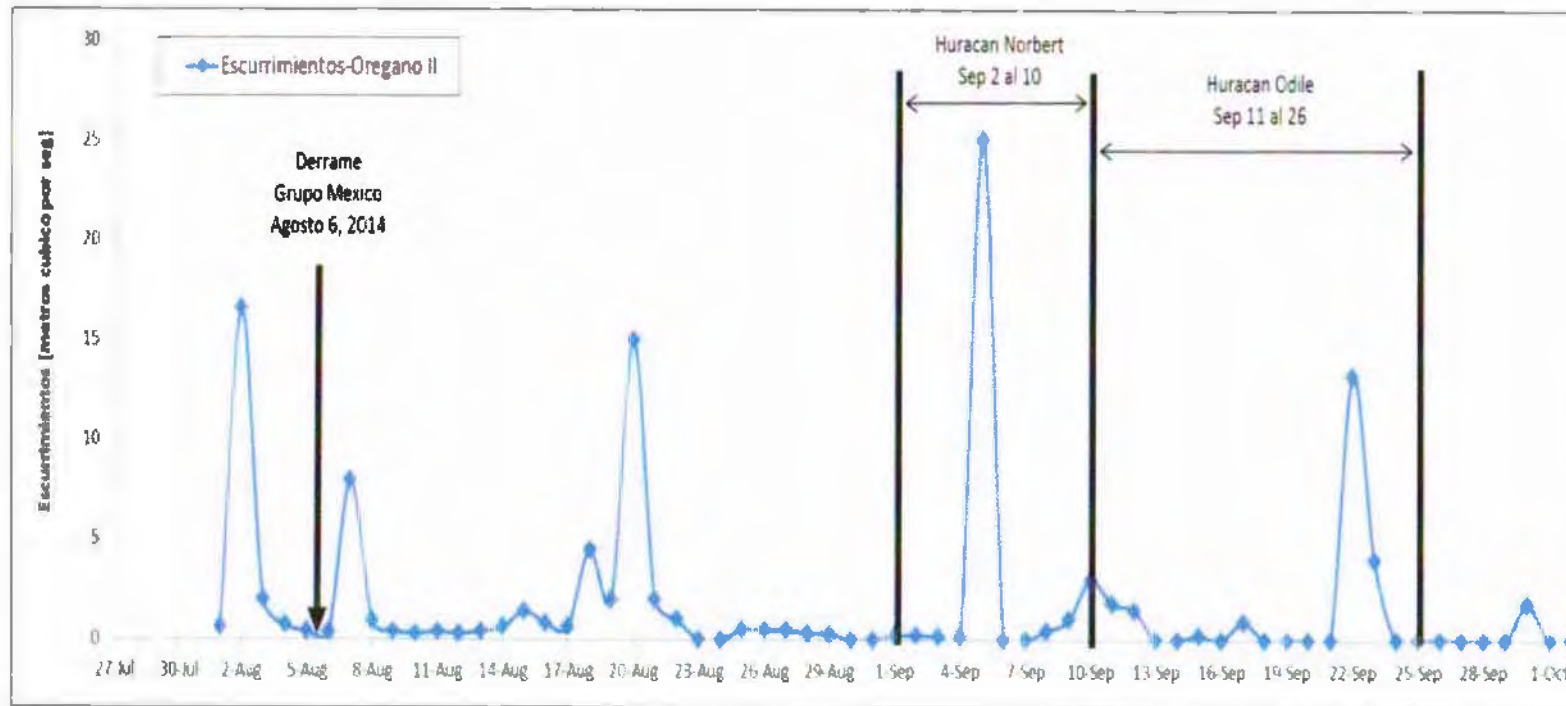
La CONAGUA región noroeste proporcionó los datos de la estación hidrométrica el Oregano II. La Figura 1.5 muestra los escurrimientos observados en la estación hidrométrica del Oregano II, donde se observa un pico mucho menor para Odile a pesar de haber recibido mayores precipitaciones que durante el evento del Huracán Norberto. Lo que parece indicar un error en los cálculos de los gastos estimados mediante la escala física para el Huracán Odile.

La estación del Oregano II se encuentra aguas arriba de la presa Rodolfo Félix Valdez "El Molinito" y es la única estación en donde se mide diariamente el flujo de agua superficial del Río Sonora.

Debido a que no se cuenta con estaciones hidrométricas en las partes altas de la cuenca se estimaron los escurrimientos en varios puntos a lo largo del cauce principal y en varios tributarios. Dichos puntos se encuentran en ubicaciones desde la parte alta de la cuenca donde ocurrió el derrame hasta la estación hidrométrica de CONAGUA (Ver Figura 1.6a).

Para estimar los escurrimientos se utilizó un modelo de predicción de escurrimientos basado en un el método racional modificado. Para poder representar la variabilidad espacial de la lluvia, se utilizaron los datos de precipitación ajustados de NLDAS, los cuales fueron incorporados junto con mapas de coeficientes de escurrimiento en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

Los coeficientes de escurrimiento de INEGI (Figura 1.6b) se ajustaron (calibración) hasta que se logró empatar los resultados del modelo racional con los escurrimientos observados en la estación hidrométrica del Oregano II.



NOTA: Se observa un pico mucho menor para Odile a pesar de haber recibido mayores precipitaciones que durante el evento del Huracán Norberto, lo que parece indicar un error en los cálculos de los gastos estimados mediante la escala física para el Huracán Odile

**Figura 1.5** Escurrimientos observados en la estación hidrométrica del Orégano II durante el periodo de influencia de los Huracanes Norberto y Odile en Septiembre del 2014





La Tabla 1.3 muestra las predicciones de los volúmenes de agua que escurrieron para cada tormenta a lo largo de varios puntos de interés (Figura 7) en la parte alta de la cuenca.

Se vuelve a recalcar que los volúmenes de escurrimiento generados por el Huracán Odile son más de tres veces mayores a los escurrimientos generados por el Huracán Norberto. Sin embargo, de acuerdo a los aforos oficiales registrados en la estación del Oregano (Figura 6), los escurrimientos durante el periodo de influencia de Odile aparentan ser más bajos. Esta información no es consistente con las precipitaciones generadas durante el periodo de influencia por el Huracán Odile, ya que la lluvia durante ese periodo fue mucho más alta que las precipitaciones generadas por el Huracán Norberto (Tabla 1.1 y Tabla 1.2). Los datos observados de escurrimientos en el Oregano II aún están siendo ajustados por los hidrólogos de la CONAGUA, por lo que los datos oficiales de escurrimientos aún no se encuentran disponibles.

Finalmente es importante aclarar que en sistemas semi-áridos como el del Río Sonora, los escurrimientos ocurren intermitentemente y que de la proporción de agua que logra llegar al cauce principal en las partes altas y conforme otros tributarios aportan sus escurrimientos, los volúmenes que se observan aguas abajo son mucho menores, debido a que a lo largo del cauce principal del río existen pérdidas significativas por infiltración a lo largo del cauce; por lo que este fenómeno debe ser estudiado con detalle con el fin de valorar el destino final de los contaminantes asociados al derrame que alcanzaron los cauces principales de los ríos Bacanuchi y Sonora.



Punto de interes	Descripcion sitios de interes	Volumen Escurrido [Millones de m <sup>3</sup> ]	
		Norberto (2 al 10 de Sep)	Odile (11 al 26 de Sep)
1	Cauce Principal - Presa El Molinito	2.552	9.269
2	Cauce Principal - Hidrometrica Oregano	2.541	9.230
3	Cauce Principal - URES*	2.331	8.492
4	Cauce Principal - MAZOCAHUI*	1.989	7.355
5	Cauce Principal - ACONCHI*	1.680	6.256
6	Cauce Pricipal - HUEPAC*	1.622	6.044
7	Cauce Principal - BANAMICHI*	1.483	5.528
8	Cauce Principal - SINOQUIPE*	1.263	4.704
9	Cauce Principal - ARIZPE*	1.053	3.966
10	Tributario Cauce Principal - Arizpe	0.000	0.001
12	Rio Bacoachi - 6km Aguas arriba Arizpe	0.546	2.028
13	Tributario Bacanuchi - 3km Norte Arizpe	0.126	0.437
14	Rio Bacanuchi - 10km Aguas Arriba Arizpe	0.400	1.527
15	Rio Bacanuchi - BACANUCHI*	0.284	1.122
16	Rio Bacoachi - BACOACHI*	0.261	1.054
17	Rio Bacanuchi - 10km Aguas Arriba Bacanuchi	0.229	0.913
18	Tributario Bacanuchi - 15km Aguas Arriba Bacanuchi	0.000	0.000
19	Rio Bacanuchi - 26km Aguas Arriba Bacanuchi	0.057	0.237
20	Arroyo Tinajas - 7km Norte Bacanuchi	0.035	0.147
21	Arroyo Tinajas - 12km Norte Bacanuchi	0.012	0.053
22	Arroyo Tinajas - En el punto del Derrame	0.001	0.006
Volumen Observado Estacion Hidrometrica Oregano II		2.480	1.650 *
% Error		2.4%	82.1%

\* Los datos de los escurrimientos en la estacion del Oregano II durante el Huracan Odile tienen un problema. CONAGUA esta revisando las escalas tomadas para corregir la estimación oficial.

**Tabla 1.3 Resultados de las estimaciones de escurrimientos a lo largo de la cuenca alta del Rio Sonora. Para estos datos se utilizó la precipitación ajustada de NLDAS, un mape de acumulación de flujos y los coeficientes de escurrimiento.**

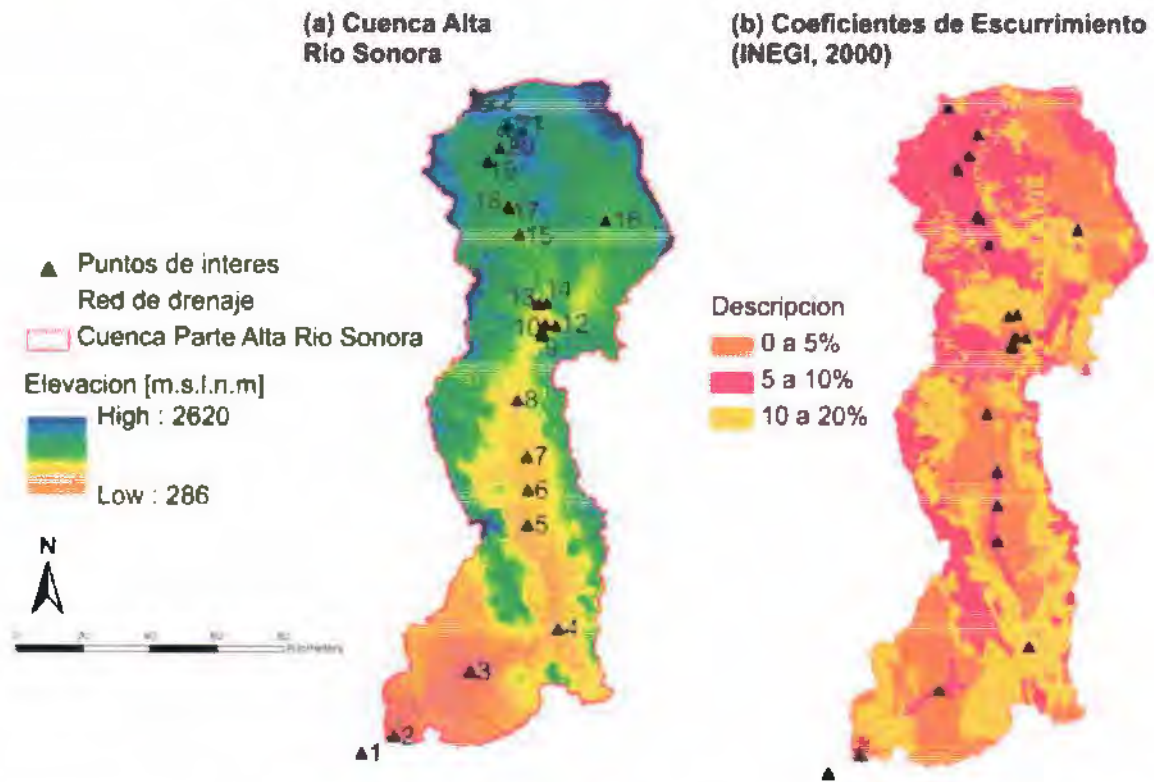


Figura 1.6 (a) Delimitación de la cuenca alta del Río Sonora, puntos de interés donde se estimaron los escurrimientos durante los Huracanes Norberto y Odile; (b) Coeficientes de escurrimiento utilizados en el modelo racional ajustado (Ver Tabla 1.3 para la descripción de cada Punto de interés).



### 1.3 Aspectos geoquímicos y su contexto geológico-minero

#### A) Generalidades

Se realizó la integración, análisis e interpretación de la información geoquímica de sedimentos de arroyo, publicada en años anteriores por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) y disponible para las cartas escala 1:50,000 dentro de la cuenca, localidades mineras obtenidas de University of Arizona–Industry–USGS Mexico Consortium, así como de información proveniente de estudios geológicos publicados por distintas fuentes.

Para la delimitación del área de estudio, se definió dentro de la cuenca Río Sonora la subcuenca Alto Río Sonora, que corresponde a las corrientes de agua que alimentan directamente al río del mismo nombre. El límite de dicha subcuenca fue determinado en base a modelos de elevación utilizando los parteaguas resultados del análisis de estos modelos. Este límite difiere ligeramente de la información de la CONAGUA. Se omitió en este estudio la parte occidental de la cuenca que corresponde a la subcuenca del Río San Miguel, la cual desemboca aguas abajo de la presa Rodolfo Félix Valdez (El Molinito).

Las cartas geológicas que corresponden a la zona de estudio se presentan en la Tabla 1.4

H12B54	CUQUIÁRICHÍ	H12B72	SARACACHÍ
H12B53	CANANEA	H12B83	BANÁMICHÍ
H12B52	DIECISEIS DE SEPTIEMBRE	H12B82	SANTA ANA
H12B64	BACOACHÍ	H12D14	CUMPAS
H12B63	BACANUCHÍ	H12D13	ACONCHÍ
H12B62	SANTA TERESA	H12D12	OPODEPE
H12B74	NACOSARI DE GARCÍA	H12D23	BAVIÁCORA
H12B73	ARIZPE	H12D22	RAYÓN
		H12D32	URES

Tabla 1.4 Cartas geológicas de la cuenca del río Sonora



## B) Interpretación de los datos geoquímicos de sedimentos

A partir de los análisis geoquímicos de 1,682 muestras de sedimentos de arroyo realizados por el SGM dentro de sub-cuenca del Río Sonora (Alto Río Sonora), se interpolaron los resultados por cada elemento y se generaron los mapas correspondientes a los elementos mayores<sup>11</sup> (Al, Fe y Mn) y elementos traza<sup>12</sup> (Ag, As, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se, Zn).

Se delimitaron intervalos de valores de las concentraciones totales considerando el valor de tendencia central ( $x$  = media aritmética) de cada uno de los elementos químicos de interés; de tal manera que se delimitaron 4 anomalías geoquímicas:

- 1)  $\leq X$
- 2)  $X$  a  $2.5 X$
- 3)  $2.5 X$  a  $5 X$
- 4)  $> 5 X$

En la Tabla 1.5 se pueden observar los valores de tendencia central y los máximos y mínimos de los elementos químicos de interés

La distribución de las concentraciones totales considerando los intervalos seleccionados se presenta y discute a continuación.

Debido al tipo de muestras analizadas (sedimentos de arroyo), el método de interpolación utilizado fue el Inverso de la Distancia Ponderado (IDW, por sus siglas en inglés), se seleccionó este método ya que los valores para estas muestras no son una característica *in-situ*, sino que son transportados y acumulados desde la fuente original.

<sup>11</sup> Se denominan elementos mayores (EM) los que están presentes de manera natural en altas concentraciones ( $> 1.0\%$ ) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos). Estos EM controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas a partir de fundidos

<sup>12</sup> SE denominan elementos traza (ET) los que están presentes de manera natural en bajas concentraciones ( $< 0.1\%$ ) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos).



Elemento	X	2.5X	5X	Mínimo	Máximo
Al (%)	2.56	6.40	12.80	0.260	6.580
Ag (ppm)	1.279	3.20	6.40	0.400	44.200
As (ppm)	20.303	50.76	101.52	0.323	2,091.700
Ba (ppm)	243.318	608.30	1,216.60	24.000	1,436.00
Be (ppm)	1.553	3.88	7.77	0.200	16.559
Cd (ppm)	0.919	2.30	4.60	0.040	61.583
Cr (ppm)	66.294	165.74	331.47	1.000	546.480
Cu (ppm)	54.114	135.29	270.57	1.000	6,471.000
Fe (%)	3.826	9.57	19.13	0.890	18.330
Mn (ppm)	705.213	1,763.03	3,526.07	46.000	5,319.000
Ni (ppm)	16.899	42.25	84.50	0.900	838.000
Pb (ppm)	55.72	139.29	278.58	2.000	17,612.000
Sb (ppm)	3.363	9.40	18.79	0.200	220.600
Se (ppb)	257.891	644.73	1,289.46	69.000	2,431.000
Zn (ppm)	101.80	254.51	509.01	13.000	3,502.000

Nota: en color rojo los elementos mayores, que son los que están presentes de manera natural en altas concentraciones (> 1.0%) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos). Estos EM controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas a partir de fundidos

**Tabla 1.5 Estadística descriptiva de las concentraciones totales de los elementos químicos de interés en sedimentos de la cuenca del río Sonora**

De forma general se observa una correlación entre moderada y fuerte para la mayor parte de los elementos, ya que los valores más altos en la mayoría de éstos corresponden a zonas mineralizadas.

Cabe mencionar que las cartas H12B82 (Santa Ana), H12B83 (Banámichi), H12D12 (Opodepe), H12B52 (Dieciséis de Septiembre) y H12B54 (Cuquiánichi) presentan una evidente discrepancia en los valores de algunos elementos con respecto a las cartas adyacentes, lo cual se manifiesta en cambios bruscos de los valores interpolados y que coinciden con los límites de las cartas mencionadas (ver por ejemplo el caso del Al y del Se). Aun así, se decidió incorporar estas cartas para interpretar la concentración de los elementos que no parecen haber sido afectados por esta disparidad. A continuación se analiza más a detalle la distribución de las concentraciones, a partir de las interpolaciones realizadas para cada elemento.



### **Plata (Ag)**

La plata muestra anomalías positivas muy puntuales. De norte a sur se pueden observar las anomalías positivas que se pueden observar en la Figura 1.7 y que se describen a continuación:

- E del Rancho Ojo de Agua. Esta anomalía no corresponde a ninguna zona minera asociada. Se encuentra en un área en donde afloran rocas sedimentarias y volcánicas terciarias.
- Localidad a 5 km al E del bordo de contención del arroyo Tinajas, construido por Grupo México al N del rancho La Morita, después del derrame.
- Localidad a 8.5 km al SE del rancho La Morita. Coincide con la presencia de vetas hidrotermales hospedadas en rocas volcánicas (prospecto minero El Manzanal).
- Localidad a 1 km al SE de la ranchería Hitisorachi.
- Localidad a 7.5 km al WSW de Arizpe.
- Localidad a 20 km al E de Aconchi. Se trata de una zona minera que tiene varias minas de Ag, Pb, Ba y Cu (Cabecitas, Buckeye, La Chanza, Placeritos, etc.), anomalía asociada probablemente a los depósitos metálicos de Cumobabi que pertenecen, en parte, a la cuenca del Río Moctezuma.
- Minas de San Felipe de Jesús (La Artemisa, Santa Rosa, Lamas, etc.) con una anomalía positiva, entre 2.5 y 5X.
- Anomalías positivas distribuidas en la Sierra El Jaralito al SW de Baviácora y al W de La Labor y de Aurora.
- Finalmente existe una muy alta anomalía, localizada a 10 km al E de San José de Gracia, que podría estar relacionada con el prospecto minero denominado La Dorada, localizado al NE de esta zona.

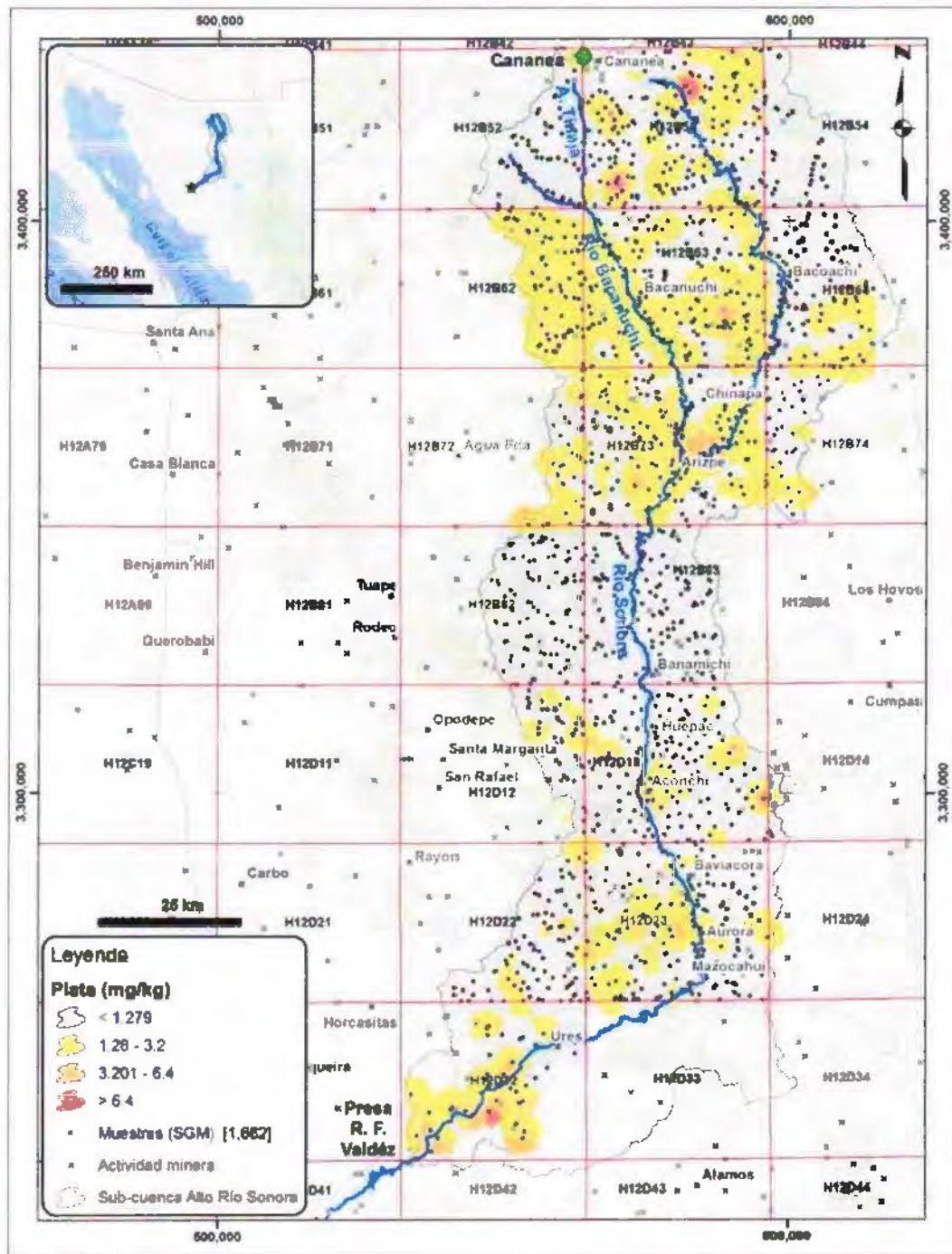


Figura 1.7 Distribución de concentraciones totales de plata (Ag) en sedimentos de la cuenca del río Sonora





### **Aluminio (Al)**

El aluminio presenta valores muy homogéneos en toda la cuenca del río Sonora (Figura 1.8). No se registra la presencia de valores altos o muy altos. La parte alta de la cuenca se caracteriza por una anomalía moderada ( $X - 2.5X$ ).

El río Sonora entre Cananea y Bacoachi presenta una anomalía baja o media. A partir de Bacoachi y hasta Bámori, la anomalía de Al es moderada. Más al sur esta anomalía desaparece, pero este cambio corresponde exactamente al límite entre las cartas H12B73 y H12B83 a lo largo del cual el cambio de anomalía interpolada es sistemático, como se mencionó al inicio del capítulo de los resultados. La parte media y sur de la cuenca presenta una anomalía media a baja. Algunas áreas de las sierras adyacentes al río presentan anomalías moderadas, como el área W del distrito Cumobabi, el área de la mina Washington, o bien el área de las minas de W de la Sierra de Aconchi.

La abundancia del aluminio en la corteza terrestre, inicialmente a partir de las rocas magmáticas, y posteriormente reconcentrado en las rocas sedimentarias arcillosas hace que el terreno tenga un valor muy homogéneo, como es el caso de las rocas clásticas de la Formación Báucarit que rellenan el valle del río Sonora. El rango de valores utilizados en este trabajo hace posible la distinción de anomalías fuertes para los elementos que tienen concentraciones pequeñas. En cambio, en el caso de los elementos más abundantes, como Al y el Si, las anomalías se pierden en el valor de fondo.

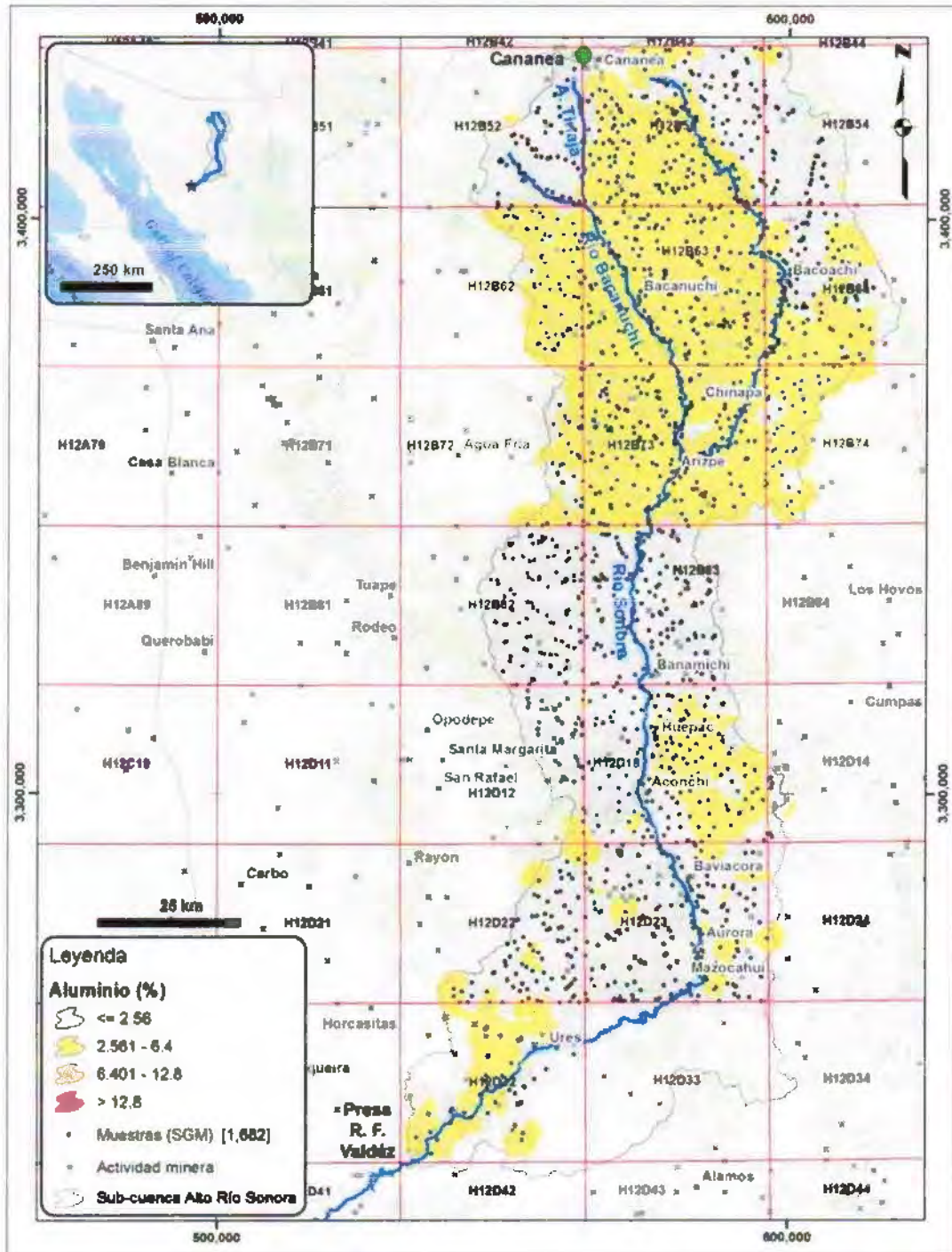


Figura 1.8 Distribución de concentraciones totales de aluminio (Al) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



### **Arsénico (As)**

El arsénico muestra 4 anomalías positivas importantes, con valores mayores de 5X (Figura 1.9). De norte a sur, estas anomalías son:

- La zona minera de Buenavista del Cobre, cuya zona de influencia se extiende hacia el S.
- Cerro Colorado, localizado a 4 km al E del rancho La Morita. Sin embargo, ningún proyecto u obra minera están reportados en el área.
- Localidad a 4 km al W del Picacho de Bacoachi.
- La más importante en tamaño coincide con la zona mineralizada localizada a 20 km al E de Aconchi. La anomalía de As cubre una superficie de 60 km<sup>2</sup> en la zona mineralizada y sigue aguas abajo del arroyo El Rancho, por más de 10 km, desde el rancho Las Cabecitas y la mina abandonada Valencia. Una anomalía positiva moderada (entre X y 2.5X) alcanza al río Sonora al N de Baviácora.
- Entre las latitudes de Arizpe y Aconchi existen varias anomalías positivas puntuales asociadas a la presencia de yacimientos minerales (región de Átil, El Gachi, San Felipe de Jesús, etc.).

El cauce del río Sonora presenta una anomalía moderada continua desde Arizpe hasta 5 km aguas abajo de Sinoquipe, es decir sobre una distancia aproximada de 30 km. La misma anomalía moderada se encuentra entre Bacoachi y Arizpe sobre una distancia aproximada de 32 km.

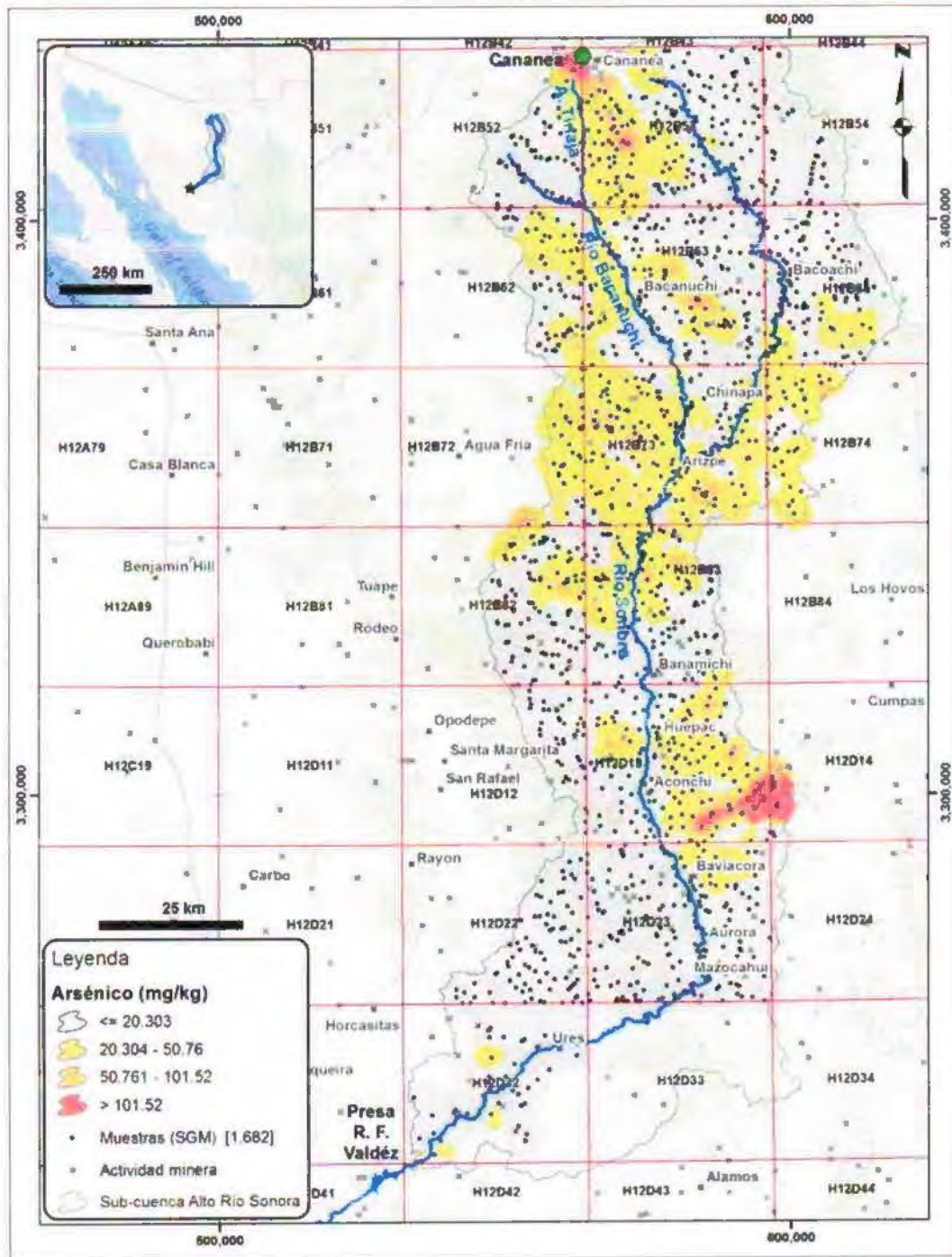


Figura 1.9 Distribución de concentraciones totales de arsénico (As) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



### **Bario (Ba)**

El bario presenta varias anomalías moderadas, entre 2.5X y 5X, las cuales son puntuales en la parte norte de la cuenca, entre Cananea y Arizpe (Figura 1.10). De norte a sur, las principales son:

- Un área al N del rancho La Morita, la cual coincide aproximadamente con la anomalía positiva en Ag, al SE del Cerro El Caracol.
- Una zona localizada aguas abajo del área minera que incluye los prospectos o las minas antiguas La Fortuna, El Encino, La Colorada, Los Alemanes y La Morita.
- Un área que incluye los prospectos San Carlos, Cerro Cacaxtle y San Antonio, a pesar que la anomalía se encuentra aguas arriba de la zona mineralizada.

Solamente los sedimentos de la cuenca de río Bacanuchi presentan anomalías positivas moderadas (entre X y 2.5X). El río Sonora presenta las mismas anomalías entre Arizpe y Bámori. Aguas abajo, el río Sonora presenta valores inferiores o iguales a la media hasta la zona de Ures y San José de Gracia, en donde reaparecen anomalías entre X y 2.5X.

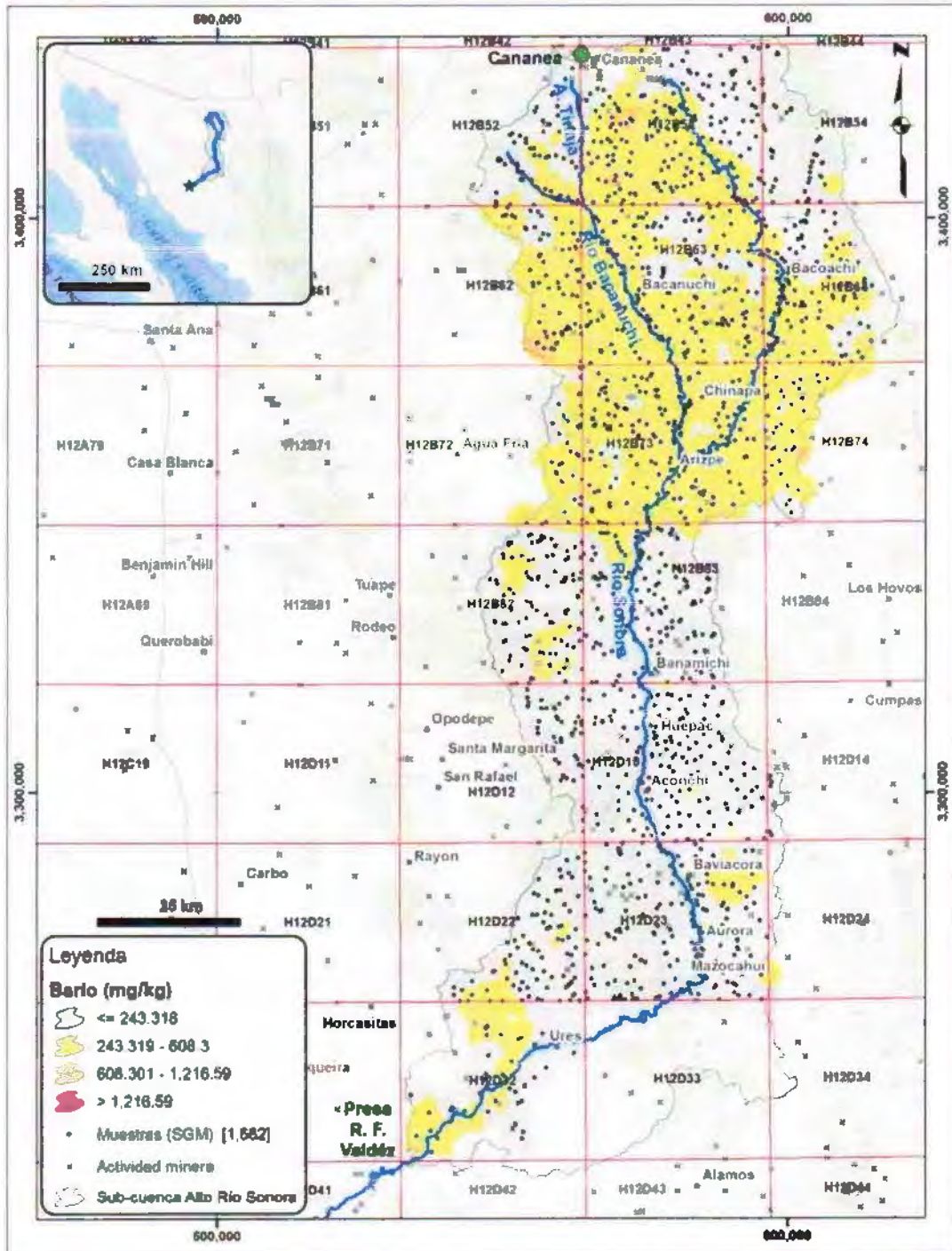


Figura 1.10 Distribución de concentraciones totales de bario (Ba) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



### **Berilio (Be)**

El berilio es un elemento relativamente abundante en la Sierra de Aconchi (Figura 1.11) en donde está asociado a vetas pegmatíticas peraluminosas. Se encuentra en el mineral berilo, en general de color azul de fórmula  $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$ .

Existen 3 anomalías de Be entre 2.5X y 5X, una de ellas asociada a una anomalía central alta en el S de la Sierra El Jaralito, que corresponde a la parte S de la Sierra de Aconchi, aproximadamente a 13 km al SW de Baviácora. Estas anomalías fuertes de la Sierra de Aconchi son el origen de anomalías moderadas (entre X y 2.5X) en el río Sonora entre Aconchi y La Capilla.

Las otras dos están localizadas en el área de la mina de Cananea y en el área de los ranchos Cowboy y Dos Cowboy, al NNW del ejido 16 de Septiembre.

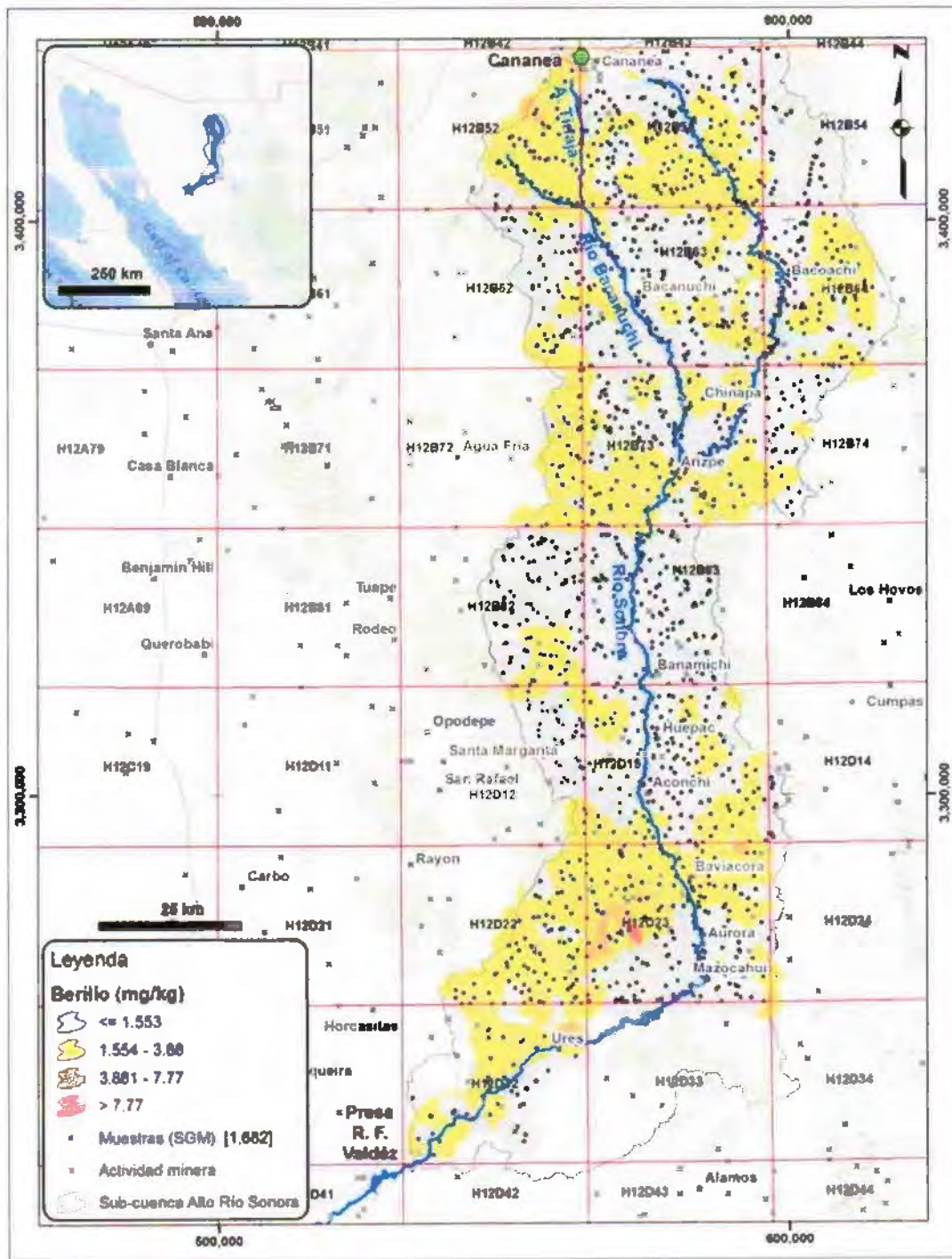


Figura 1.11 Distribución de concentraciones totales de berilio (Be) en sedimentos de la cuenca del río Sonora





### **Cadmio (Cd)**

Las anomalías moderadas de cadmio se encuentran distribuidas ampliamente en el sur de la mina de Cananea, con un máximo a 6.5 km al E del rancho La Cabellera, que coincide con la anomalía muy alta de plata de la zona de El Manzanal (Figura 1.12).

Una anomalía aislada y muy alta de origen desconocido se encuentra sobre el río Sonora a 4.3 km al N de Sinoquipe. Sin embargo, el límite N muy recto y de dirección E-W de la anomalía moderada de Cd que se encuentra generalizada en las cartas H12B83 y H12B82, coincide perfectamente con el límite entre éstas y las cartas al N y al S, lo cual sugiere que los valores de cadmio de las cartas H12B82 y H12B83 están sistemáticamente elevados.

Las otras dos anomalías muy altas están relacionadas a zonas mineras: las minas polimetálicas de San Felipe de Jesús y las minas del distrito Cumobabi, en donde nuevamente se observa un aporte de cadmio hacia el pueblo de Baviácora por el arroyo El Rancho, lo cual produce una anomalía moderada en el pueblo mismo.

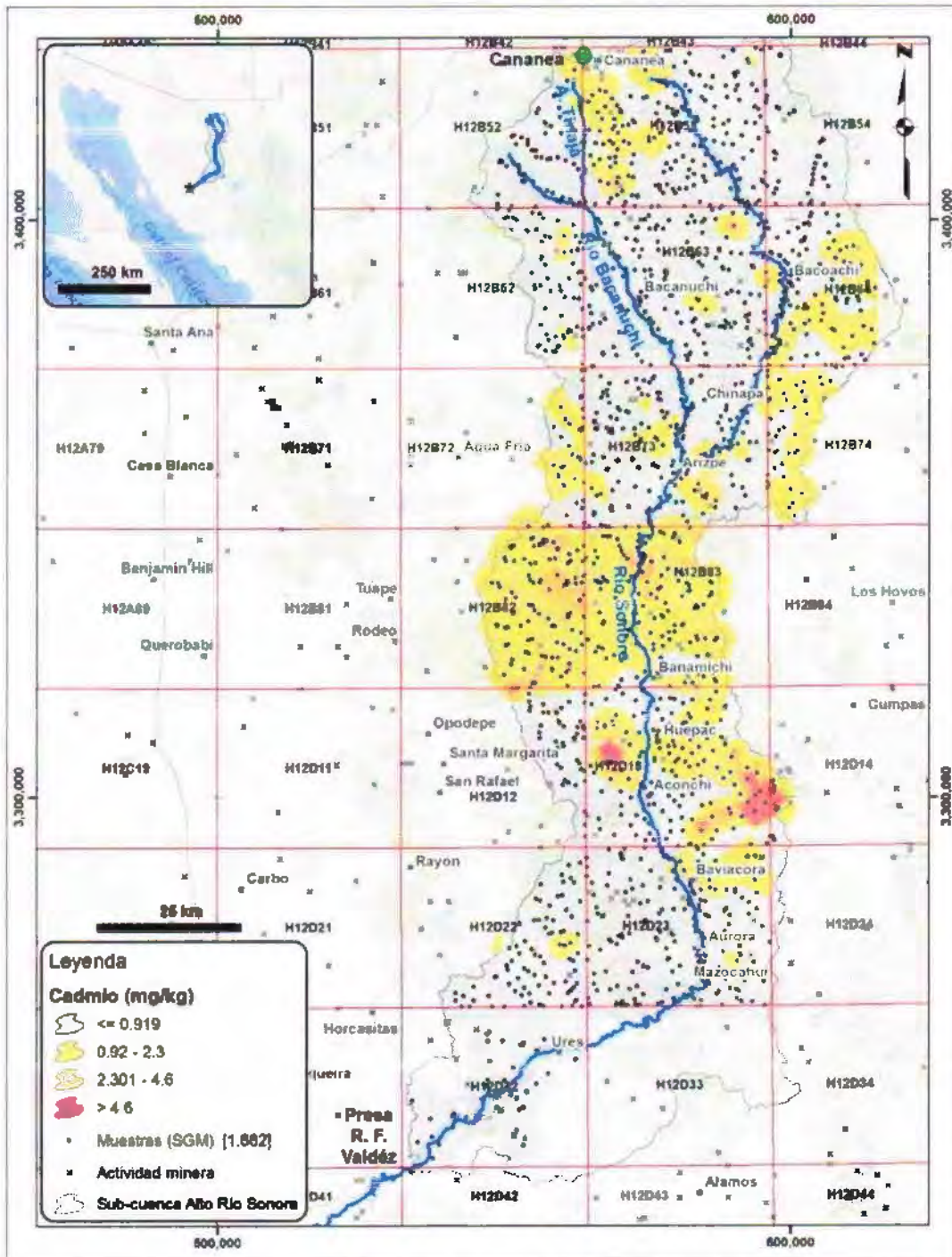


Figura 1.12 Distribución de concentraciones totales de cadmio (Cd) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



### **Cromo (cr)**

En la parte alta de la cuenca se encuentran valores moderados de cromo en la mayor parte ella (Figura 1.13), con nueve zonas de pequeña superficie con valores altos, siete de ellas en la cuenca del río Sonora aguas arriba de la unión entre los ríos Sonora y Bacanuchi. Las otras dos están localizadas respectivamente a 3.5 km al W del ejido 16 de Septiembre y a 5 km al SE de Bacanuchi. Cabe mencionar que, en el caso de la segunda, la anomalía moderada está dada solamente en una muestra.

En la parte central de la cuenca se vuelve a encontrar un límite artificial entre las cartas Arizpe y Banámichi, debido, otra vez, a un problema analítico entre los dos conjuntos de muestras de ambas cartas.

Finalmente existe una anomalía muy alta localizada a 12.5 km al ENE de Baviácora, pero que no coincide con las anomalías positivas o altas de los otros elementos a proximidad del distrito de Cumobabi. Esta anomalía muy alta de cromo se encuentra aislada, más al S de dicho distrito. Ninguna mina que pueda generar esta anomalía de arroyo está reportada en esta zona.

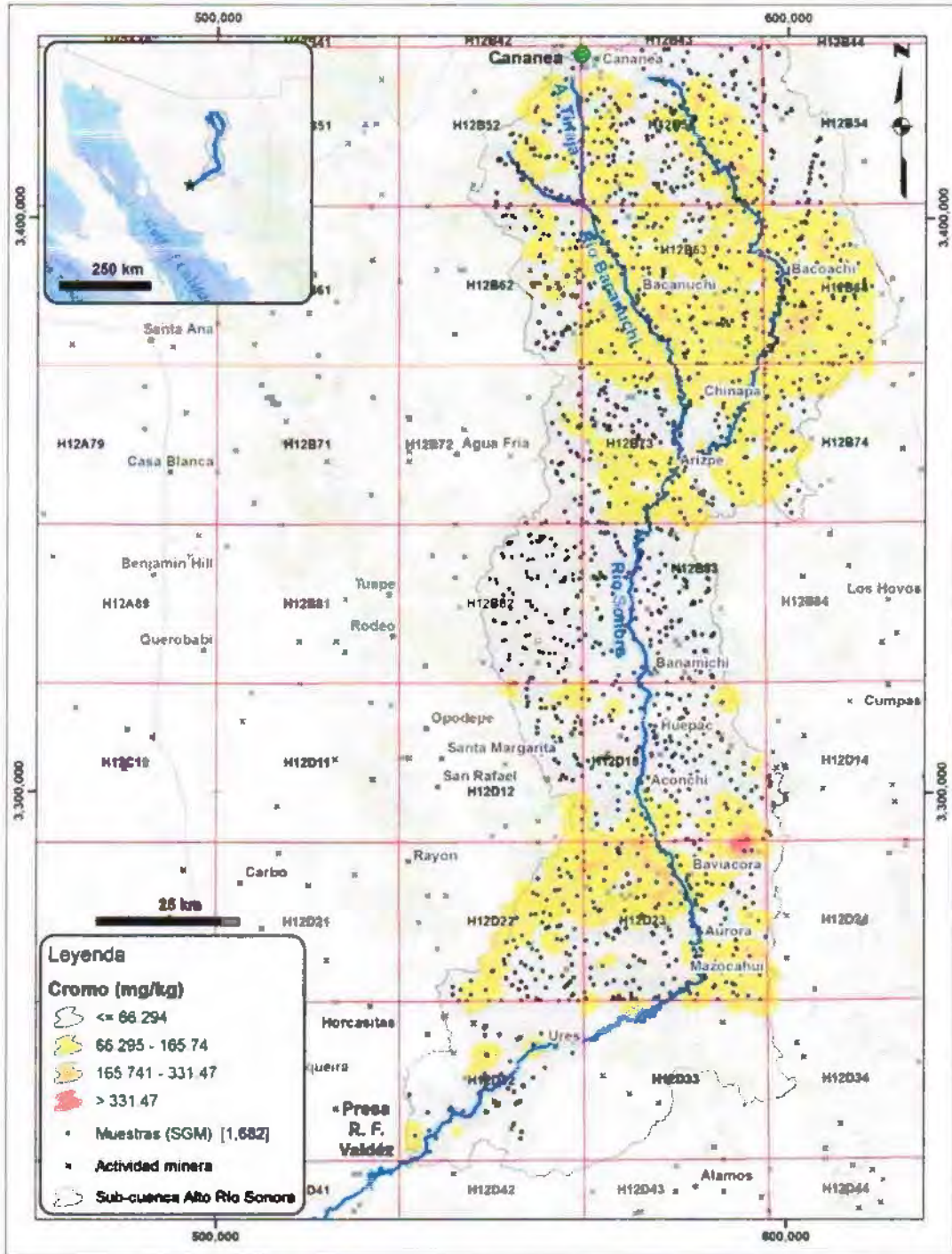


Figura 1.13 Distribución de concentraciones totales de cromo (Cr) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



### **Cobre (Cu)**

El sur de la mina Buena Vista del Cobre presenta obviamente anomalías muy altas a moderadas de cobre (Figura 1.14). La anomalía muy alta cubre gran parte del sector del arroyo Tinaja. También existe una anomalía alta que coincide con el área de la presa de jales al E de la ciudad.

Hacia el sur y hasta Aconchi, el río Sonora no intersecta ninguna zona de anomalía moderada o más alta.

Entre Aconchi y Baviacora, el río Sonora y sus afluentes presentan anomalías moderadas debido al aporte de Cu desde las zonas de minas de San Felipe de Jesús, de la mina Washington localizada a 13 km al E de Huépac, y por las minas del distrito de Cumobabi cuya influencia es muy notable.

Continúa la presencia anómala de metales, en este caso de cobre, a lo largo del río El Rancho, que baja hacía el pueblo de Baviácora.

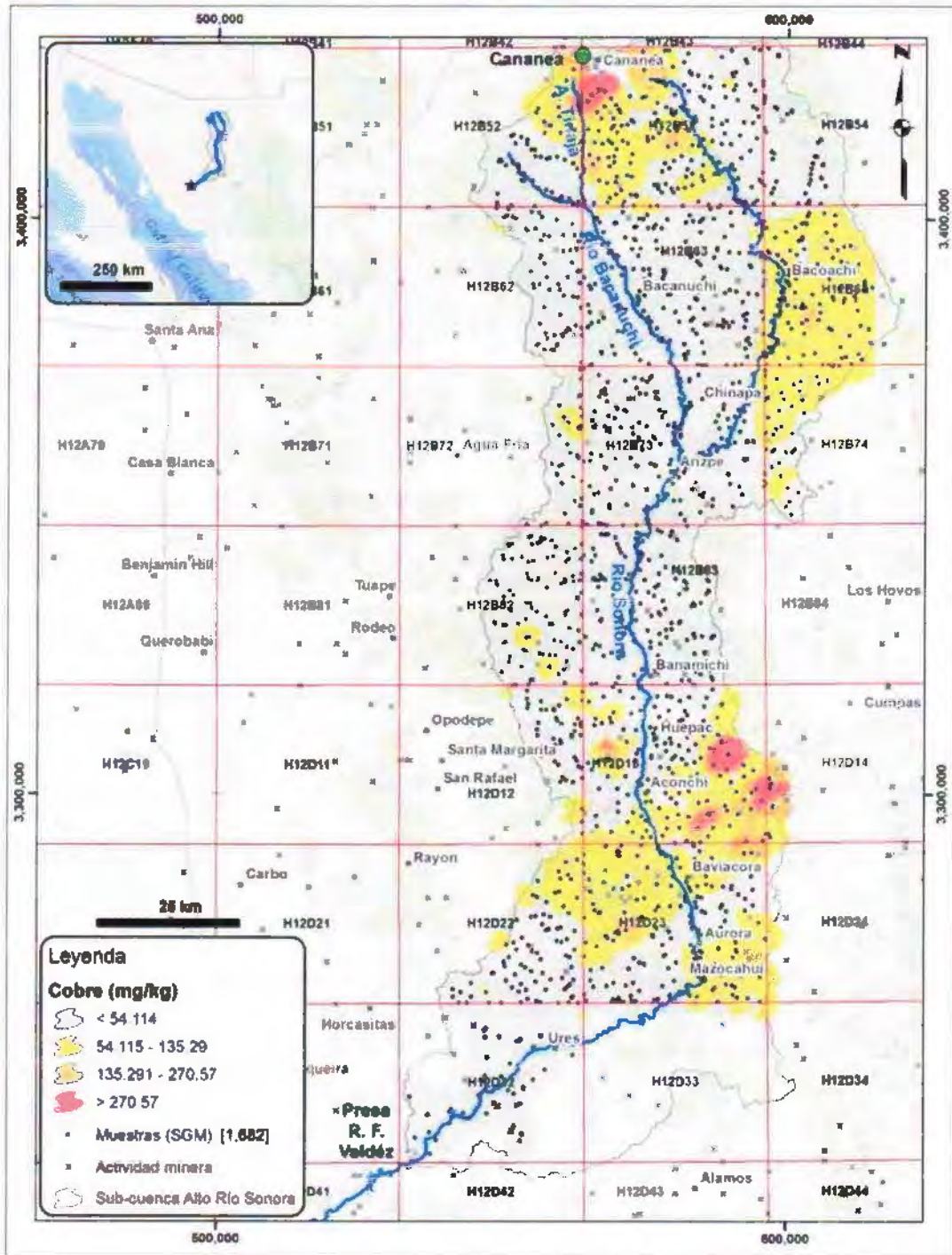


Figura 1.14 Distribución de concentraciones totales de cobre (Cu) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



### **Hierro (Fe)**

A pesar que existen extensas áreas oxidadas en la cuenca del río Sonora, el hierro no presenta anomalías positivas notables. La superficie interpolada de valor mediano o inferior a la media es prácticamente equivalente a la superficie correspondiente al valor moderado.

Existen cuatro áreas con valores relativamente altos (Figura 1.15) que son de norte a sur:

- La zona explotada de la mina Buenavista del Cobre que incluye los tajos abiertos y los cerros localizados al NW de la operación.
- El área de los ranchos Cowboy y Dos Cowboy, al NNW del ejido 16 de Septiembre. Esta anomalía coincide con la anomalía de Be en la misma área.
- Un área débilmente definida en el pie poniente de la Sierra Los Ajos a 16 km al ENE del rancho Mututicachi.
- Un área a 12 km al ENE de Baviácora

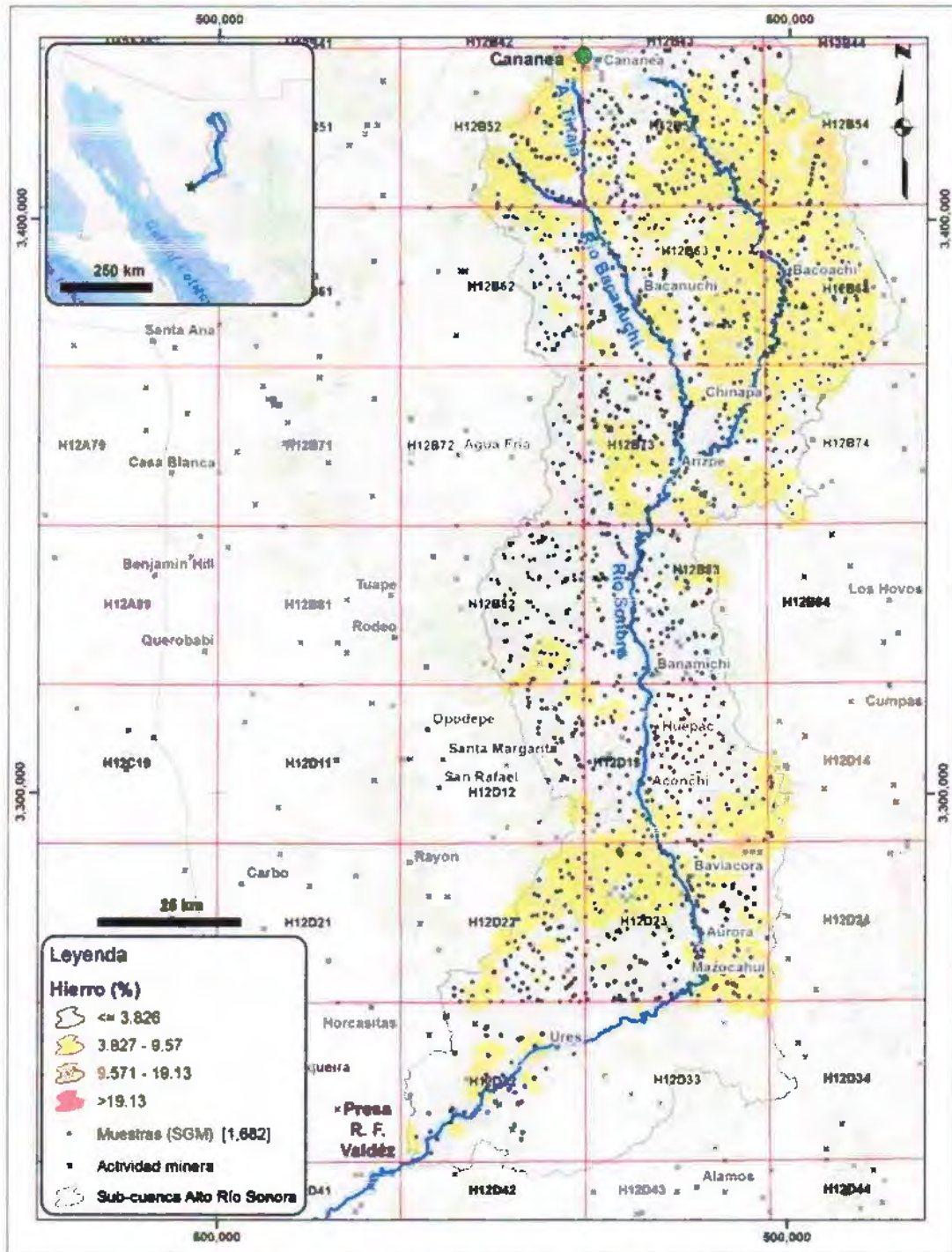


Figura 1.15 Distribución de concentraciones totales de hierro (Fe) en sedimentos de la cuenca del río Sonora





### **Manganeso (Mn)**

Así como para el hierro, la zona principal con valores moderadamente altos de Mn se encuentra en un sector de 2,500 km<sup>2</sup> aproximadamente. En esta zona sobresalen dos anomalías altas de menor superficie, la primera correspondiente a la anomalía de Fe al pie de la Sierra Los Ajos, la segunda al E del rancho La Morita (Figura 1.16).

En la parte central de la cuenca las anomalías moderadas están relacionadas con la zona minera de San Felipe de Jesús y las minas de Fe y de W de El Jaralito, Santa Elena y Contrabando al SW de Baviácora. Solamente las minas de San Felipe de Jesús generan una anomalía moderada en el río Sonora.

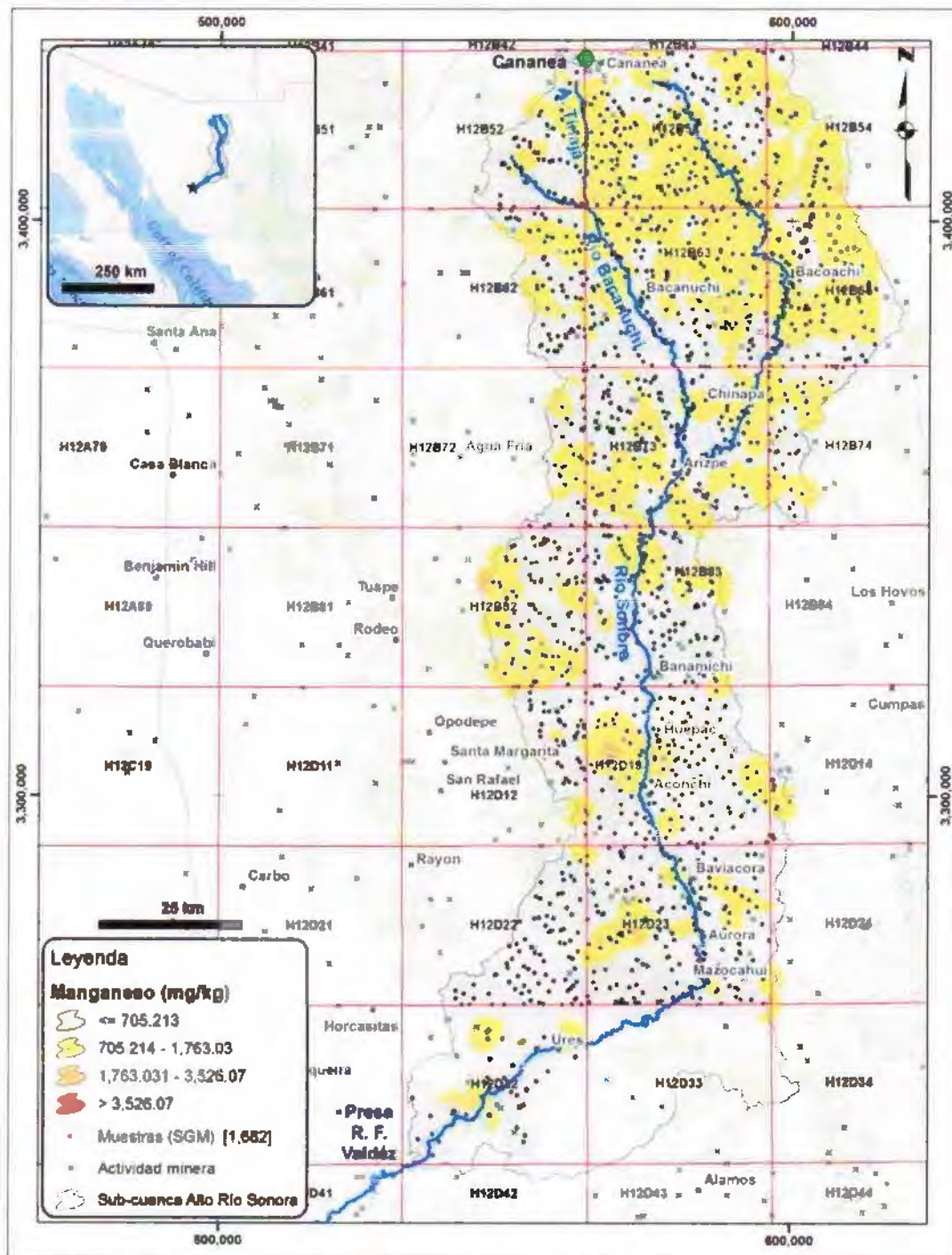


Figura 1.16 Distribución de concentraciones totales de manganeso (Mn) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



### **Níquel (Ni)**

La zona sur de la mina Buenavista del Cobre presenta una amplia zona con anomalía moderada en níquel (Figura 1.17).

Sin embargo, dos anomalías muy altas, pero de poco alcance, se encuentran al W y SW del ejido 16 de Septiembre. Estas anomalías son locales y no alcanzan a producir un aporte que se siga en el arroyo en dirección del río Bacanuchi.

A 23 km al poniente de Sinoquipe existe una anomalía muy alta de Ni, pero no está relacionada a alguna zona mineralizada conocida. Es probable que esté asociada a rocas precámbricas máficas. De igual manera existe una anomalía a 7 km al ENE de Aconchi que no está relacionada con áreas mineralizadas. Ésta se encuentra en los sedimentos de la Formación Baúcarit y su origen es desconocido.

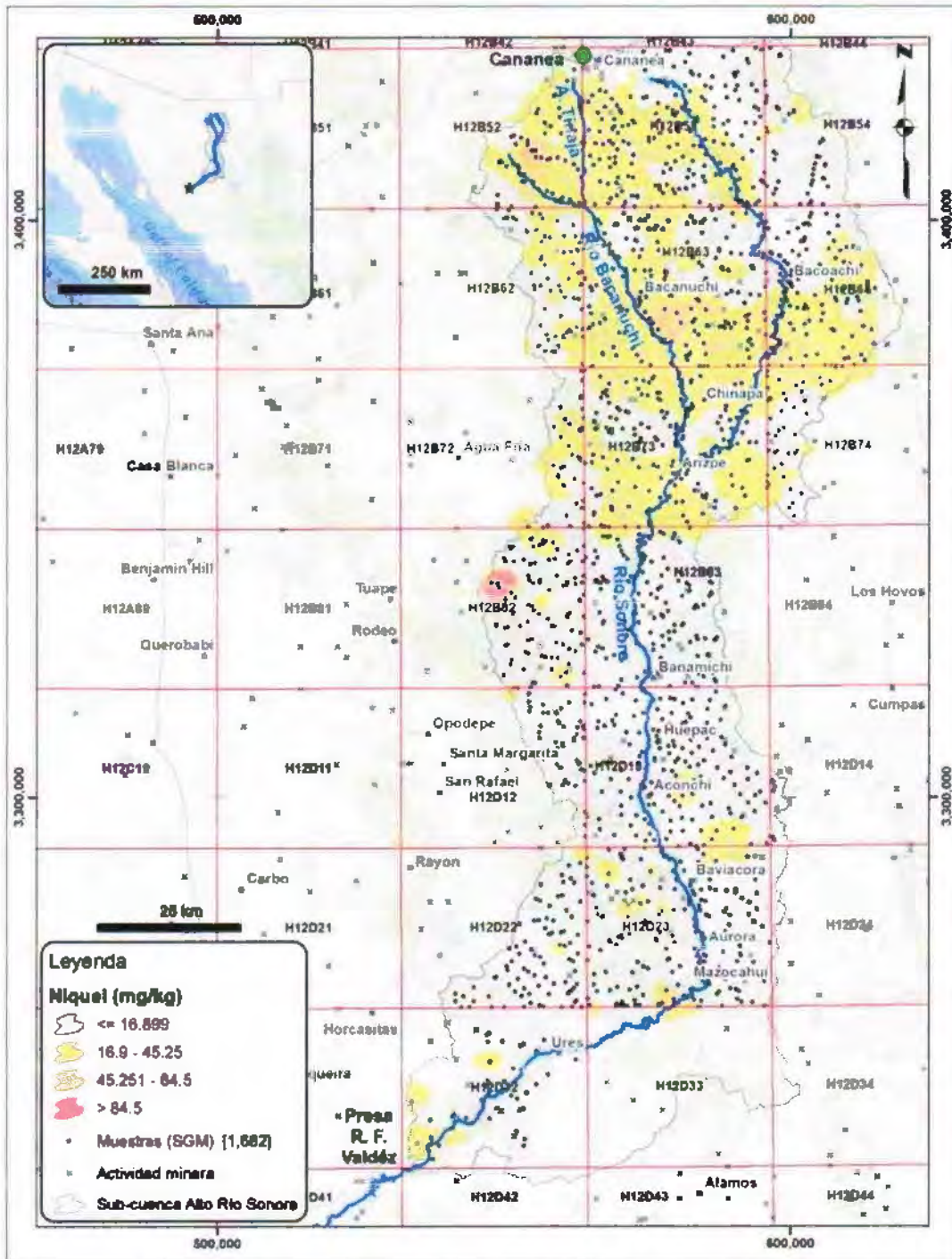


Figura 1.17 Distribución de concentraciones totales de níquel (Ni) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



### **Plomo (Pb)**

El plomo está claramente relacionado con la presencia de zonas mineras.

Al sur de la mina Buenavista del Cobre, las anomalías muy altas de plomo coinciden con las de Ag, en particular en la zona de la mina de plata El Rosario, en el Cerro El Caracol (Figura 1.18). La otra anomalía muy alta está asociada a la zona mineralizada de El Manzanal, 11 km al S de El Caracol. Estas dos anomalías están inmersas en una zona de anomalía moderada de plomo que cubre toda la parte S de la mina Buenavista del Cobre.

En la zona de Arizpe, las anomalías muy altas a moderadas están claramente relacionadas con las minas como el Gachi explotadas principalmente por Pb y Zn. Sin embargo al S de Htisorachi, aguas arriba de la conjunción entre los ríos Bacanuchi y Sonora, la fuerte anomalía de plomo, la cual coincide con una fuerte anomalía de plata no corresponde a ninguna obra minera conocida.

4 km al N de Sinoquipe, en el cauce del río Sonora, aparece una anomalía muy alta de Pb, así como a 2.5 km al NW del mismo pueblo. Algunas fuentes desconocidas de Pb estarían relacionadas al origen de estas anomalías altas que generan una anomalía moderada dentro del pueblo. Una anomalía muy alta se encuentra también a unos 25 km al W de Banámichi, y parece relacionada con la Mina de Au Santa Fe.

Las zonas mineralizadas de San Felipe de Jesús y de Cumobabi son sitios de altas anomalías de Pb. La primera está en el cauce del río Sonora entre Huépac y Aconchi. La anomalía de Cumobabi se une a la anomalía asociada a la mina Las Cabecitas, produciendo una anomalía alargada a lo largo de arroyo Las Garzas hasta el valle del río Sonora.

En la parte sur de la cuenca, no existen anomalías notables de Pb.

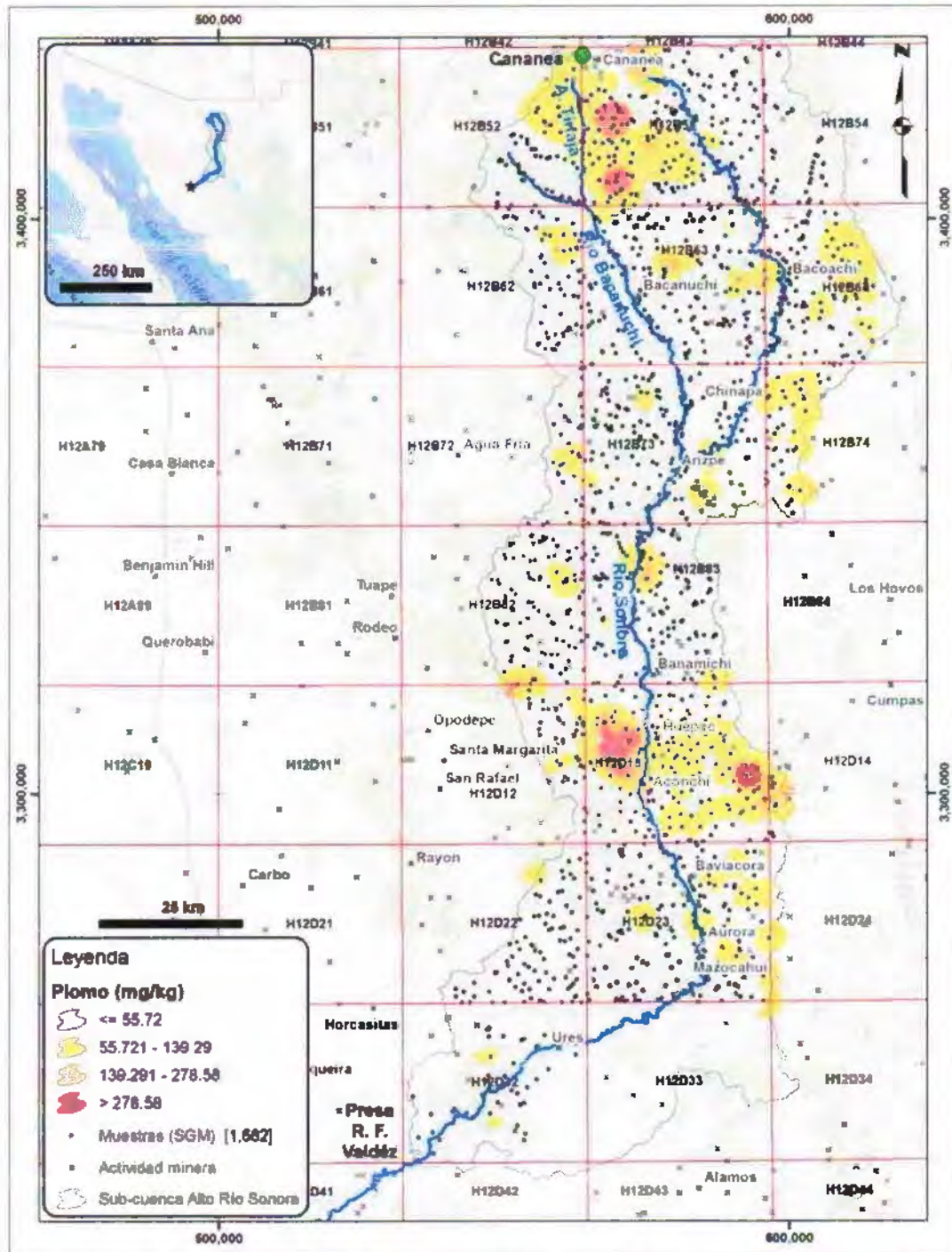


Figura 1.18 Distribución de concentraciones totales de plomo (Pb) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



### **Antimonio (Sb)**

El antimonio presenta anomalías muy altas en el sur de Cananea en la zona de El Manzanal, así como alrededor de las minas de Cu-Mo de El Alacrán y otras (Figura 1.19).

Se observa una anomalía moderada a lo largo del río Bacanuchi, hasta el pueblo del mismo nombre. También la parte alta del arroyo Tinajas presenta este valor moderado.

Una anomalía muy alta se encuentra a 4 km al W del Picacho de Bacoachi y coincide con una anomalía también muy alta de As. Sin embargo, no existe ninguna obra minera formal reportada en este sector. De igual manera, se observa una correlación entre una anomalía muy alta de Sb al E de Hitorisachi y una anomalía alta de As.

Existen dos anomalías muy altas de Sb en la parte centro-este de la cuenca del río Sonora. Una está relacionada claramente con la mina Washington (Cu-Mo-W-Ag-Au-Zn-Pb). Se observa su influencia hasta el pueblo de Huépac. Otra está ligada al distrito minero de Cumobabi y la mina Las Cabecitas. Se observa claramente una anomalía alta controlada por el cauce del arroyo El Rancho, pero no alcanza la parte baja del valle y los pueblos de San José de Baviácora, Baviácora y La Capilla, donde presentan solamente una anomalía por debajo de la media.

Finalmente las pequeñas obras mineras localizadas entre Ures y San José de Gracia generan una anomalía moderada a lo largo de este tramo del río Sonora.

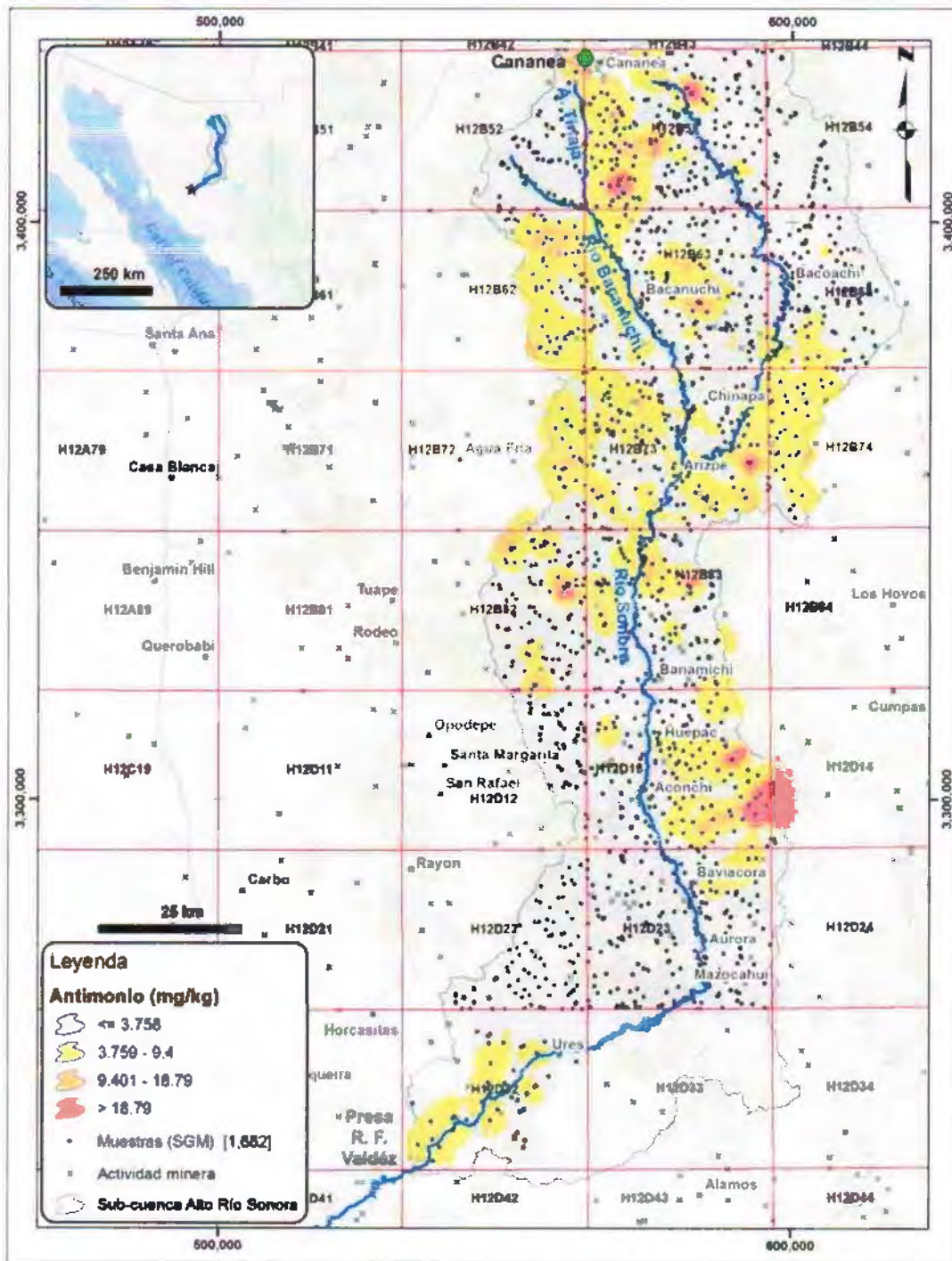


Figura 1.19 Distribución de concentraciones totales de antimonio (Sb) en sedimentos de la cuenca del río Sonora





### **Selenio (Se)**

El selenio presenta claros problemas analíticos en las cartas H12B52, H12B64, H12B82 y H12B83. Se podrá observar en la figura correspondiente que las cartas al norte de la cuenca (H12B52 y H12B64) muestran valores altos (2.5X–5X), con límites rectos que coinciden con los bordes de las cartas. Al igual que en el área norte de la cuenca, en la parte central, la anomalía alta de forma rectangular coincide con los límites N y S de las cartas H12B82 y H12B83 (Figura 1.20).

Se recomienda no tomar en cuenta los datos de estas cuatro cartas, claramente alterados por razones analíticas, y se dará particular énfasis a esta área en los estudios de valores de fondo que contempla el proyecto.

Existe también una anomalía muy alta asociada al distrito minero Cumobabi. Sin embargo, las anomalías se restringen a la parte serrana y no se observa ningún control por el arroyo El Rancho y el arroyo Las Garzas, como en el caso de otros elementos.

Ninguna anomalía superior a la media se encuentra en la parte baja de la cuenca.

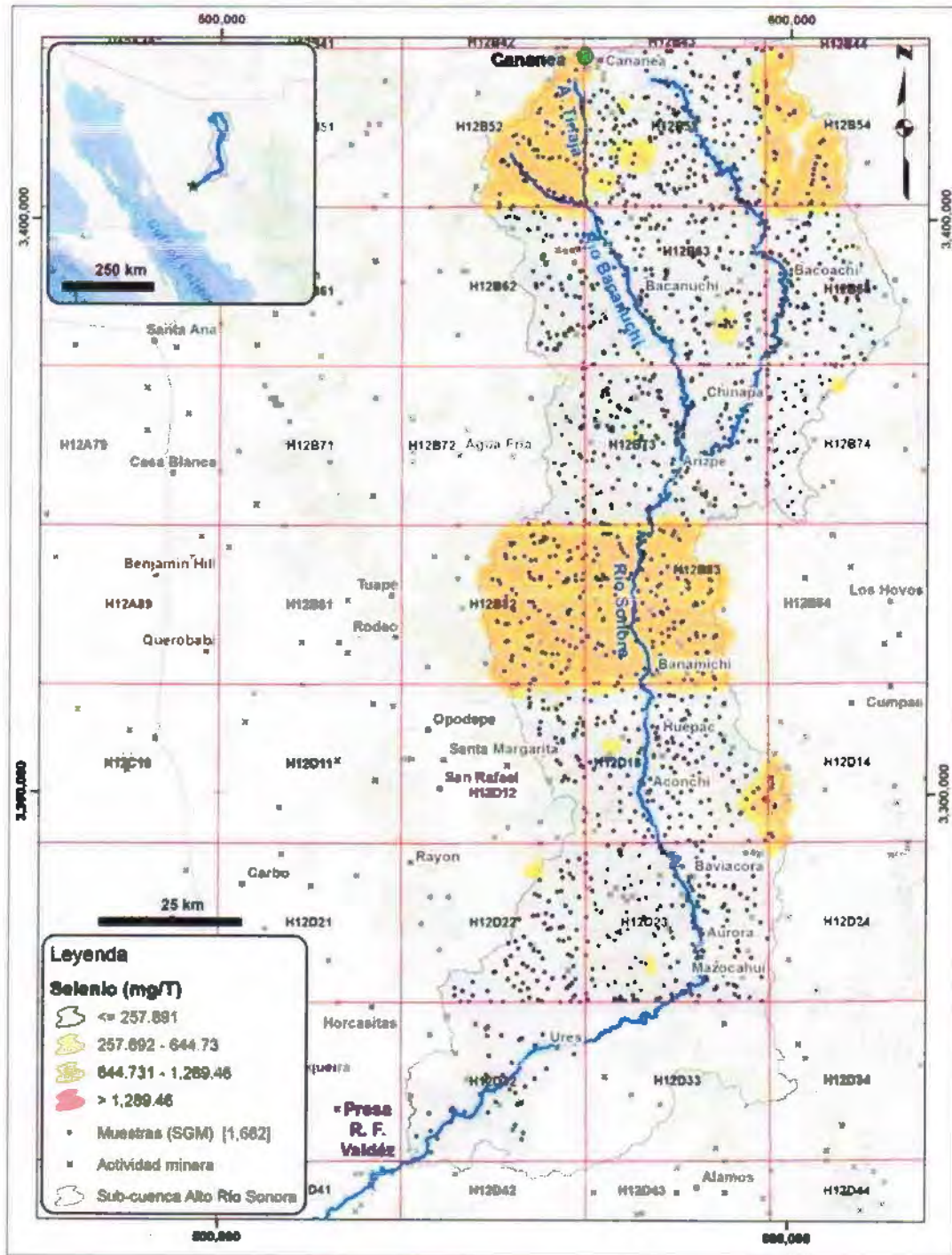


Figura 1.20 Distribución de concentraciones totales de selenio (Se) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



## **Zinc (Zn)**

Al igual que otros metales, el zinc presenta tres anomalías altas a muy altas en la parte alta de la cuenca (Figura 1.21) una asociada al yacimiento El Alacrán, otra al yacimiento El Manzanal y otra localizada en una cantera de piedra laja al SW del rancho Mututicachi.

La influencia de la mina Buenavista del Cobre se registra al sur de su ubicación por lo que el arroyo Tinajas presenta una anomalía moderada hasta su unión con el río Bacanuchi, el cual presenta la misma anomalía sobre aproximadamente 15 km. Dos pequeñas anomalías fuertes se encuentran al W de Bacoachi. Una está relacionada con el yacimiento de oro Las Coloradas; la otra parece relacionada con un prospecto reportado por el SGM. La anomalía de Zn está a 1 a 2 km hacia el S, aguas abajo de dicho prospecto.

Una anomalía muy alta de Zn se encuentra al norte de Sinoquipe y coincide perfectamente con la anomalía de Cd reportada anteriormente. No se observa ninguna conexión con algún depósito mineral. Sin embargo, a 7.5 km al NE de dicha anomalía se encuentra el yacimiento Las Chispas registrado con valores de Ag-Au, Zn-Pb. No existe un muestreo de sedimentos de arroyo entre el depósito y la anomalía, lo cual puede explicar la relación entre ambos en la imagen de interpolación.

En la parte media de la cuenca, existen dos anomalías muy altas de Zn, las cuales claramente están relacionadas con las minas de San Felipe de Jesús y Cumobabi. Ambas generan anomalías moderadas que alcanzan el río Sonora entre Huépac y Aconchi. Al S de Aconchi, la anomalía del río Sonora es mediana o inferior a la media.

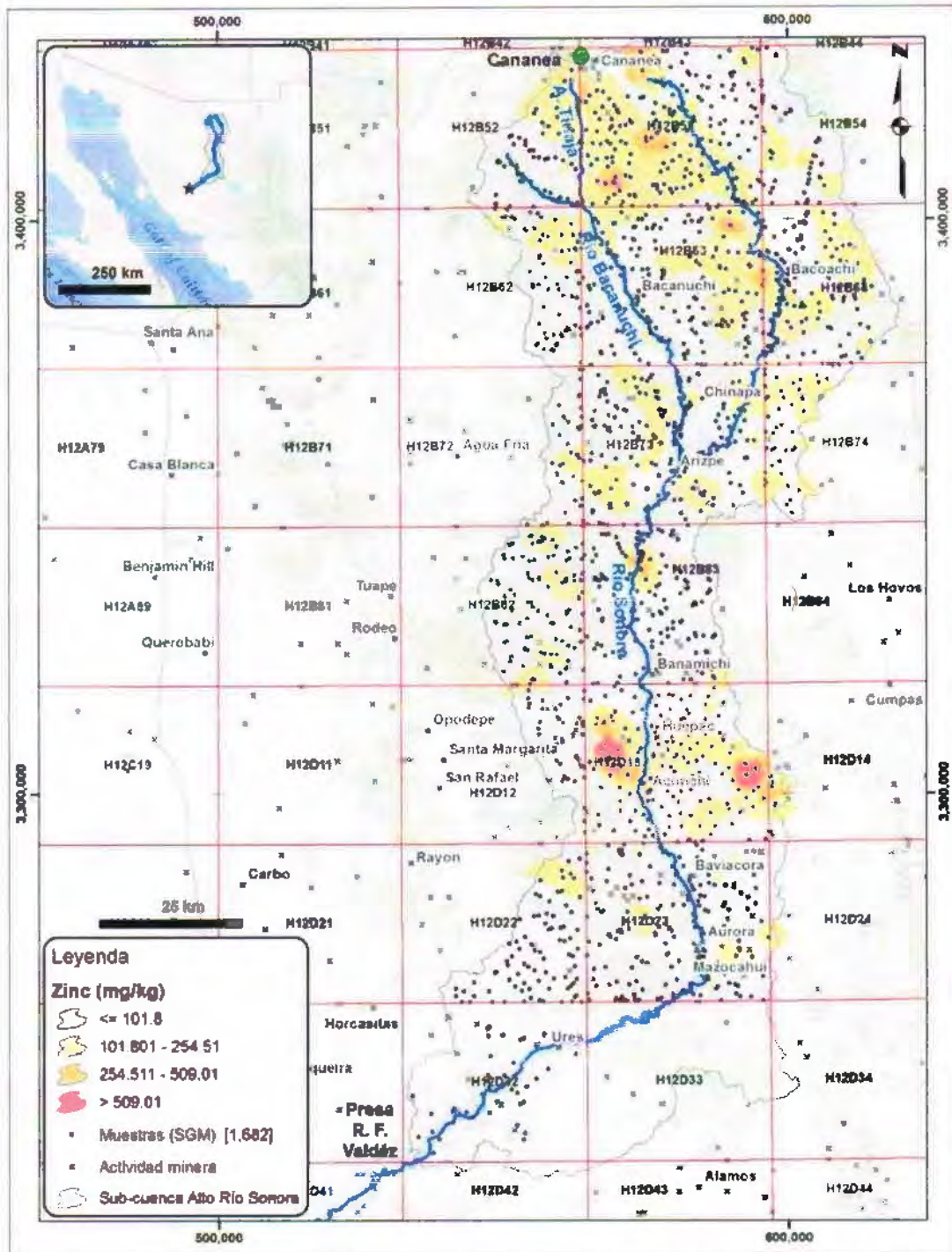


Figura 1.21 Distribución de concentraciones totales de zinc (Zn) en sedimentos de la cuenca del río Sonora



## **2. CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE DE CONTAMINACIÓN**

### **2.1 Antecedentes**

#### **2.1.1 Identificación de la fuente de contaminación**

El día 06 de agosto de 2014 se derramaron unos 40,000 m<sup>3</sup> de solución ácida enriquecida con cobre, hierro y otros metales pesados disueltos (solución ácida ferro-cuprífera).

Esta solución ácida ferro-cuprífera se derramó del represo de "solución preñada" denominado "Tinajas 1", que se encuentra ubicado dentro de las instalaciones de la Empresa Buenavista del Cobre "BVC" (Figura 2.1).

De acuerdo a información pública de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el derrame impactó a las aguas superficiales del arroyo "Tinajas", río Bacanuchi y río Sonora; por lo que la solución ácida ferro-cuprífera derramada, que estaba contenida en el represo Tinajas 1, constituye la fuente de contaminación.

Sistemáticamente, por mandato de la CONAGUA y COFEPRIS, se han analizado los siguientes elementos químicos en los cuerpos de agua arriba mencionados: aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb) y zinc (Zn).



### **2.1.2 Información sobre el proceso que generó la solución ácida ferro-cuprífera que se derramó al río Sonora**

En julio de 2012, la empresa Buena Vista del Cobre presentó el Informe Preventivo del Proyecto denominado "Terreros de lixiviación Tinajas", en Cananea, Estado de Sonora; con lo que se estaba dando cumplimiento a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-159-SEMARNAT-2011, que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre<sup>13</sup>.

El mencionado proyecto consiste en la disposición en pilas de mineral fresco (rocas de diferente granulometría) que contiene valores diseminados de cobre para la extracción y recuperación de este metal empleando el proceso de lixiviación en terreros<sup>14</sup> mediante el empleo de soluciones acuosas en medio sulfatado ácido que permiten recuperar una solución preñada<sup>15</sup> de cobre en repesos<sup>16</sup> a partir de los cuales la solución preñada es enviada a las plantas ESDE (Extracción por Solventes y Depósito Electrolítico) que operan en el Complejo Minero, con el fin de obtener el cobre metálico.

En el entendido que la fuente de contaminación que pretendemos caracterizar es la solución preñada, que estaba contenida en el Repeso Tinajas 1 y que se derramó al entorno, consideramos importante detallar la información presentada por la empresa BVC tanto del mineral fresco lixiviable que originó la solución preñada, como la solución misma que estaba contenida en el repeso Tinajas 1.

<sup>13</sup> Esta NOM fue publicada en el Diario Oficial el día Lunes 13 de febrero de 2012

<sup>14</sup> Terreros: Conjunto de obras y servicios que integran el proceso de lixiviación en pilas de mineral de cobre. Un terrero está constituido comúnmente por: [i] una o varias pilas de mineral (rocas) construidas sobre una plataforma; [ii] una pileta para la recolección de la solución preñada; [iii] una pileta de emergencia o sobreflujo; y [iv] una pileta para la recolección de la solución gastada (NOM-159-SEMARNAT-2011).

<sup>15</sup> Solución preñada: Aquella en estado acuoso que proviene del patio o terrero, cargada con los elementos de valor económico (cobre), una vez recuperada del proceso de lixiviación

<sup>16</sup> Repeso: Es la pileta o depósito construido donde se almacena la solución preñada



### **Mineral fresco cuya lixiviación originó la solución preñada contenida en el represo Tinajas 1**

El mineral fresco provenía del Tajo Norte de la mina a cielo abierto que opera la empresa BVC en su complejo minero-metalúrgico. Este mineral presenta contenidos de cobre de baja ley, entre 0.15 y 0.35% Cu, con un promedio de 0.25% Cu, presentándose éste principalmente en minerales (sulfuros) secundarios cobre (covelita  $\text{CuS}$  y calcosita  $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y en menor proporción, en minerales (sulfuros) primarios de cobre (calcopirita  $\text{CuFeS}_2$ ). Otros minerales sin valor comercial (minerales de ganga) que contiene el mineral fresco lixiviable son (en orden de abundancia): cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), muscovita-sericita ( $\text{KA}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ ), illita ( $\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ ) y halloisita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_3(\text{OH})_4$ ).

### **Solución para la lixiviación del mineral fresco**

Las características fisicoquímicas promedio de la solución para la lixiviación del mineral fresco en los terreros son: pH = 0.8 a 1.4; potencial de óxido-reducción (ORP) = 300 a 350 mV, concentración de  $[\text{Fe(II)}] = 1.5$  a 2.5 g/L; concentración de  $[\text{Fe(III)}] = 28.5$  a 47.5 g/L; y concentración de  $[\text{Cu}] = 0.2$  a 0.6 g/L.

### **Solución preñada**

A la salida del circuito de lixiviación, se recuperaba por gravedad una solución preñada con las siguientes características fisicoquímicas promedio: pH = 1.0 a 1.3; potencial de óxido-reducción (ORP) = 350 a 400 mV, concentración de  $[\text{Fe(II)}] = 1.5$  a 2.5 g/L; concentración de  $[\text{Fe(III)}] = 28.5$  a 47.5 g/L; y  $[\text{Cu}] = 0.3$  a 2.0 g/L.

Esta solución preñada era recuperada en repesos, incluido el de Tinajas 1, que nos ocupa; desde donde era bombeada al sistema de plantas ESDE de la empresa en el mismo complejo minero-metalúrgico. Una vez procesada la



solución preñada por las plantas ESDE, de la pileta de colas se bombeaba la solución gastada de nuevo para el riego en los terreros, completando un circuito cerrado.

De acuerdo a la información proporcionada por la empresa, la capacidad de operación del represo Tinaja 1 es de 42,585 m<sup>3</sup>.



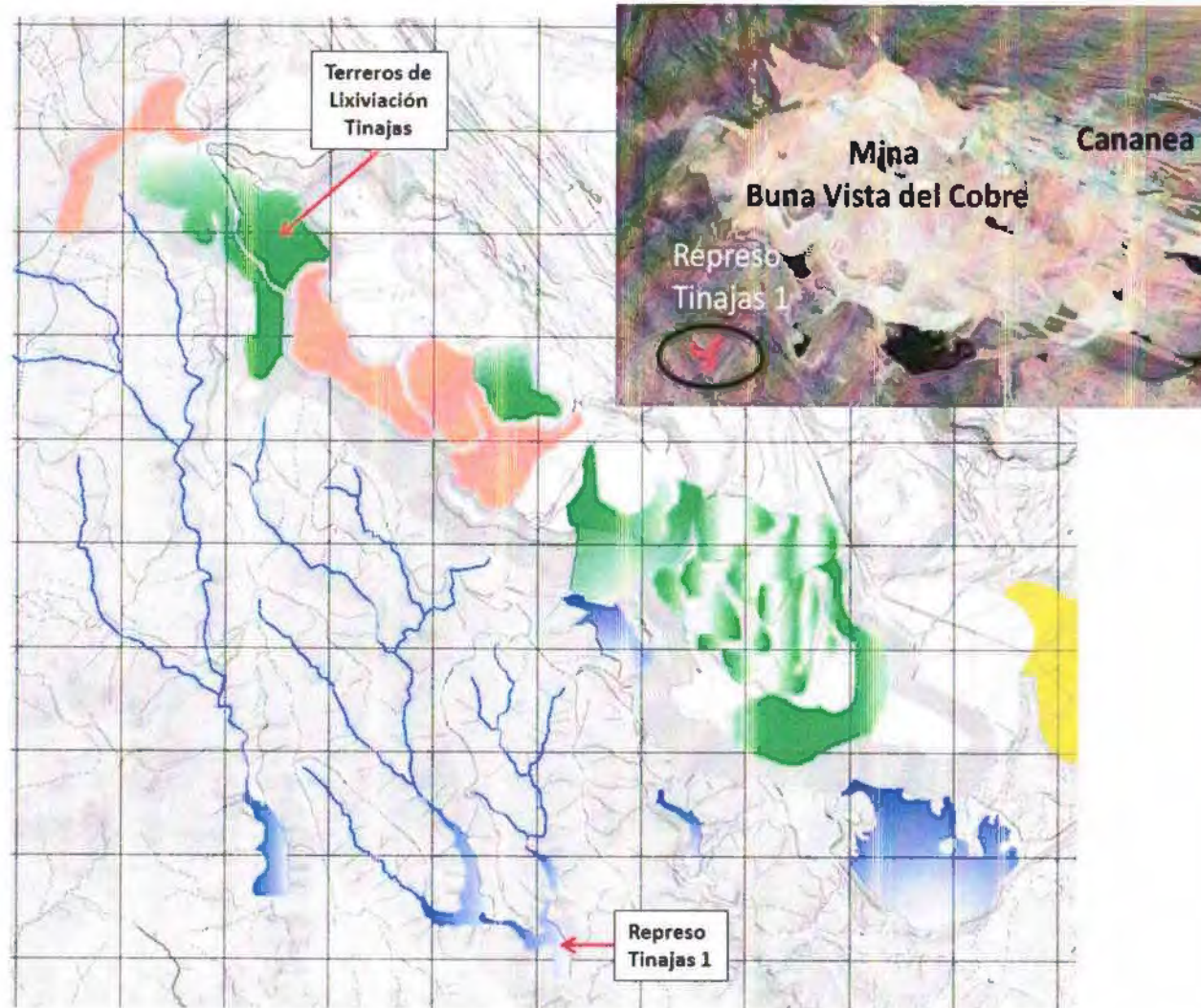


Figura 2.1 Ubicación de los del represo Tinajas 1 y de los terreros cuya lixiviación originó la solución preñada contenida en el represo y que se derramó al entorno



### 2.1.3 Composición química de la solución preñada derramada y proporcionada por la SEMARNAT

El 11 de noviembre del año en curso, previa solicitud del Grupo de Investigación, recibimos la siguiente caracterización de la fuente de contaminación (solución ácida derramada) información de parte de la SEMARNAT.

De acuerdo a esta información, en la formalización de aviso presentado por la empresa BVC, el 12 de agosto de 2014, se anexó la siguiente caracterización química de la solución ácida derramada el 06 de agosto de 2014 del represo Tinajas 1 (Tabla 2.1)

Parámetro	Concentración, g/L	Parámetro	Concentración, g/L
Aluminio	3.51	Molibdeno	0
Arsénico	0.03	Níquel	0.01
Berilio	0	Plomo	0
Bismuto	0	Azufre	30.41
Calcio	0.52	Antimonio	0
Cadmio	0.01	Selenio	0
Cobalto	0.03	Estaño	0
Cromo	0	Estroncio	0
Cobre	0.86	Telurio	0
Hierro	7.99	Titanio	0
Magnesio	0.73	Zinc	0.44
Manganeó	0.67	pH	2.18

**Tabla 2.1 Composición química de la solución ácida que se derramó del represo Tinajas (Fuente: Empresa BVC, proporcionada por la SEMARNAT)**

Adicionalmente, la SEMARNAR proporcionó, al Grupo de Investigación, la composición química de solución ácida derramada el 06 de agosto de 2014 y muestreada del contenido residual en el represo el 08 de agosto de 2014. Esta composición química se presenta en la Tabla 2.2.



Parámetro		Concentración, mg/L
Aluminio	Al	461
Antimonio	Sb	< 0.5
Arsénico	As	42.7
Bario	Ba	< 0.5
Cadmio	Cd	7.76
Cobre	Cu	114
Cromo	Cr	1.54
Hierro	Fe	1080
Manganeso	Mn	98.1
Mercurio	Hg	< 0.0006
Níquel	Ni	11
Plomo	Pb	2.5
Zinc	Zn	51

Nota: De esta lista de elementos químicos, el Al, Fe y Mn se asocian a los denominados Elemento mayores; en cambio Sb, As, Ba, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn

Se denominan elementos mayores (EM) los que están presentes de manera natural en altas concentraciones (> 1.0%) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos). Estos EM controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas a partir de fundidos

Se denominan elementos traza (ET) los que están presentes de manera natural en bajas concentraciones (< 0.1%) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos).

**Tabla 2.2 Composición química de la solución ácida que se derramó del represo Tinajas (Fuente: CONAGUA. Muestreo realizado el 08 de agosto de 2014, dos días después del derrame)**

Es importante recalcar que los elementos químicos reportados por la CONAGUA en la fuente de contaminación son los mismos 13 elementos que sistemáticamente se han analizado en los cuerpos de agua de la cuenca del río Sonora: aluminio (Al), antimonio (Sb), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), y zinc (Zn).

Si se toma en cuenta que las concentraciones proporcionadas por BVC están dadas en "g/L" y las de CONAGUA en "mg/L" se puede concluir que las



concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd) son el mismo orden y comparables entre sí.

En cambio, se puede observar que las concentraciones de aluminio (Al), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn) son mayores las reportadas por la empresa BVC que las reportadas por CONAGUA hasta en 7.6, 7.5, 7.4, 6.8 y 8.6, respectivamente.

## **2.2 Muestreo orientativo y caracterización de la fuente de contaminación**

### **2.2.1 Metodología**

#### **A) Muestreo**

El 02 de octubre de 2014 se colectaron un total 16 muestras (Figura 2.2, 2.3 y Tablas 2.3 y 2.4) tanto en el depósito de terreros Tinajas y represo Tinajas 1.

A continuación los tipos de muestras colectadas

- Terreros (n = 11), que son rocas de diferente granulometría cuya lixiviación da origen a la solución preñada que se almacenaba en el Represo Tinajas
- Sedimentos (n = 3) en el represo Tinajas 1
- Solución preñada (n= 2) del represo Tinajas 1

#### **B) Análisis químicos y mineralógicos**

##### **B.1) Parámetros generales**

En las muestras de líquidas se determinaron el pH y la conductividad eléctrica. Las mediciones se realizaron con equipos de la marca Hanna Instruments (HI-98185, HI- 99301), previamente calibrados con soluciones estándares.



### B.1) Elementos mayores (EM) y elementos traza (ET)

En muestras seleccionadas de terreros ( $n = 4$ ) y sedimentos del represo ( $n = 2$ ) se cuantificaron las concentraciones totales EM utilizando la técnica de fluorescencia de rayos X. Los EM ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

De los elementos mayores que se analizan, el Al, Fe y Mn están dentro de la lista de los elementos que sistemáticamente han venido analizando en la cuenca del río Sonora por mandato de la CONAGUA y COFEPRIS.,

Para determinar la concentración total de los elemento traza (elementos potencialmente tóxicos de interés) en las muestras sólidas (terreros y sedimentos del represo), éstas se molieron y pulverizaron hasta obtener una granulometría inferior a la malla 200 y fueron digeridas con ácido nítrico concentrado en horno de microondas siguiendo el procedimiento general descrito en el método 3051 de la US-EPA (1994).

Así mismo, las muestras líquidas fueron digeridas utilizando el mismo método de la US-EPS (1994).

Tanto en las muestras sólidas como líquidas se cuantificaron las concentraciones totales de los elementos químicos que sistemáticamente se han venido analizando por mandato de la CONAGUA y COFEPRIS: aluminio (Al), antimonio (Sb), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), y zinc (Zn).

Los análisis de las concentraciones totales en todas las muestras se realizaron por Espectroscopia de Emisión Atómica Inductivamente Acoplada a Plasma (ICP-AES). La calidad de los resultados de los análisis químicos se controló a través de análisis de muestras duplicadas (precisión del método) y análisis del material de



referencia para jales mineros RTS-3 "Canadian Certified Reference Materials" (exactitud del método). Los análisis de las muestras duplicadas indicaron que el error de la reproducibilidad varía entre 3 y 8 %, mientras que el porcentaje de error entre las concentraciones reportadas del material de referencia y las determinadas en este estudio varía entre 8 y 10%, que son analíticamente aceptables.

Finalmente, la identificación de las fases sólidas en muestras seleccionadas de terreros (n = 3) y de los sedimentos del represo (n = 2) se realizó utilizando la técnica de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido acoplada con espectrometría de Rayos X por energía dispersa (MEB-EDS).

Clave mapa	Observación	Matriz
1	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Roca
2	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Roca
3	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Roca
4	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Roca
5	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Roca
6	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Roca
7	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Roca
8	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Roca
9	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Sedimento
10	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Sedimento
11	Depósito de Terreros Cananea (Tinajas)	Sedimento
12	Sedimento del represo Tinajas	Sedimento
13	Material precipitado del represo Tinaja	Sedimento
14	Material precipitado del represo Tinaja	Sedimento

**Tabla 2.3 Lista de muestras sólidas colectadas en el depósito de terreros Tinaja y en el represo Tinajas 1**

Clave mapa	Observación	Matriz	pH	CE mS/cm
10	Lixiviado del represo Tinaja	Líquida	2.25	5.91
11	Lixiviado del represo Tinaja	Líquida	2.19	5.65

**Tabla 2.4 Lista de muestras líquidas colectadas en el depósito de terreros Tinaja y en el represo Tinajas 1**

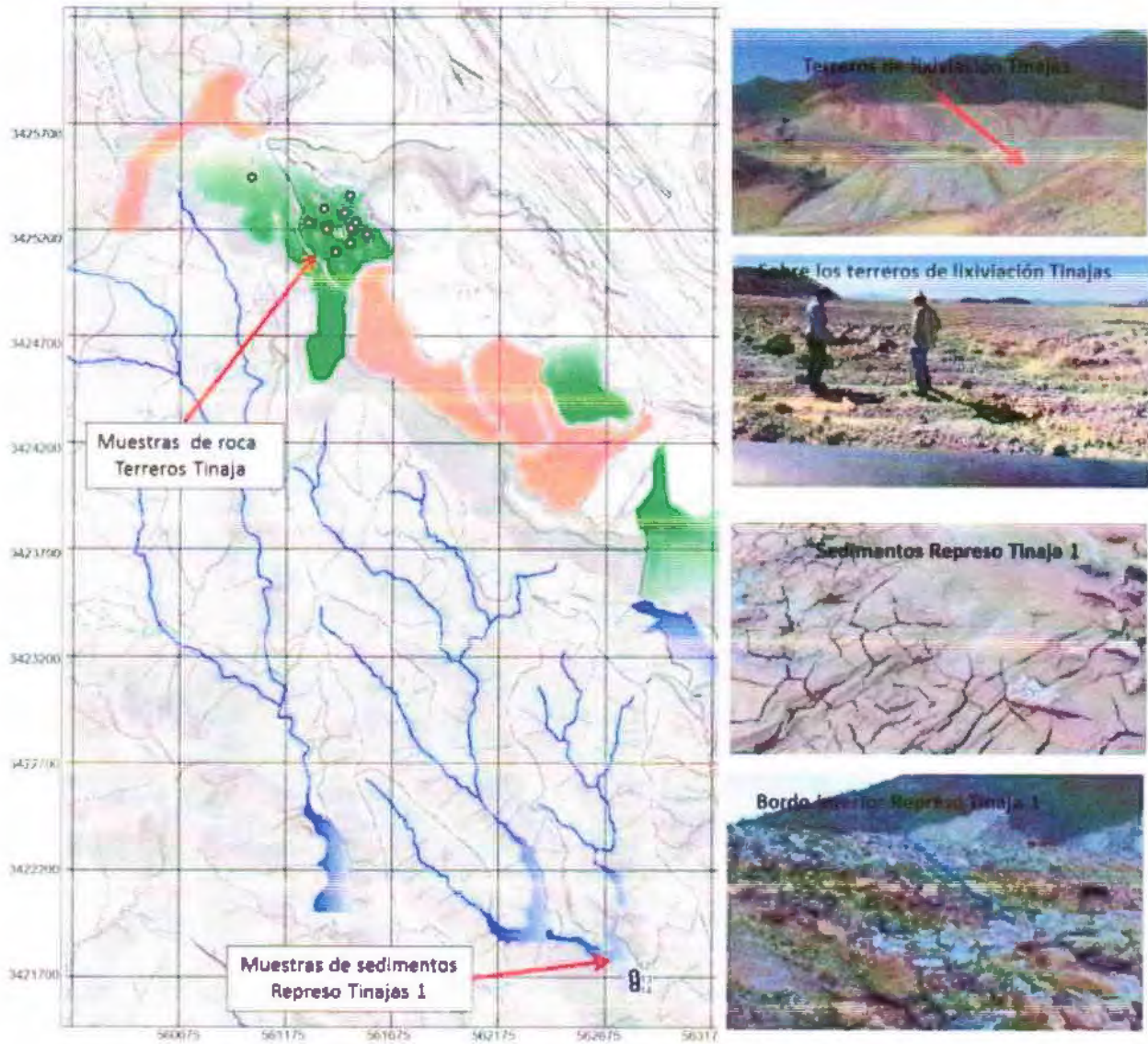
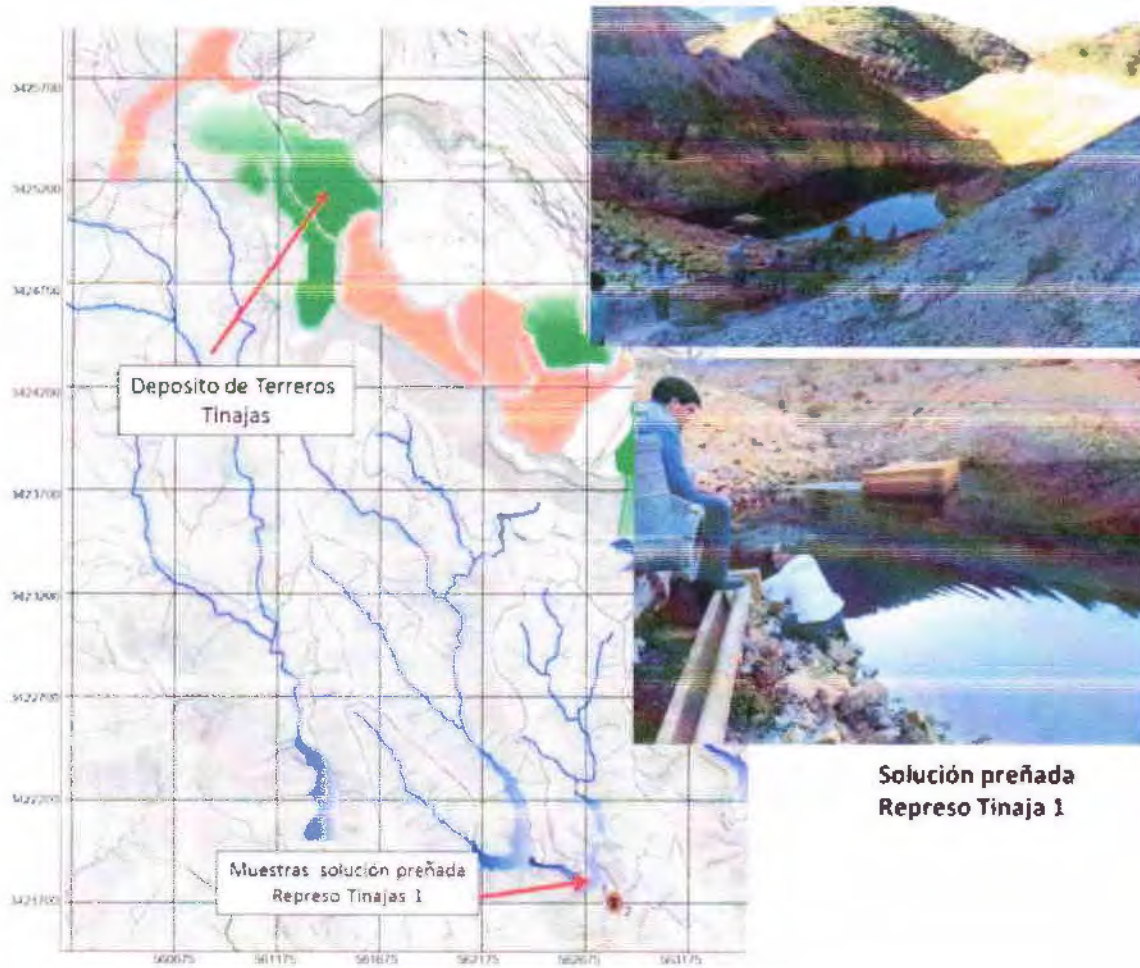


Figura 2.2 Ubicación de muestras de terreros y sedimentos del represo Tinajas 1



**Figura 2.3 Ubicación de muestras de la solución preñada en el represo Tinajas 1**





## 2.2.2 Resultados y discusión

### A) Muestras sólidas: terreros y sedimentos del represo Tinajas 1

#### A.1) Mineralogía

La composición mineralógica determinada por DRX se pueden observar en la Tabla 2.5. Estos resultados indican que los minerales predominantes en los terreros son cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), moscovita  $((\text{K,Ca,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH}))$ , plagioclasas  $((\text{CaNa})(\text{SiAl})_4\text{O}_8)$  y trazas de filosilicatos, que son los minerales propios de las rocas de la región. El único sulfuro metálico identificado es la pirita ( $\text{FeS}_2$ ).

En los sedimentos del fondo del represo, además de los minerales identificados en los terreros se identificó al mineral secundario de Fe denominado jarosita  $(\text{XFe}(\text{SO}_4)(\text{OH}))_2$  que ha sido reportado como uno de los minerales más importantes en la retención de elementos potencialmente tóxicos como As, Pb, Cd, Cu, Zn, etc. (McGregor et al. 1998, Bain et al. 2000; Romero et al., 2007). 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. (Figura 2.4); lo que es una evidencia del control de la liberación y movilidad de los contaminantes en las fases sólidas del medio estudiado.

#### A.2) Composición química

##### A.2.1) Elementos mayores

La composición química (elementos mayores) de los terreros y sedimentos del represo, en términos de valores promedio, está dominada en orden descendente



por silicio (56.23% como  $\text{SiO}_2$ ), aluminio (17.30% como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Fe (5.80% como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), K (5.37% como  $\text{K}_2\text{O}$ ), S (4.71% como  $\text{SO}_3$ ) y Mg (1.49% como  $\text{MgO}$ ). Los otros elementos mayores están en concentraciones relativamente bajas (Tabla 2.6).

Clave mapa	Clave Lab	Mineralogía por DRX
<b>Terreros</b>		
4	M4	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
		Mica tipo Moscovita: $(\text{K,Ca,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})$
		Trazas de plagioclasa intermedia: $(\text{CaNa})(\text{SiAl})_4\text{O}_8$
		Pirita: $\text{FeS}_2$
		Filosilicatos a $\sim 10\text{\AA}$ (mica) y $\sim 7\text{\AA}$
5	M5	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
		Mica tipo Moscovita: $(\text{K,Ca,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})$
		Trazas de plagioclasa intermedia: $(\text{CaNa})(\text{SiAl})_4\text{O}_8$
		Filosilicatos a $\sim 14\text{\AA}$ $\sim 10\text{\AA}$ (mica) y $\sim 7\text{\AA}$
6	M6	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
		Mica tipo Moscovita: $(\text{K,Ca,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})$
		Trazas de plagioclasa intermedia: $(\text{CaNa})(\text{SiAl})_4\text{O}_8$
		Pirita: $\text{FeS}_2$
		Filosilicatos a $\sim 14\text{\AA}$ $\sim 10\text{\AA}$ y $\sim 7\text{\AA}$
<b>Sedimentos fondo del repeso</b>		
13	M13	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
		Mica tipo Moscovita: $(\text{K,Ca,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})$
		Jarosita: $\text{XFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
		Pirita: $\text{FeS}_2$
		Trazas de Plagioclasa Intermedia: $(\text{CaNa})(\text{SiAl})_4\text{O}_8$
		Filosilicatos a $\sim 14\text{\AA}$ $\sim 10\text{\AA}$ y $\sim 7\text{\AA}$
14	M14	Cuarzo: $\text{SiO}_2$
		Plagioclasa Intermedia: $(\text{CaNa})(\text{SiAl})_4\text{O}_8$
		Trazas de Feldespato potásico
		Filosilicatos a $\sim 14\text{\AA}$ $\sim 10\text{\AA}$ y $\sim 7\text{\AA}$

Tabla 2.5 Composición mineralógica de muestras de terreros y sedimentos del repeso



Clave	Clave	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PXC
Mapa	Lab	%											
<b>Terreros</b>													
2	M2	0.18	1.08	13.90	62.70	0.20	5.54	4.76	0.64	0.50	0.04	5.41	4.78
4	M4	0.39	4.24	17.80	50.10	0.29	4.65	5.29	1.07	0.93	0.19	7.78	6.87
5	M5	0.11	0.77	18.02	54.20	0.25	5.57	6.14	0.26	0.81	0.04	6.02	7.60
6	M6	0.19	1.21	18.60	55.00	0.26	5.66	5.90	0.31	0.74	0.18	4.75	6.71
<b>Sedimentos fondo del Represo</b>													
13	M13	0.07	1.08	18.20	48.60	0.33	6.16	4.30	0.39	0.97	0.51	8.08	11.10
14	M14	1.21	0.57	17.30	66.80	0.07	0.67	5.80	0.14	0.19	0.07	2.75	3.95

Tabla 2.6 Concentración total de elementos mayores de terreros y sedimentos del represo

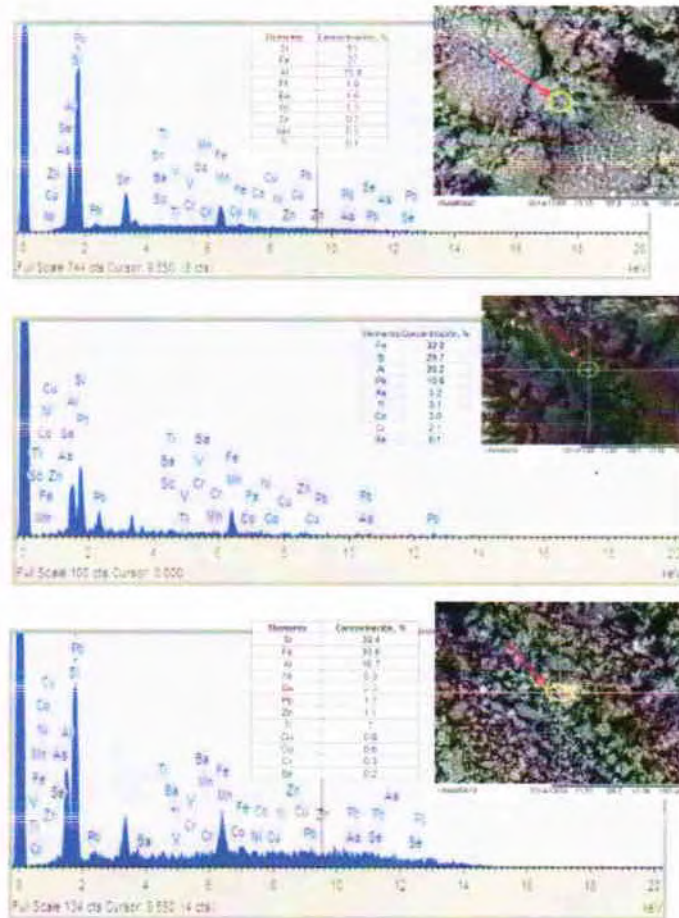


Figura 2.4 Imagen y microanálisis MEB-EDS en muestras de sedimentos del represo



### A.2.2) Elementos traza

La composición química (elementos traza) de los terreros y sedimentos del fondo del represo se presentan en a Tabla 2.7. Estos resultados indican que los terreros se caracterizan por las relativamente bajas concentraciones de Sb, Hg, Cd, Ni, Cr, Pb, Ba y As que son inferiores a las concentraciones permisibles en terreros de acuerdo a la NOM-159 (Tabla 2.8). Las concentraciones de Ba, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb también son inferiores a las concentraciones permisibles en suelos de acuerdo a la NOM-147 (Tabla 2.9) por lo que se puede concluir que la presencia de estos metales no representa un riesgo para el ambiente y salud humana.

Clave mapa	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn	Hg	Fe
	mg/Kg											%
<b>Terreros</b>												
1	23.5	29.2	<LOD	<LOD	487.6	291.3	<LOD	<LOD	<LOD	178.4	0.10	3.3
2	36.0	15.1	12.2	<LOD	1267.7	3591.9	6.4	39.8	<LOD	671.9	0.06	3.5
3	27.5	115.0	<LOD	85.1	821.4	1304.8	65.4	3.0	<LOD	335.8	0.05	4.0
4	101.2	136.4	<LOD	<LOD	571.2	201.6	<LOD	28.3	<LOD	1263.8	0.07	3.3
5	17.9	62.7	<LOD	<LOD	1033.3	1695.8	<LOD	10.5	<LOD	544.4	0.03	2.7
6	34.1	38.5	<LOD	<LOD	3308.1	146.1	<LOD	<LOD	<LOD	115.4	0.15	2.7
7	14.0	28.0	<LOD	37.3	201.1	480.3	10.5	75.9	<LOD	177.7	0.07	2.3
8	13.6	35.6	<LOD	<LOD	2972.7	123.9	<LOD	<LOD	<LOD	68.2	0.05	2.0
9	101.0	0.6	11.0	2.9	330.6	228.2	13.5	1.5	<LOD	306.1	<LOD	1.1
10	97.2	0.7	11.9	3.2	345.4	235.3	14.1	1.6	<LOD	318.4	<LOD	1.1
11	66.9	26.9	<LOD	8.5	451.2	589.1	9.7	18.9	<LOD	466.2	0.04	2.5
<b>Mínimo</b>	<b>13.6</b>	<b>0.6</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>201.1</b>	<b>123.9</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>68.2</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>1.1</b>
<b>Máximo</b>	<b>101.2</b>	<b>136.4</b>	<b>12.2</b>	<b>85.1</b>	<b>3308.1</b>	<b>3591.9</b>	<b>65.4</b>	<b>75.9</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>1263.8</b>	<b>0.15</b>	<b>4.0</b>
<b>Media</b>	<b>48.4</b>	<b>44.4</b>	<b>3.2</b>	<b>12.5</b>	<b>1071.8</b>	<b>808.0</b>	<b>10.9</b>	<b>18.3</b>	<b>&lt;LOD</b>	<b>404.2</b>	<b>0.1</b>	<b>2.6</b>
<b>Sedimentos del Represo</b>												
12	58.6	117.8	<LOD	16.9	672.6	705.6	10.4	78.4	<LOD	202.4	<LOD	3.4
13	101.5	55.9	6.5	6.0	894.7	4456.5	17.1	50.7	4.4	314.2	0.1	4.2
14	57.5	60.1	<LOD	<LOD	376.6	528.8	<LOD	211.4	<LOD	340.3	0.0	1.9
<b>LD</b>	<b>0.07</b>	<b>0.1</b>	<b>0.02</b>	<b>0.003</b>	<b>0.122</b>	<b>0.007</b>	<b>0.01</b>	<b>0.03</b>	<b>0.05</b>	<b>0.007</b>	<b>0.0005</b>	<b>1.00E-06</b>

LD = Límite de detección

Nota: La composición química de los terreros nuevos (sin lixiviar): muestra 1, son similares a la de los terreros que pasaron el proceso de lixiviación: muestras 2, 3, 4, 5...11)

**Tabla 2.7 Concentración total de los elementos traza (potencialmente tóxicos) en muestras de terreros y sedimentos del represo**



Contaminante	LMP (mg/Kg) Base seca
Antimonio	10.6
Arsénico	100
Bario	2000
Berilio	24.4
Cadmio	20
Cromo	100
Mercurio	4
Plata	100
Plomo	100
Selenio	20

**Tabla 2.8 Concentración total de los elementos potencialmente tóxicos que pueden indicar peligrosidad en terreros de lixiviación de cobre (Fuente: NOM-159-SEMARNAT-2011<sup>17</sup>)**

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

**Tabla 2.9 Concentraciones de Referencia Totales de elementos potencialmente tóxicos por tipo de uso de suelo (NOM-147- SEMARNAT-2004<sup>18</sup>).**

<sup>17</sup> NORMA Oficial Mexicana NOM-159-SEMARNAT-2011, Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.

<sup>18</sup> NQRMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio



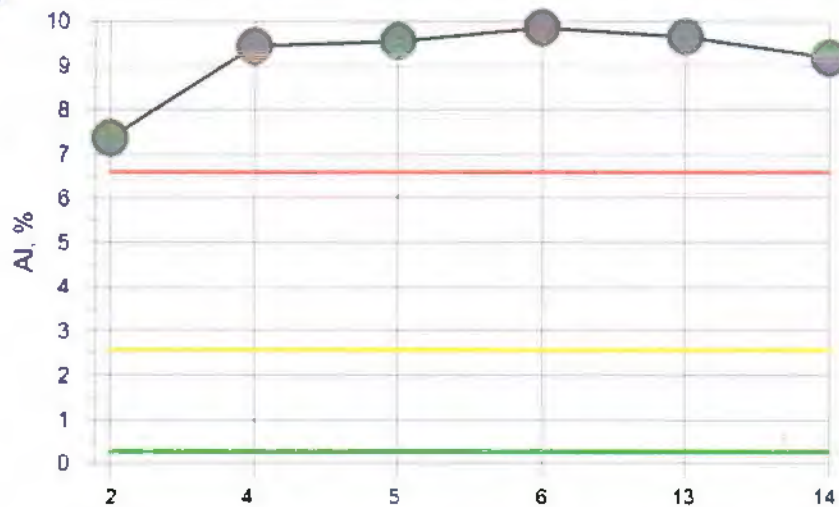
Con excepción del Al, las concentraciones de estos metales en terreros y sedimentos del represo se encuentran entre las concentraciones mínimas y máximas reportadas en los sedimentos de los ríos y arroyos principales y secundarios de la cuenca del río Sonora (ver sección 1.3 de este informe) y que se pueden observar nuevamente presentar en la Tabla 2.10.

El comportamiento de las concentraciones totales del Al, Fe, Mn y Zn en terreros y sedimentos de represo y su comparación con los valores reportados por el SGM se puede apreciar en las Figuras 2.3 y 2.4.

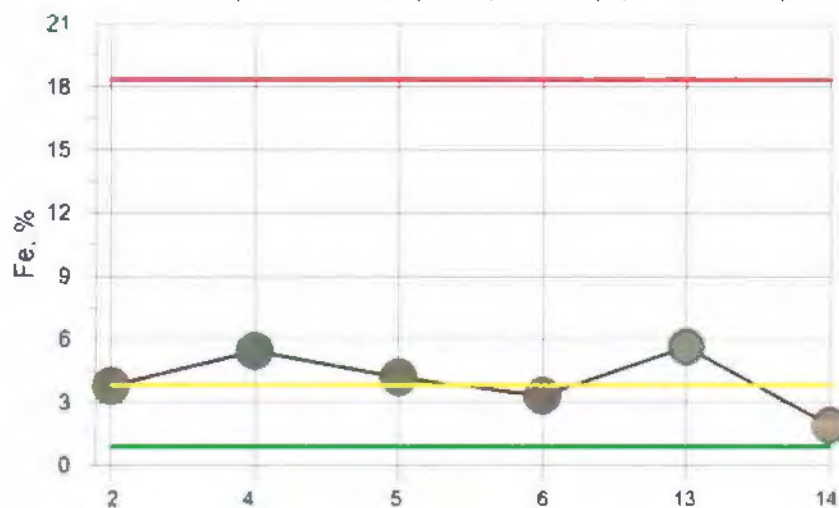
Elemento	Media	Mínimo	Máximo
Al (%)	2.56	0.26	6.58
Fe (%)	3.826	0.89	18.33
Cu (ppm)	54.114	1	6471
Mn (ppm)	705.21	46	5319
Zn (ppm)	101.8	13	3502

Nota: Estos datos corresponden al análisis geoquímico de 1,682 muestras de sedimentos de arroyo realizados por el SGM (1993 – 2005) dentro de sub-cuenca del Río Sonora (Alto Río Sonora)

**Tabla 2.10 Concentraciones de algunos metales en muestras de sedimentos de los arroyos de la cuenca del río Sonora (SGM, 1993 – 2005)**



Terreros y sedimentos represado (clave mapa, ver Tabla 2.5)

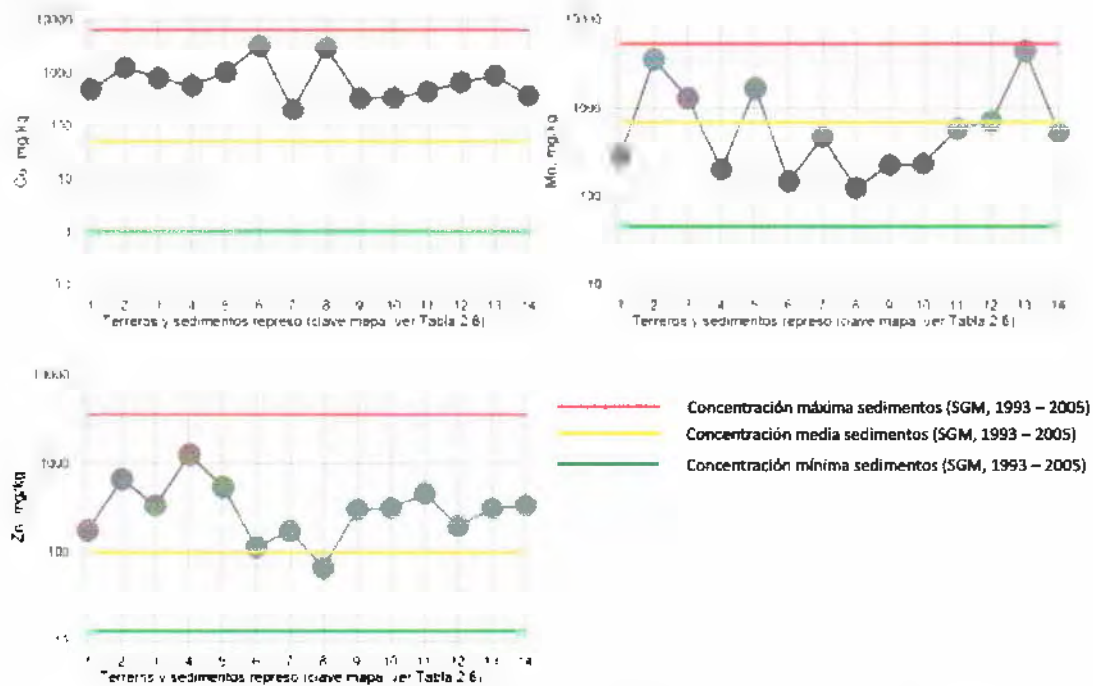


Terreros y sedimentos represado (clave mapa, ver Tabla 2.5)

- Concentración máxima sedimentos (SGM, 1993 – 2005)
- Concentración media sedimentos (SGM, 1993 – 2005)
- Concentración mínima sedimentos (SGM, 1993 – 2005)

Nota: Para homogenizar, y poder hacer la comparación, las concentraciones de terreros y sedimentos de represado reportada por la FRX ( $Al_2O_3$  y  $Fe_2O_3$ ) con las reportadas por el SGM (Al y Fe), fue necesario hacer la conversión respectiva.

Figura 2.3 Comportamiento de las concentraciones de Al y Fe en los terreros y sedimentos del represado y su comparación con los valores reportados por el SGM en los sedimentos de arroyo realizados por el SGM (1993 – 2005) dentro de sub-cuenca del Río Sonora (Alto Río Sonora)



**Figura 2.4 Comportamiento de las concentraciones de Cu, Mn y Zn en los terreros y sedimentos del represo y su comparación con los valores reportados por el SGM en los sedimentos de arroyo realizados por el SGM (1993 – 2005) dentro de sub-cuenca del Río Sonora (Alto Río Sonora)**

**B) Muestras líquidas: lixiviados acumulados en la superficie del depósito de terreros y solución preñada del represo Tinajas 1**

**B.1 Valores de pH y conductividad eléctrica**

Los valores de pH y conductividad eléctrica (CE) fueron medidos en campo se presentan en la Tabla 2.11.





El pH de la solución preñada acumulada en el represo Tinajas 1 varía entre 2.19 y 2.25. En el caso de la CE, los valores varían entre 5.91 – 5.65 mS/cm, que indica la presencia de iones metálicos disueltos..

### B.1 Composición química

La composición química de la solución preñada del represo Tinajas 1, se presenta en la Tabla 2.11.

Clave mapa	pH	CE	Al	As	Ba	Cd	Cu	Cr
			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1	2.25	5.91	393	0.85	<LD	1.01	321	0.25
2	2.19	5.65	499	0.62	<LD	0.98	266	0.22
		LD	0.08	0.07	0.1	0.02	0.122	0.003

Clave mapa	Fe	Mn	Hg	Ni	Pb	Sb	Zn
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1	518	163.5	<LD	1.94	0.36	<LD	72
2	458	149.5	<LD	1.80	0.21	0.013	54
	LD	0.01	0.007	0.0005	0.01	0	0.05

**Tabla 2.11 Valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentración total de los elementos traza (potencialmente tóxicos)<sup>19</sup> en muestras de la solución preñada del represo Tinajas 1 (solución preñada)**

Las concentraciones obtenidas en la solución preñada del represo Tinajas 1 y muestreada por el grupo de la UNAM corroboran los datos obtenidos por la CONAGUA (ver sección 2.1.3 de este informe) en el sentido de la ausencia de mercurio (Hg), bario (Ba) y antimonio (Sb) en la solución preñada del represo que se derramó e impactó los cuerpos de agua de la cuenca del río Sonora; lo que implica que estos tres elementos potencialmente tóxicos no deben haber afectado la calidad de los cuerpos de aguas de la mencionada cuenca.

<sup>19</sup> Estos son los elementos que sistemáticamente se han analizado en los cuerpos de agua de la cuenca del río Sonora por mandato de CONAGUA Y COFEPRIS



Sin embargo, como se puede observar en la Tabla 2.12, las concentraciones de aluminio (Al), arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), hierro (Fe), níquel (Ni) y Pb (Pb) son inferiores en las muestras tomadas por el grupo de la UNAM; pero al contrario, las concentraciones de cobre (Cu), manganeso (Mn) y zinc (Zn) son superiores.

Institución Fecha muestreo	UNAM			Conagua
	02/10/2104			08/08/2014
Muestra	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	<0.1	<0.1	<0.1	< 0.5
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	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005
Ni, mg/L	1.94	1.80	1.87	11
Pb, mg/L	0.36	0.21	0.28	2.5
Sb, mg/L	0.05	0.013	0.031	<0.5
Zn, mg/L	72	54	63	51

**Tabla 2.12 Comparación de las concentraciones totales reportadas por la CONAGU (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**

Considerando que las muestras del grupo de la UNAM se tomaron el 02 de octubre de 2014 y las de CONAGUA se tomaron el 08 de agosto de 2014, a escasos 2 días de ocurrido el derrame, podemos considerar los datos reportados por la CONAGUA como más representativos de la composición química de la solución que se derramó a los cuerpos de agua de la cuenca del río Sonora.



La afirmación anterior se fundamenta en el hecho de que entre el 06 de agosto del 2014 (día que ocurrió el derrame) y la toma de muestra por la CONAGUA (08 de agosto, 2014) prácticamente no llovió sobre el represo Tinajas (Tabla 2.13), por lo que podemos asumir que no hubo dilución.

En cambio entre el 08 de agosto y el 02 de octubre ocurrieron los eventos meteorológicos como el huracán Norberto (2 al 10 de septiembre de 2014) y huracán Odile (11 al 26 de septiembre de 2014), que provocaron lluvias extraordinarias (ver sección 1.2 de este informe); por lo que cambiaron las condiciones físicas en el represo Tinajas, que además de haber provocado la dilución, pudo haber provocado una serie de reacciones (precipitación/disolución y sorción/desorción) que hizo que cambiara la composición química de la solución preñada del represo Tinajas 1.

Month	Day	Fecha	mm/día	Observaciones
7	27	27/07/2014	5.47	
7	28	28/07/2014	0.35	
7	29	29/07/2014	1.69	
7	30	30/07/2014	1.48	
7	31	31/07/2014	8.92	
8	1	01/08/2014	5.84	
8	2	02/08/2014	10.68	
8	3	03/08/2014	0.19	
8	4	04/08/2014	0.00	
8	5	05/08/2014	0.00	
8	6	06/08/2014	7.46	Fecha de ocurrencia del derrame
8	7	07/08/2014	0.01	
8	8	08/08/2014	2.04	Fecha de la toma de muestra por CONAGUA
8	9	09/08/2014	9.87	
8	10	10/08/2014	0.25	

Nota: estos datos de lluvia sobre el represo "Tinajas 1" se extrajeron del Sistema de Asimilación de Datos Terrestres de Norte América (North American Land Data Assimilation System, NLDAS por sus siglas en inglés).

**Tabla 2.13 Precipitaciones (lluvias) sobre el represo Tinajas 1 en las fechas de ocurrencia del derrame y fecha de muestreo de la solución preñada por CONAGUA**



### **C) Elementos potencialmente tóxicos directamente asociados al derrame de la solución preñada del represo Tinajas 1**

Si se comparan las concentraciones totales que están en la solución preñada y que se derramó hacia los arroyos de la cuenca del río Sonora con los límites permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto del procedimiento de extracción de terreros de lixiviación de cobre señalados en la NOM-159-SEMARNAT-2011<sup>20</sup>, y los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996<sup>21</sup> (Tabla 2.14) se puede concluir que los elementos potencialmente tóxicos que pueden representar un peligro para el ambiente asociados al derrame son: As, Cd, Ni, Pb y Zn.

Así mismos, se concluye que el Al, Fe y Mn, dadas las relativamente altas concentraciones también se considera que representar un peligro para el ambiente, aunque no estén regulados en la normativa ambiental mexicana.

Con base en la concentración de los elementos potencialmente tóxicos asociados al derrame que pueden representar un peligro para el ambiente; así como en el volumen derramado de 40,000 m<sup>3</sup>, se estima que la carga contaminante vertida a los arroyos de la cuenca del río Sonora es en orden descendente: 43200 kg de Fe, 19,440 kg de Al, 4560 kg de Cu, 3924 kg de Mn, 204 kg de Zn, 1,708 kg de As, 440 kg de Ni, 310 kg de Cd, 100 kg de Pb y 62 kg de Cr.

---

<sup>20</sup> NORMA Oficial Mexicana NOM-159-SEMARNAT-2011, Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.

<sup>21</sup> Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales



Concentración de EPT en La solución derramada del represo Tinaja 1		LMP	LMP (NOM-001)					
		NOM-159	Descarga en ríos					
			Uso riego agrícola		Uso público urbano		Protección vida acuática	
			P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Al, mg/L	<b>461</b>	ND	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
As, mg/L	<b>42.7</b>	5.0	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2
Ba, mg/L	< 0.5	100	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cd, mg/L	<b>7.76</b>	1.0	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2
Cu, mg/L	<b>114</b>	ND	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
Cr, mg/L	<b>1.54</b>	5.0	1.0	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0
Fe, mg/L	<b>1080</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mn, mg/L	<b>98.1</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Hg, mg/L	< 0.0005	0.2	0.0	9.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ni, mg/L	<b>11</b>	ND	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0
Pb, mg/L	<b>2.5</b>	5.0	0.5	1.0	0.2	0.4	0.2	0.4
Sb, mg/L	<0.5	0.53	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Zn, mg/L	<b>51</b>	ND	10.0	20.0	10.0	20.0	10.0	20.0

ND: No hay datos; PD = promedio diario; PM = promedio mensual

**Tabla 2.14 Comparación de las concentraciones totales de elementos potencialmente tóxicos en la solución preñada derramada del represo Tinajas 1 con los límites máximos permisibles de la NOM-159 y NOM-001**

Concentración de EPT en la solución derramada del represo Tinaja 1		Carga contaminante (kg)
Al, mg/L	461	18440
As, mg/L	42.7	1708
Ba, mg/L	< 0.5	0
Cd, mg/L	7.76	310
Cu, mg/L	114	4560
Cr, mg/L	1.54	62
Fe, mg/L	1080	43200
Mn, mg/L	98.1	3924
Hg, mg/L	<0.0005	0
Ni, mg/L	11	440
Pb, mg/L	2.5	100
Sb, mg/L	<0.5	0
Zn, mg/L	51	2040

**Tabla 2.15 Carga contaminante de metales pesados vertidos a los arroyos de la cuenca del río Sonora a partir del derrame de 40,000 m<sup>3</sup> de solución preñada (solución ácida ferro-cuprífera) del represo tinajas 1**



**C) Patrón de elementos de tierra rara de los lixivios derramados que pueden servir como indicadores para seguir el rastro de su impacto en el ambiente.**

Los elementos de tierras raras (ETR) es el nombre genérico de los elementos del grupo de los lantánidos: lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb) y lutecio (Lu)

Se caracterizan entre otras cosas por poseer radios iónicos y comportamientos químicos, muy similares entre sí, por lo que se han utilizado como huellas geoquímicas para identificar fuentes de contaminación.

Debido a los ETR se pueden fraccionar durante los procesos de intemperismo químico provocando cambios en su comportamiento (patrones), tanto en la fase sólida como en la líquida, sin que éstos se vea afectados por los procesos de dilución, se han utilizado con éxito como trazadores para identificar y seguir el rastro del impacto del drenaje ácido de minas a lo largo de cuerpos de aguas superficiales y sus respectivos sedimentos, en zonas mineras.

Considerando lo anterior se está explorando el uso de los patrones de tierras raras para poder identificar y seguir el rastro del impacto del derrame de los 40,000 m<sup>3</sup> de solución ácida ferro-cuprífera en los cuerpos de agua de la cuenca del río Sonora.

Se determinaron las concentraciones de los elementos de tierras raras en las siguientes muestras:

- Muestras del depósito de terrero de diferente granulometría (n = 5) cuya lixiviación generó la solución ácida ferro-cuprífera (solución preñada)



- Lixiviados en la superficie del depósito de terreros (n= 2). El pH de estos lixiviados es de 1.2 y 1.7 con valores de conductividad eléctrica d 333 y 39 mS/cm, lo que indica altas concentraciones de iones disueltos.
- Sedimentos acumulados en el represo Tinajas 1 (n =3).
- Solución ácida ferro-cuprífera almacenada en el represo Tinajas (n = 1) y que es representativa de la que se derramó el pasado 06 de agosto de 2014. El pH de estos lixiviedos es de 2.3 y una conductividad eléctrica de 5.67 mS/cm, lo que indica menores concentraciones de iones disueltos, si se compara con la de los lixiviados acumulados en la superficie del depósito de terreros.

Con el fin de obtener patrones de los elementos de tierras raras en las muestras de estudio, éstas fueron normalizadas utilizando el material de referencia conocido como NASC (North American Shale Composite).

Los resultados de los análisis y su normalización se presentan en la Tabla 2.16 y el comportamiento (patrón) se puede apreciar en la Figura 2.5.

Las gráficas presentadas en la Figura 2.5 indican:

El patrón de los ETR en los terreros muestra una ligera anomalía negativa de disprosio (Dy)

El patrón de los ETR de los sedimentos del represo Tinajas 1 presenta un anomalía fuerte y negativa de europio

El patrón de los ETR de los lixiviados (acumulados en el depósito de terreros, muestra 9 y 10) y los de la solución ácida ferro-cuprífera del represo Tinajas 1



(muestra 11) muestran una anomalía pronunciada y negativa de terbio (Tb) y una anomalía pronunciada y positiva de disprosio (Dy),

Es importante notar que el patrón de las tres muestras líquidas es idéntico con la diferencia de que los que están acumulados en la superficie de los terreros (Muestras 9 y 10) están más enriquecida en ETR, que los de la muestra del represo Tinajas 1 (muestra 11); lo que corresponde con los valores mayores de CE que indican mayor cantidad de iones disueltos en las muestras 9 y 10.

Estos resultados indican que el patrón de los ETR es característico de los lixiviados asociados a las fuentes de contaminación y que el fenómeno de dilución no parece afectarlos, por lo que podemos pensar que puede ser un buen trazador para seguir el rastro de la afectación de los cuerpos de aguas de la cuenca del río Sonora, afectados por el derrame de la solución ácido ferro-cuprífera que se almacenaba en el represo Tinajas 1.

Por otro lado el patrón característico de los sedimentos del represo (Figura 2.5 B) indica que podríamos seguir el rastro del material sólido que fluyó junto con la solución ácido ferro-cuprífera que se derramó.





Muestras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Concentración											
Elemento	mg/kg								mg/L		
La	25.0	17.1	14.0	25.6	19.9	33.3	34.4	54.7	2.00	1.83	0.82
Ce	49.8	38.0	34.5	46.8	42.8	59.2	72.1	104.0	9.18	8.41	1.94
Pr	5.6	4.6	4.0	6.0	5.1	7.2	7.4	12.5	0.97	0.90	0.19
Nd	20.5	16.8	14.8	21.2	18.6	24.0	25.8	45.3	4.83	4.45	0.71
Sm	4.4	3.1	3.2	4.0	3.8	4.2	5.0	8.4	1.73	1.58	0.17
Eu	1.1	0.8	0.8	1.1	0.8	0.8	0.3	1.7	0.52	0.47	0.03
Gd	4.8	2.8	3.2	3.9	3.9	3.6	4.7	7.6	1.95	1.79	0.17
Dy	5.6	2.8	3.6	4.0	3.4	3.0	4.5	6.0	0.38	0.35	0.02
Tb	0.8	0.4	0.5	0.6	0.6	0.5	0.7	1.0	2.49	2.34	0.13
Ho	1.1	0.6	0.8	0.8	0.6	0.6	1.0	1.1	0.52	0.49	0.02
Er	3.2	1.9	2.1	2.3	1.7	1.6	3.1	3.1	1.45	1.35	0.06
Tm	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.5	0.4	0.18	0.17	0.01
Yb	2.5	1.6	1.6	1.7	1.4	1.3	3.3	2.4	1.20	1.12	0.05
Lu	0.4	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.5	0.4	0.15	0.14	0.01

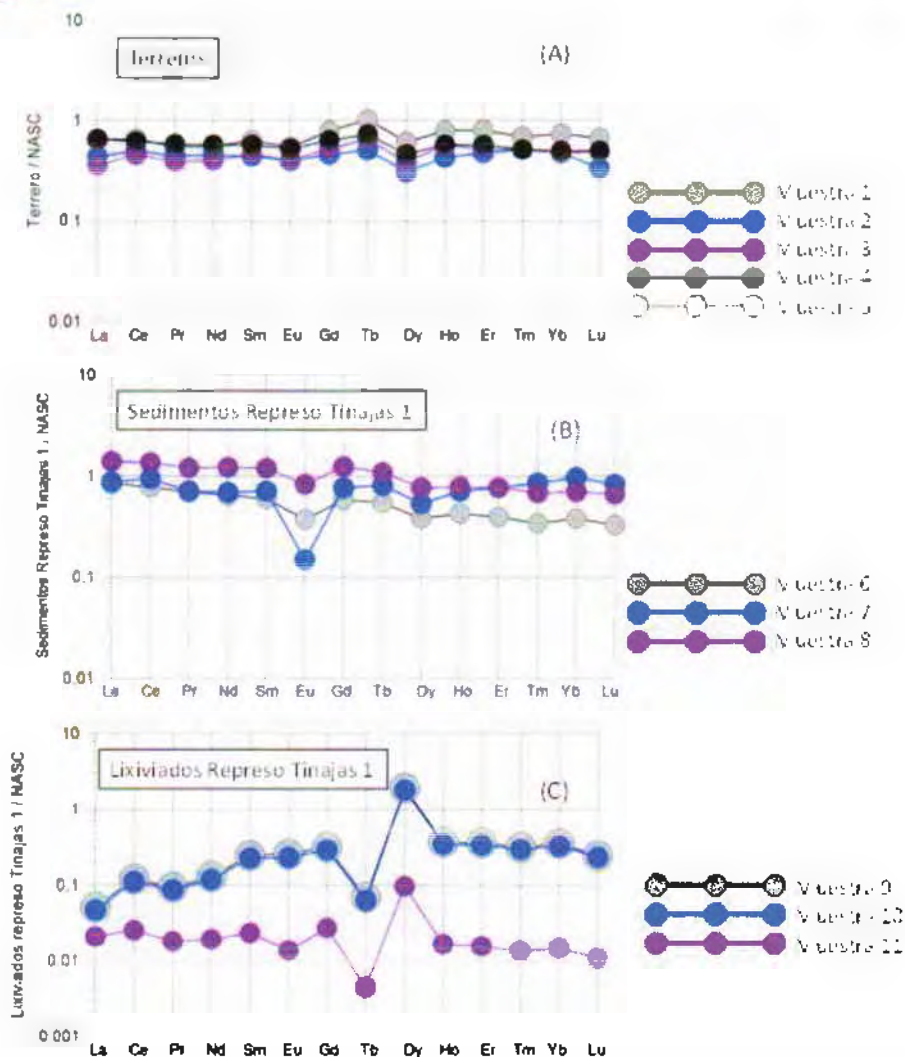
Normalización (\*)

La	0.641	0.882	0.359	0.438	0.510	0.854	0.656	1.403	0.051	0.047	0.0209
Ce	0.655	0.949	0.454	0.500	0.563	0.779	0.616	1.368	0.121	0.111	0.0255
Pr	0.544	0.718	0.388	0.447	0.495	0.699	0.583	1.214	0.094	0.087	0.0183
Nd	0.554	0.697	0.400	0.454	0.503	0.649	0.573	1.224	0.131	0.120	0.0193
Sm	0.629	0.714	0.457	0.443	0.543	0.600	0.571	1.200	0.247	0.226	0.0236
Eu	0.545	0.150	0.400	0.395	0.395	0.375	0.525	0.835	0.259	0.233	0.0137
Gd	0.787	0.770	0.525	0.459	0.639	0.590	0.639	1.246	0.320	0.293	0.0274
Dy	1.018	0.818	0.655	0.509	0.618	0.545	0.727	1.091	0.069	0.063	0.0044
Tb	0.615	0.538	0.385	0.308	0.462	0.385	0.462	0.769	1.915	1.800	0.0977
Ho	0.786	0.714	0.571	0.429	0.429	0.429	0.571	0.786	0.369	0.346	0.0166
Er	0.800	0.775	0.525	0.475	0.425	0.400	0.575	0.775	0.363	0.338	0.0157
Tm	0.690	0.862	0.517	0.517	0.345	0.345	0.517	0.690	0.317	0.298	0.0134
Yb	0.735	0.971	0.471	0.471	0.412	0.382	0.500	0.706	0.353	0.329	0.0147
Lu	0.667	0.833	0.500	0.333	0.333	0.333	0.500	0.667	0.245	0.232	0.0108

Concentración (mg/kg) de los ETR del material de Referencia NASH

La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Tb	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
39.00	76.00	10.30	37.00	7.00	2.00	6.10	5.50	1.30	1.40	4.00	0.58	3.40	0.60

Tabla 2.16 Concentración y normalización de los elementos de tierras rara en las muestras asociadas a la fuente de contaminación



NOTA para la figura (C): Muestras 9 y 10 = Lixiviados en la superficie del depósito de terreros. pH = 1.2 y 1.7 con valores de CE (conductividad eléctrica) de 33 y 39 mS/cm, lo que indica altas concentraciones de iones disueltos.

Muestra 11 = Solución ácida ferro-cuprífera almacenada en el represo Tinajas que es representativa de la que se derramó el pasado 06 de agosto de 2014. El pH de estos lixiviados es de 2.3 y la CE = 5.7 mS/cm, lo que indica menores concentraciones de iones disueltos, si se compara con la de los lixiviados acumulados en la superficie del depósito de terreros.

**Figura 2.5 Patrón de tierras raras en las diferentes muestras asociadas a la fuente de contaminación**



### **3. CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA**

#### **3.1 Agua superficial**

##### **3.1.1 Concentración total y disuelta de elementos potencialmente tóxicos**

###### **A) Muestreo y análisis**

Los datos analizados corresponden a muestreos realizados por CONAGUA, Consultores de Grupo México y Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis S.A. de C.V. Todos los análisis fueron realizados por Laboratorios ABC<sup>22</sup>.

Las muestras que se tomaron corresponden a tres periodos:

- a) 08 de agosto al 17 de agosto.

Muestreo espacialmente intermitente realizado a los pocos días de ocurrido el derrame. En todo este periodo se logró muestrear desde la parte alta de la cuenca (Zona de Bacanuchi) hasta la parte baja (presa El Molinito).

- b) 18 de agosto al 28 de septiembre

Muestreo diario sistemático desde la parte alta de la cuenca (Bacanuchi) hasta la parte baja (presa El Molinito).

- c) 30 de septiembre al 21 de octubre

Muestreo semanal sistemático desde la parte alta de la cuenca (Bacanuchi) hasta la parte baja (presa El Molinito).

En esto tres periodos de muestreo se colectaron aproximadamente 1100 muestras de aguas superficiales para determinar la concentración total de 13 metales: aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb) y zinc (Zn).

---

<sup>22</sup> Estos datos fueron proporcionados vía electrónica por la SEMARNAT, previa solicitud de los autores, el 11 de noviembre de 2014

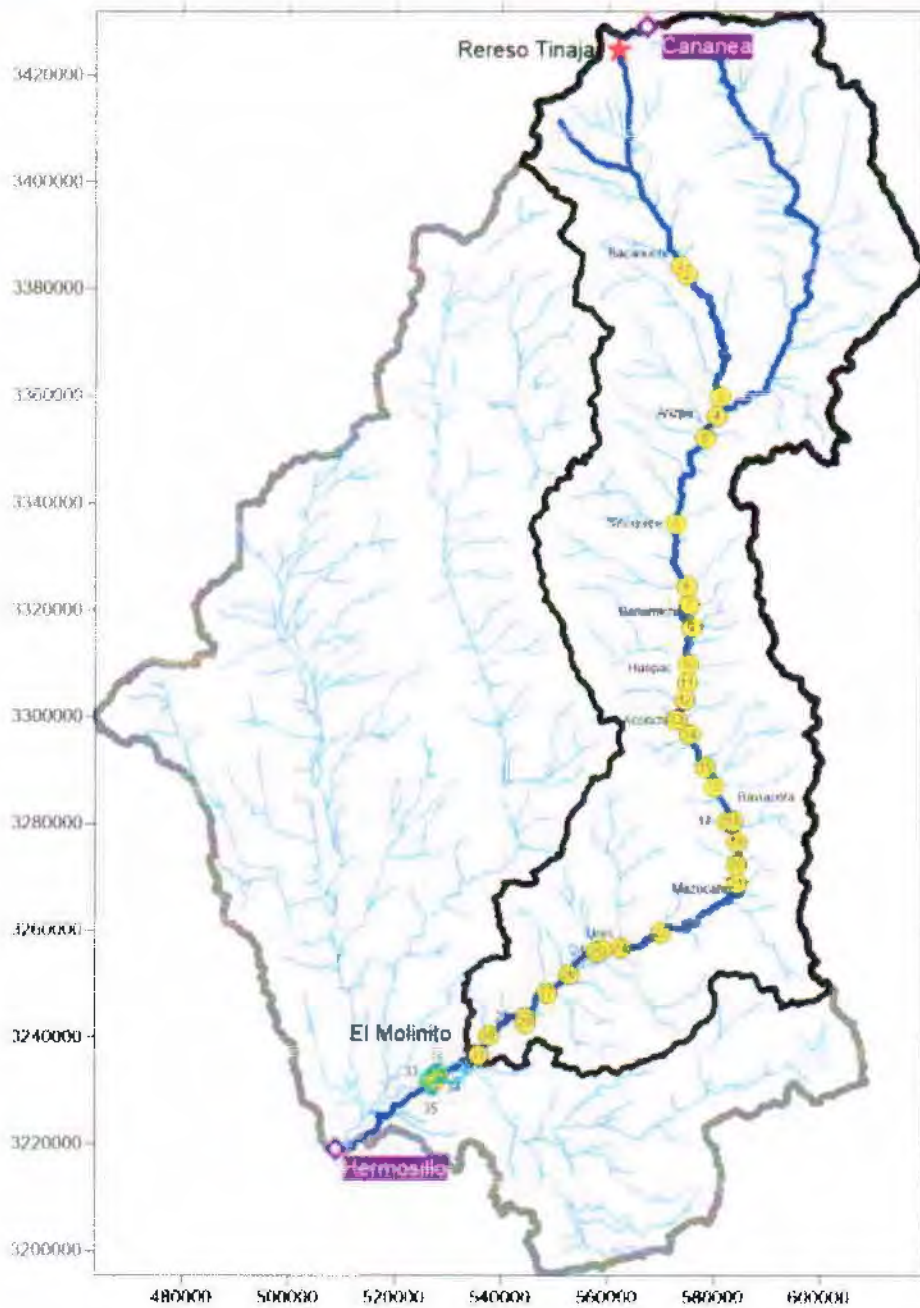


Las concentraciones totales incluyen las concentraciones de los contaminantes disueltos más las concentraciones de éstos en las partículas suspendidas. Para determinar las concentraciones totales, en el campo las muestras de aguas sin filtrar se preservan con ácido nítrico concentrado, con lo cual se disuelven los metales contenidos en el material particulado del agua del río.

Sin embargo, entre el 25/08/2014 y 30/09/2014 se colectaron muestras de aguas superficial que se filtraron en campo, previamente a la adición del ácido nítrico concentrado, con el fin de determinar la concentración de metales disueltos en aproximadamente 560 muestras. En estas muestras se determinaron las concentraciones disueltas de aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb) y zinc (Zn).

Por otro lado, 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 aguas de los ríos debido al derrame del represo Tinajas 1.

Los sitios para el muestreo fueron seleccionados por la CONAGUA y se presentan en la Figura 3.1. La descripción de los sitios muestreados y sus respectivas coordenadas se presentan en la Tabla 3.1.



**Figura 3.1 Ubicación de los sitios de muestreo de aguas superficiales en la cuenca del río Sonora para valorar la afectación del derrame de solución ácida ferro-cuprífera que se derramó el pasado 06 de agosto de 2014 del represo Tinajas 1 de Buena Vista del cobre, Cananea-Sonora**



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	TAHUICHOPA 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 TAJO 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	BAVIÁCORA 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 RÍO 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 GAVILÁN RIO SONORA	28
544510	3242600	MET-053	EL ORÉGANO 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

**Tabla 3.1** Coordenadas y descripción de los sitios seleccionados para el muestreo de agua superficial en la cuenca del río Sonora



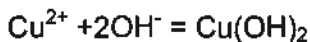
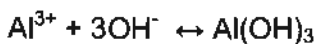
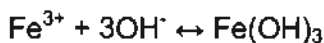
## B) Resultados

### B.1) Valores de pH

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) (Figura 3.2). Sin embargo, en la parte alta de la cuenca (Tinajas - Arizpe) y en la parte baja (Baviácora - El Molinito) se registraron valores de pH neutros y ligeramente básicos (pH = 5.9 y 8.4) (Figura 3.2).

Desde el 15 de agosto los valores de pH son neutros y ligeramente básicos, lo que indica, 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.

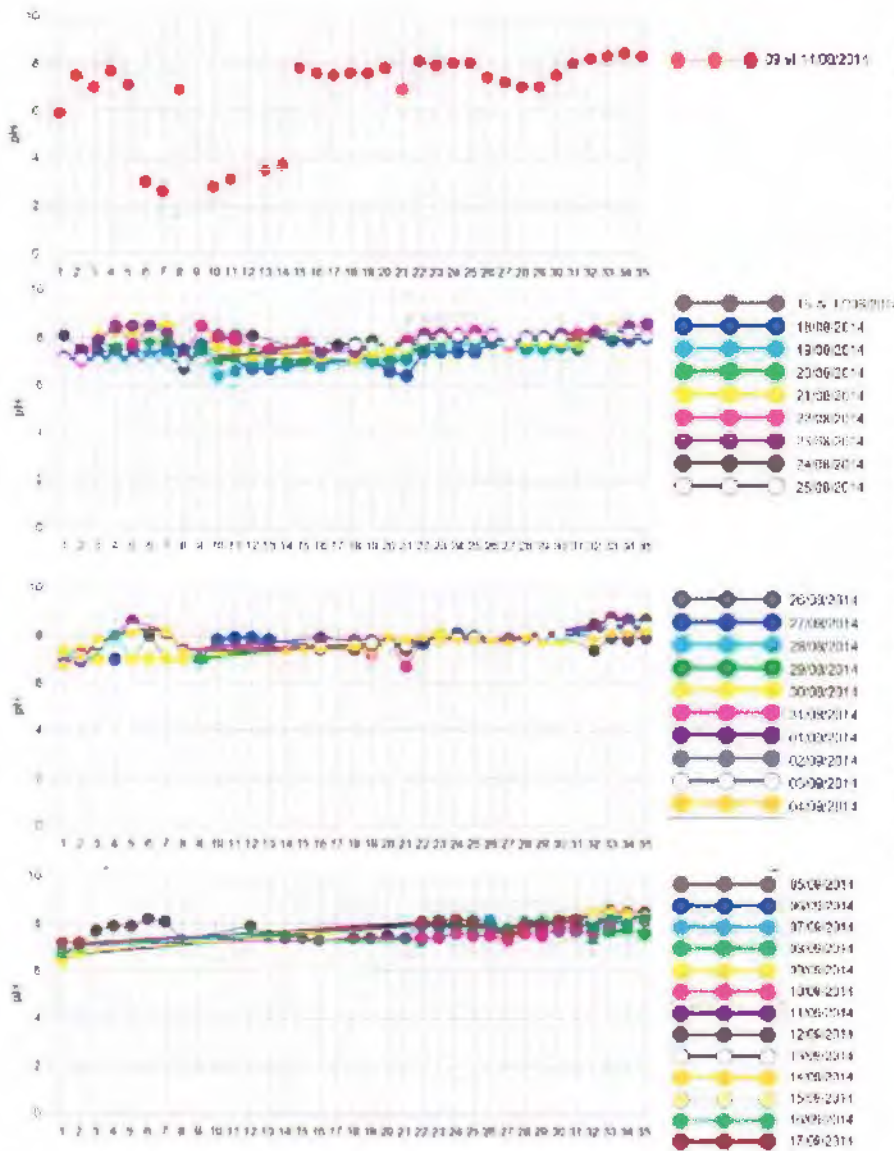
Bajo estos escenarios de acidez, la modelación geoquímica indica que los metales asociados al derrame debieron precipitar ((pasar de la fase líquida (agua del río) a la fase sólida (sedimentos)). A continuación las reacciones de los tres metales que más se liberaron (en forma iónica) durante el derrame (43,200 kg de Fe, 19,440 kg de Al, 4560 kg de Cu, ver sección 2.2C de este informe) que indican que su precipitación debió ocurrir bajo las condiciones de acidez (pH > 4) que se alcanzaron una semana después del derrame:



En el caso del Fe que es el metal que más abundantemente fue liberado durante el derrame la modelación geoquímica indica que en el intervalo de valores de pH entre 6 y 9 la cantidad de hierro disuelto (mg/L) debe variar entre  $1.0 \times 10^{-7}$  y  $1.0 \times 10^{-9}$ , lo que es congruente con lo reportado en la literatura especializada que



indica que la más baja solubilidad de Fe ocurre en le intervalo de pH entre 7 y 8 (Cornell and Schwertmann, 1996<sup>23</sup>, Romero et al., 2007<sup>24</sup>)



Orden	Clevo	Descripción
1	MET-002	BACANUCHI-EL MOLINO
2	MET-003	BACANUCHI-LA TRAMPA
3	MET-006	TAHUICHOPA RIO
4	MET-009	ARIZPE RIO SONORA
5	MET-012	BANAMORI RIO SONORA
6	MET-014	SINOQUIPE RIO SONORA
7	MET-015	BANAMICHÍ RIO SONORA
8	MET-018	EL TAJO DE BANAMICHÍ
9	MET-097	LAS DELICIAS RIO SONORA
10	MET-020	HUEPAC RIO SONORA
11	MET-022	RANCHITO DE HUEPAC RIO SONORA
12	MET-091	SAN FELIPE RIO SONORA
13	MET-024	ACONCHI RIO SONORA
14	MET-026	LA ESTANCIA RIO SONORA
15	MET-028	SAN JOSÉ DE BAVIACORA RIO SONORA
16	MET-030	BAVIACORA RIO SONORA
17	MET-040	LA CAPILLA RIO SONORA
18	MET-041	EL MOLINOTE RIO SONORA
19	MET-043	LA LABOR RIO SONORA
20	MET-042	LA AURORA RIO SONORA
21	MET-029	MAZOCANUI RIO SONORA
22	MET-030	PUERTA DEL SOL RIO SONORA
23	MET-033	SAN PEDRO DE URES RIO SONORA
24	MET-036	URES RIO SONORA
25	MET-038	SANTIAGO DE URES RIO SONORA
26	MET-044	COPE DE URES RIO SONORA
27	MET-045	SAN RAFAEL DE URES RIO SONORA
28	MET-054	EL GAVILÁN RIO SONORA
29	MET-053	EL ORÉGANO RIO SONORA
30	MET-047	SAN JOSÉ DE GRACIA RIO SONORA
31	MET-056	TOPAHUE RIO SONORA
32	MET-058	BOQUILLA OREGANO
33	MET-059	MOLINITO VASO 1
34	MET-060	MOLINITO VASO 2
35	MET-061	MOLINITO OBRA DE TOMA

Nota: La correspondencia de los números con los sitios muestreados (eje X) se puede apreciar en la Tabla 3.1

<sup>23</sup> Cornell, R., Schwertmann, U., 1996. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses. VCH Publisher, New York

<sup>24</sup> Romero FM, Armienta MA, González-Hernández G, (2007). Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, México. Applied Geochemistry, 22: 109-127





Figura 3.1 Comportamiento de los valores de pH en aguas superficiales de los cuerpos de aguas de la cuenca del río Sonora

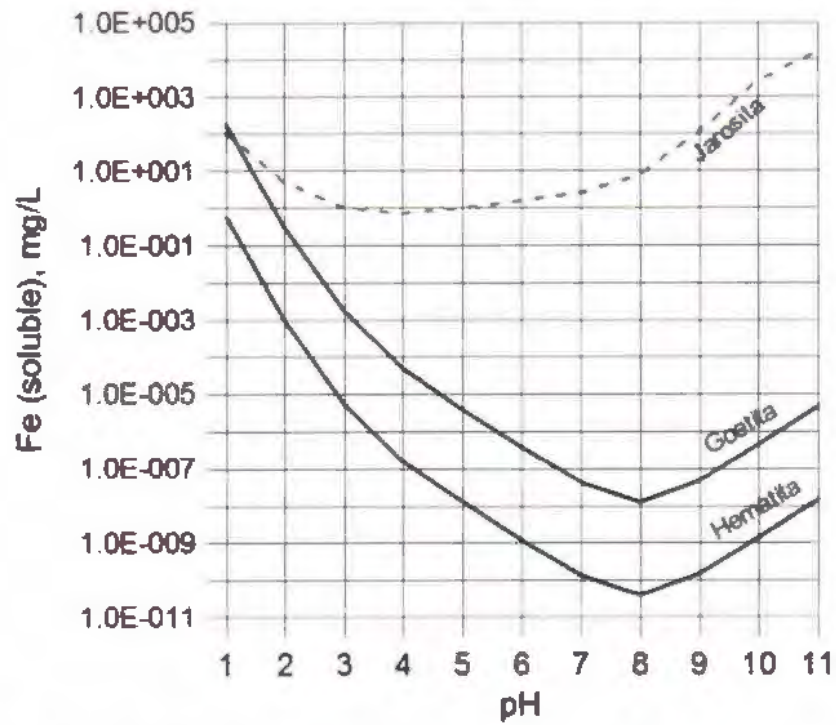


Figura 3.3 Solubilidad del hierro (Fe) en diferentes compuestos en función del pH



## **B.2) Concentración total y disuelta de los contaminantes directamente asociados al derrame**

### **B.2.1) Elementos traza<sup>25</sup>**

- **Antimonio (Sb), cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg)**

En general, las concentraciones totales y disueltas, en los cuerpos de agua superficiales de la cuenca del río Sonora, de los elementos traza como el Sb, Cd, Cr y Hg están por debajo de los límites permisibles para aguas de consumo humano (NOM-127 y OMS), lo que implica que estos contaminantes no representan un riesgo para a la salud de la población que pueda abastecerse de estos cuerpos de agua.

En el caso del antimonio (Sb) y mercurio (Hg) esto era de esperar ya que en la fuente de contaminación (solución derramada del represo tinajas 1, ver sección 2.2 C de este informe) no se detectaron estos elementos químicos.

Para el caso del cadmio (Cd) y del cromo (Cr), también es explicable ya que la solución que se derramó contenía relativamente bajas concentraciones de estos contaminantes (1.54 mg/L Cr y 7.76 mg/L Cd) (ver sección 2.2 C de este informe).

---

<sup>25</sup> Como ya se ha venido mencionando, de la lista de elementos químicos sistemáticamente han venido analizando en la cuenca del río Sonora, el Sb, As, Ba, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn se clasifican geoquímicamente como elemento traza, que son los que están presentes de manera natural en bajas concentraciones (< 0.1%) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos).



- **Arsénico (As), bario (Ba), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn)**

En general, las concentraciones totales y disueltas, en los cuerpos de agua superficiales de la cuenca del río Sonora, de los elementos traza como As, Ba, Cu, Ni, Pb y Zn han tenido un comportamiento particular, tanto espacial como temporalmente.

En el caso del As, Cu, Zn y Ni, las concentraciones determinadas (mg/L) en la fuente de contaminación fueron relativamente altas (42.5 mg/L As, 114 mg/L Cu, 51 mg/L Zn y 11 mg/L Ni); en cambio las concentraciones de Pb, en la fuente de contaminación, fueron relativamente bajas (2.5 mg/L) y el Ba no fue detectado (ver sección 2.2 C de este informe), lo que indica que la solución derramada no contenía prácticamente Ba y por lo tanto su presencia en los cuerpos de agua no sería atribuible a este derrame.

De acuerdo a la similitud del comportamiento temporal de las concentraciones totales y disueltas podemos tener dos grupos: (grupo 1) As, Ba, Ni y Pb y (grupo 2) Cu y Zn

Por lo que a continuación explicamos el comportamiento del As como representativo del grupo 1 y el del Cu, como representante, del grupo 2.

### **Arsénico**

Para efectos de interpretación se consideró el límite permisibles para agua de consumo humano señalado en la NOM-127 (LMP de As = 0.025 mg/L).

a) Periodo entre 08/08/2014 y 13/08/2014 (Figura 3.4 A)



- En los días 08 y 09 de agosto, se observan concentraciones totales anómalas en la parte de alta de la cuenca (entre Bacanuchi, con clave 2, MET-003 y Sinoquipe, con clave 6, MET-014), que cubre una longitud de unos 50 km, lo que parece indicar la influencia del derrame.
- A partir de Sinoquipe y hasta Baviácora (clave 16, MET-039), con un longitud de unos 50 km, las concentraciones totales del As son inferiores a los límites de la NOM-127; y a partir de la estación de muestreo La Labor (clave 19 (MET-043) hasta Topahue (clave 31, MET-086), que cubre una longitud de unos 70 km, las concentraciones totales del As vuelven a ser más altas que el límite de la NO-127.

El comportamiento antes descrito y el hecho de que el flanco este de la cuenca, entre Aconchi y Baviácora, existe una anomalía de As que cubre unos 60 km<sup>2</sup> y que está relacionada con una zona mineralizada y que sigue aguas abajo del arroyo El Rancho hasta drenar al río Sonora al norte de Baviacora (ver figura 1.10 de la sección 1.3 de este informe), se puede suponer una fuente de As diferente al derrame que amerita ser evaluada.

Esta evaluación es de suma importancia para valorar el daño asociado al derrame, pues la fuente de derrame es finita (Desde pocos días después del derrame ya no constituye fuente de contaminación), en cambio una fuente natural e constante y podría estar impactando negativamente los cuerpos de agua del río Sonora por tiempo indefinido.

Es importante señalar que en esta misma zona anómala de As se identificaron también anomalía fuertes de plomo e intermedias de Ba y Ni (Ver Figura 1.19, 1.18 y 1.11 de la sección 1.3 de este informe).



- En las siguientes estaciones de muestreo las concentraciones totales de As vuelven a ser inferiores a los límites de la NOM-127 (Boquilla de Orégano y presa el Molinito, con claves 32, 33, 34 y 35 que corresponde a MET-058, MET-059, MET-060 y MET-061)

b) Periodo entre 18/08/2014 y 22/08/2014 (Figura 3.4 B)

Se observa que mayor cantidad de pozos muestran concentraciones superiores de As total al límite de la NOM-127 en la parte alta, media y media baja de la cuenca. En el Molinito, las concentraciones totales de As siguen siendo inferiores al límite de la NOM-127.

Los estudios realizados no aportan evidencias para poder distinguir el aporte de As relacionado con el derrame y el aporte natural debido a las particularidades geológicas de la cuenca del río Sonora, por lo que identificar la firma isotópica o el patrón de los elementos de tierra raras, tanto en las fuentes (antropogénica "el derrame" y natural "la geología de la zona") pueden ayudar a resolver este asunto.

Así mismo, hace falta un análisis de las condiciones climáticas y de los escurrimientos tanto del norte como los que viene del este y del oeste (anomalías de As natural) y que drenan al río Sonora, para tener elementos que permitan explicar el comportamiento de las concentraciones totales del As en este periodo.

c) Periodo entre 28/08/2014 y 01/09/2014 (Figura 3.4 C)

Se observa que todos los sitios muestreados de la cuenca desde la parte alta (Bacanuchi) hasta la presa El Molinito, las concentraciones totales de As son inferiores al límite de la NOM-127.



Es necesario hacer un análisis de las condiciones climáticas y de los escurrimientos tanto del norte como los que vienen del este- oeste y que drenan al río Sonora, para tener elementos que permitan explicar el comportamiento de las concentraciones totales del As en este periodo.

d) Periodo entre 22/09/2014 y 26/09/2014 (Figura 3.4 D)

De manera general se aprecia, que en la parte media alta, media y media baja de la cuenca las concentraciones de As totales son mayores que el límites de la NOM-127. Lo que se podría explicar por el arrastre de material particulado debido a las lluvias provocadas por el huracán Odile (17 – 18 de septiembre).

El aporte de partículas, que inciden en los resultados, se comprueba con el hecho de que en este periodo, las concentraciones de As disuelto en todos los sitios muestreados de la cuenca son bajos e inferiores al límite de la NOM-127 (Figura 3.5 A).

e) Periodo entre 07/10/2014 y 21/10/2014 (Figura 3.4 E)

En este periodo el muestreo fue semanal e indica que las concentraciones totales y disueltas del As total son inferiores a los límites de la NOM-127 en todos los sitios muestreados e la cuenca.

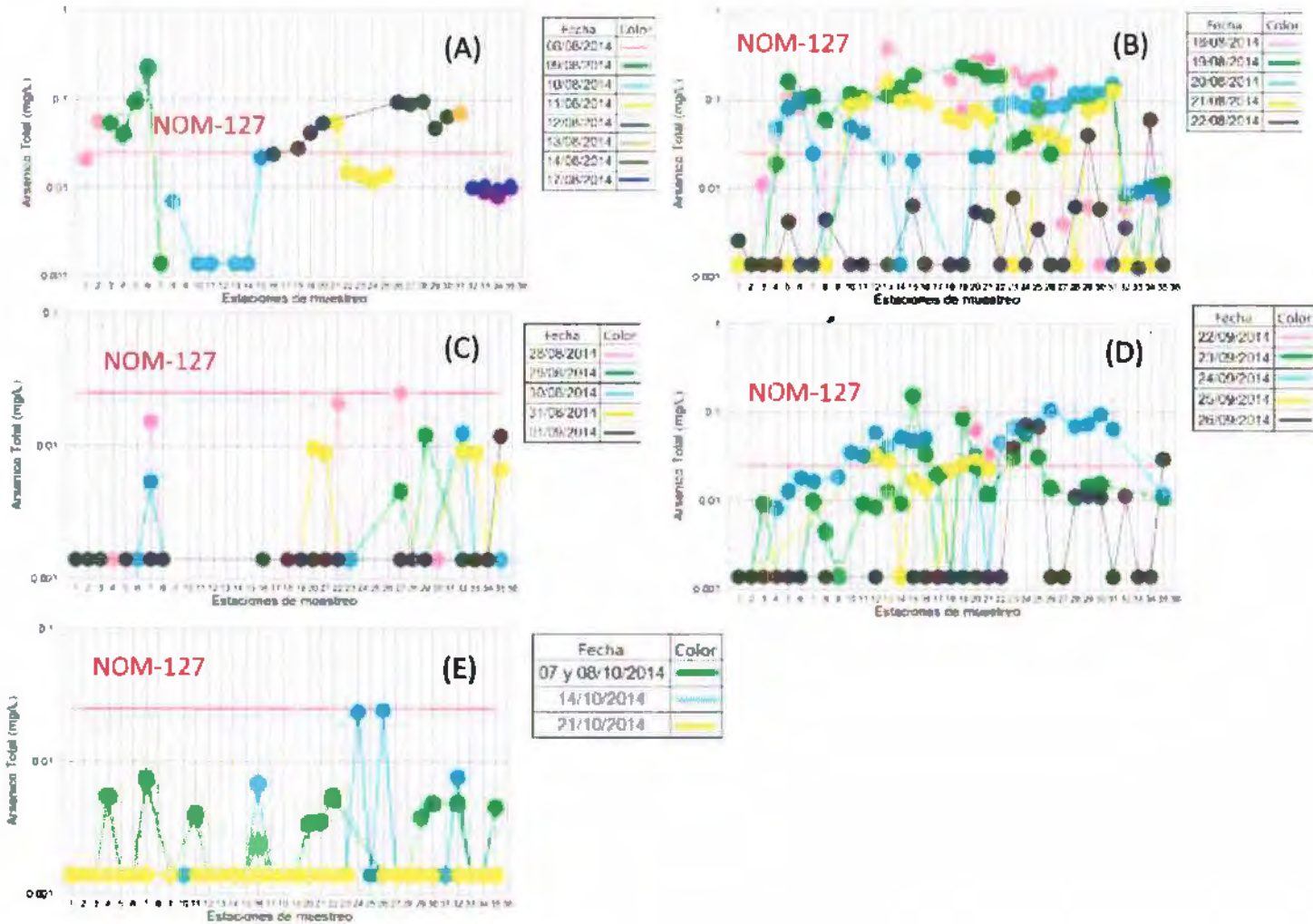
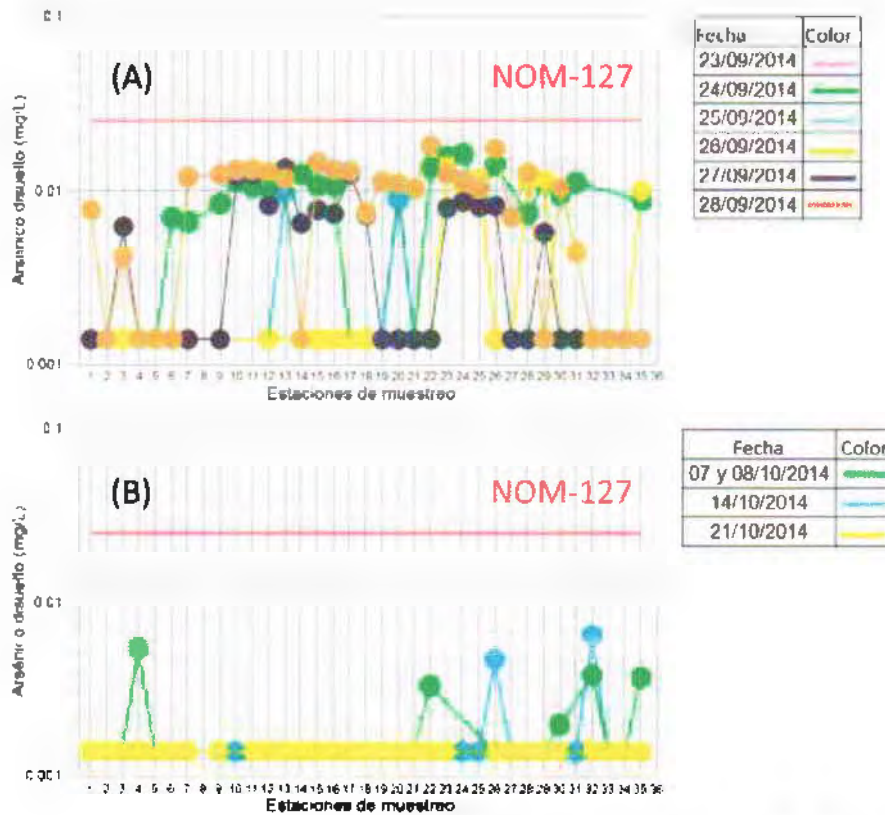


Figura 3.5 Comportamiento temporal de las concentraciones totales del arsénico (As) en los cuerpos de aguas superficiales del río Sonora



**Figura 3.6 Comportamiento temporal de las concentraciones disueltas de arsénico (As) en los cuerpos de aguas superficiales del río Sonora**

### Cobre

a) Periodo entre 08/08/2014 y 13/08/2014 (Figura 3.7 A)

- En los días 08 y 13 de agosto, se observan concentraciones totales anómalas (las más altas) en la parte de alta y media-alta de la cuenca (entre Bacanuchi, con clave 2, MET-003 y Aconchi, con clave 13, MET-024), que cubre una longitud de unos 80 km, lo que parece indicar la influencia del derrame.





- A partir de Baviácora (clave 16, MET-039) hasta Santiago de Ures (clave 25, MET-039) con un longitud de unos 55 km, las concentraciones totales del Cu son inferiores a los límites de la NOM-127; y a partir de la estación de muestreo Guadalupe de Ures (clave 26, MET-044) hasta El Gavilán (clave 28, MET-054), las concentraciones totales del Cu vuelven a ser más altas que el límite de la NOM-127.
- En las siguientes estaciones de muestreo las concentraciones totales de Cu vuelven a ser inferiores a los límites de la NOM-127 (Boquilla de Orégano y presa el Molinito, con claves 32, 33, 34 y 35 que corresponde a MET-058, MET-059, MET-060 y MET-061)

b) Periodo entre 18/08/2014 y 22/08/2014 (Figura 3.7 B)

c) Periodo entre 28/08/2014 y 01/09/2014 (Figura 3.7 C)

d) Periodo entre 22/09/2014 y 26/09/2014 (Figura 3.7 D)

e) Periodo entre 07/10/2014 y 21/10/2014 (Figura 3.7 E)

A partir del 18 de agosto, las concentraciones totales de Cu fueron inferiores a los límites de la NOM-127, con incrementos en los periodos después de lluvias provocadas por eventos como el huracán Odile (Figura 3.E D).

Las concentraciones de Cu disueltas también son inferiores a los límites de la NOM-127 (Figura 3.8).



DIAGNÓSTICO - ESTUDIO RÍO SONORA  
UNAM-UNISON-ITSON

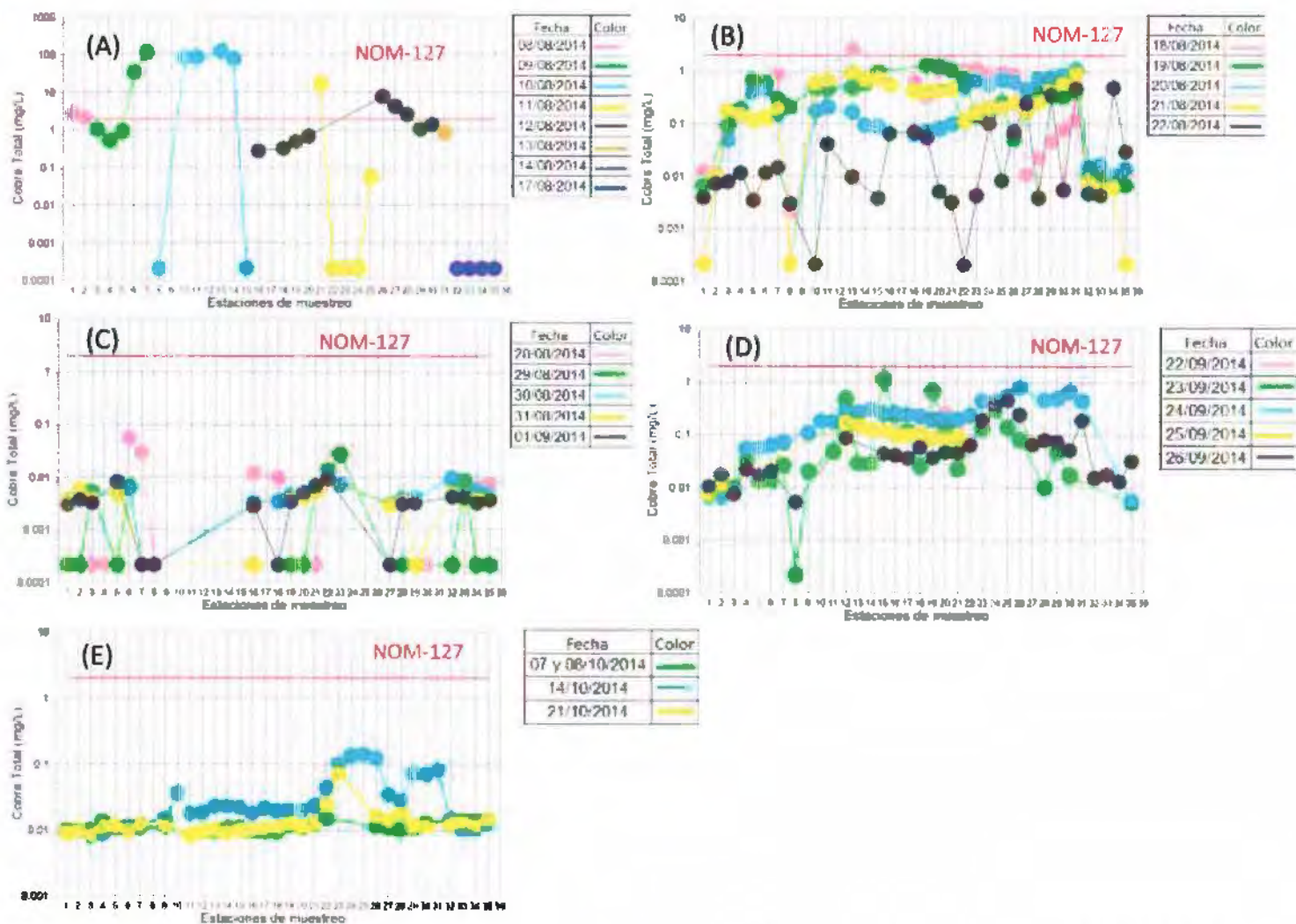
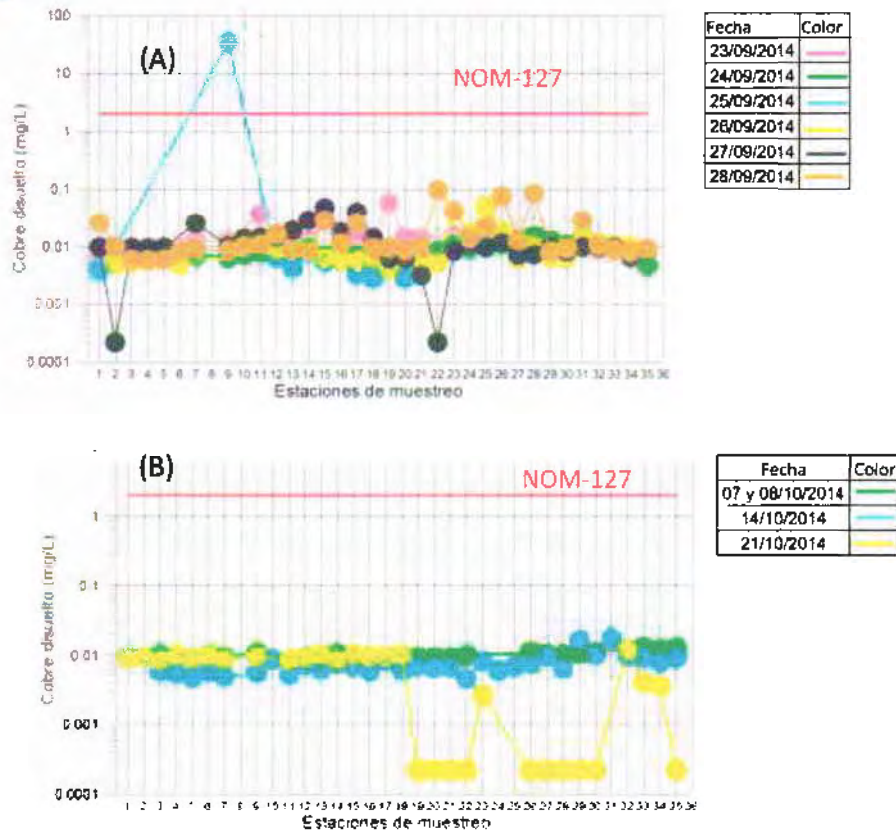


Figura 3.7 Comportamiento temporal de las concentraciones totales de cobre (Cu) en los cuerpos de aguas superficiales del río Sonora



**Figura 3.8 Comportamiento temporal de las concentraciones disueltas de cobre (Cu) en los cuerpos de aguas superficiales del río Sonora**

### B.2.2) Elementos mayores<sup>26</sup>

- Aluminio (Al), hierro (Fe) y manganeso (Mn)**

En general, las concentraciones totales y disueltas, en los cuerpos de agua superficiales de la cuenca del río Sonora, de los elementos mayores como Al, Fe y Mn han tenido un comportamiento particular, tanto espacial como temporalmente.

<sup>26</sup> Como ya se ha venido mencionando, de la lista de elementos químicos sistemáticamente han venido analizando en la cuenca del río Sonora, el Al, Fe y Mn se clasifican geoquímicamente como elemento mayores que son los que están presentes de manera natural en altas concentraciones (> 1.0% ) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos).



Las concentraciones determinadas (mg/L) en la fuente de contaminación de estos metales fueron relativamente altas: 461 mg/L Al, 1080 mg/L Fe y 98.1 mg/L Mn (ver sección 2.2 C de este informe).

De acuerdo a la similitud del comportamiento espacial y temporal de las concentraciones totales y disueltas de estos elementos mayores, a continuación explicamos el comportamiento del Fe como representativo.

### **Hierro**

#### **a) Periodo entre 08/08/2014 y 13/08/2014 (Figura 3.9 A)**

- En los días entre el 08 y 13 de agosto, se observan concentraciones totales anómalas de Fe (las más altas), y superiores a los límites de la NOM-127, en la parte de alta, media y baja de la cuenca hasta la entrada a la presa "El Molinito", desde el represo Tinajas hasta la estación de muestreo Topahue (Clave 31, MET-056), lo que implica una distancia de unos 225 km.

A partir de la estación de muestreo Boquilla de Orégano (clave 32, MET-058) y hasta la presa El Molinito las concentraciones de Fe están por debajo del límite de la NOM-127.

Considerando que en la cuenca del río Sonora, la presencia de Fe (y de Al y Mn) se debe a las particularidades geológicas de la zona, se puede especular que es poco probable, que las altas concentraciones de Fe total (y de Al y Mn) que se determinaron a lo largo de aproximadamente 225 km en las aguas superficiales (en los primeros días después de ocurrido el derrame), se deban solamente al derrame ocurrido el pasado 06 de agosto; lo que implicaría la existencia de fuentes adicionales que pueden ser naturales si consideramos la existencia de extensa anomalías de Fe, Al y Mn cubriendo centenas de kilómetros cuadrados que se han definido (ver figuras 1.9, 1.16 y 1.17 de la



sección 1.3 de este informe) con base en la geoquímica de sedimentos reportados por el SGM (1993 – 2005).

Definir cuál es el aporte antropogénico (derrame) y el natural (geología de la zona) es de suma importancia para valorar el daño asociado al derrame, pues la fuente asociada al derrame es finita (Desde pocos días después del derrame ya no constituye fuente de contaminación), en cambio una fuente natural es constante y podría estar impactando negativamente los cuerpos de agua del río Sonora por tiempo indefinido.

- b) Periodo entre 18/08/2014 y 22/08/2014 (Figura 3.9 B)
- c) Periodo entre 28/08/2014 y 01/09/2014 (Figura 3.9 C)
- d) Periodo entre 22/09/2014 y 26/09/2014 (Figura 3.9 D)
- e) Periodo entre 07/10/2014 y 21/10/2014 (Figura 3.9 E)

A partir del 18 de agosto, las concentraciones totales de Fe siguen siendo superiores a los límites de la NOM-127, con incrementos en los periodos después de lluvias provocadas por eventos como el huracán Odile (Figura 3.9 E).

Sin embargo, las concentraciones de Fe disueltas son relativamente muy bajas y hasta llegar a ser inferiores a los límites de la NOM-127 en las muestras tomadas en octubre (Figura 3.10 B).

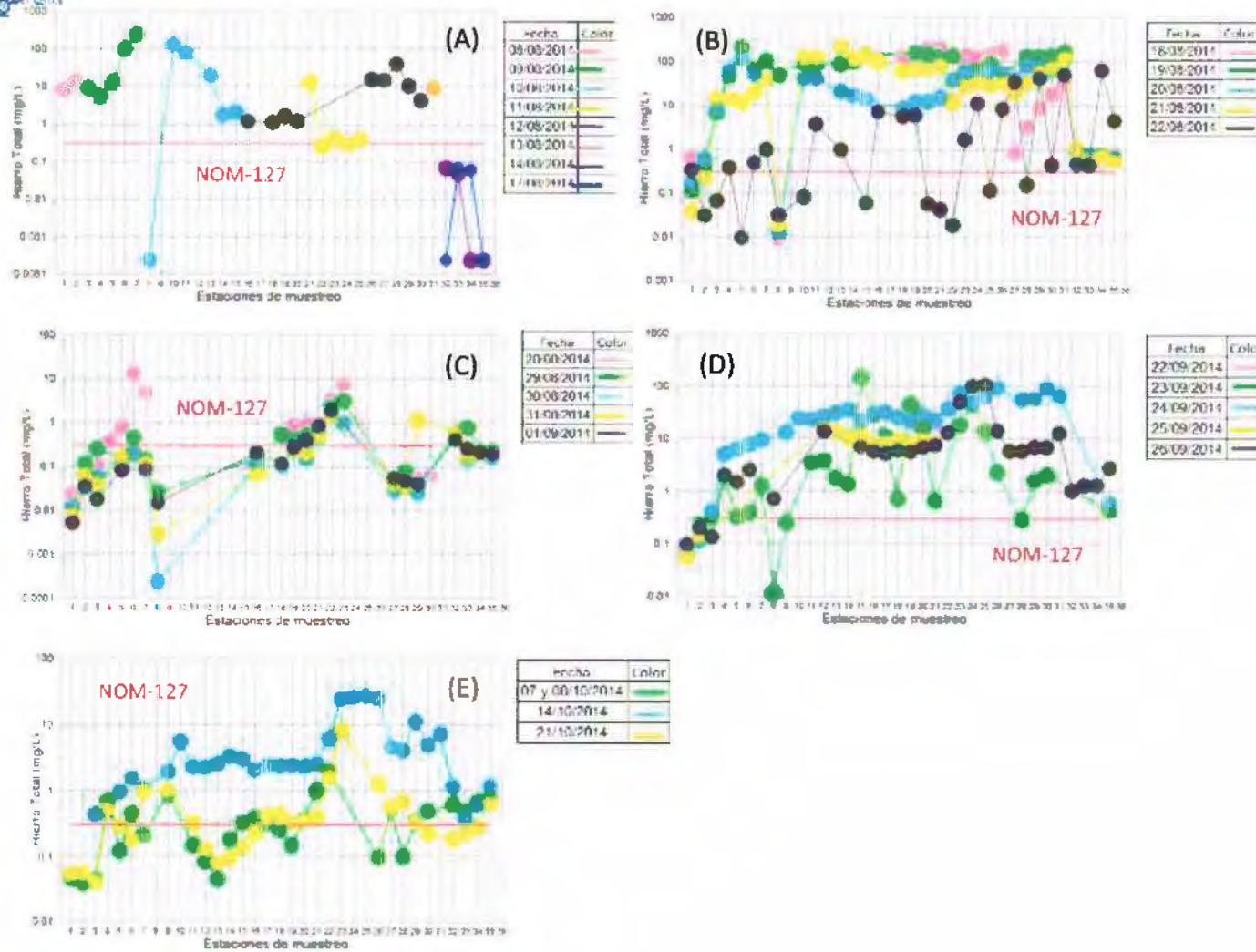
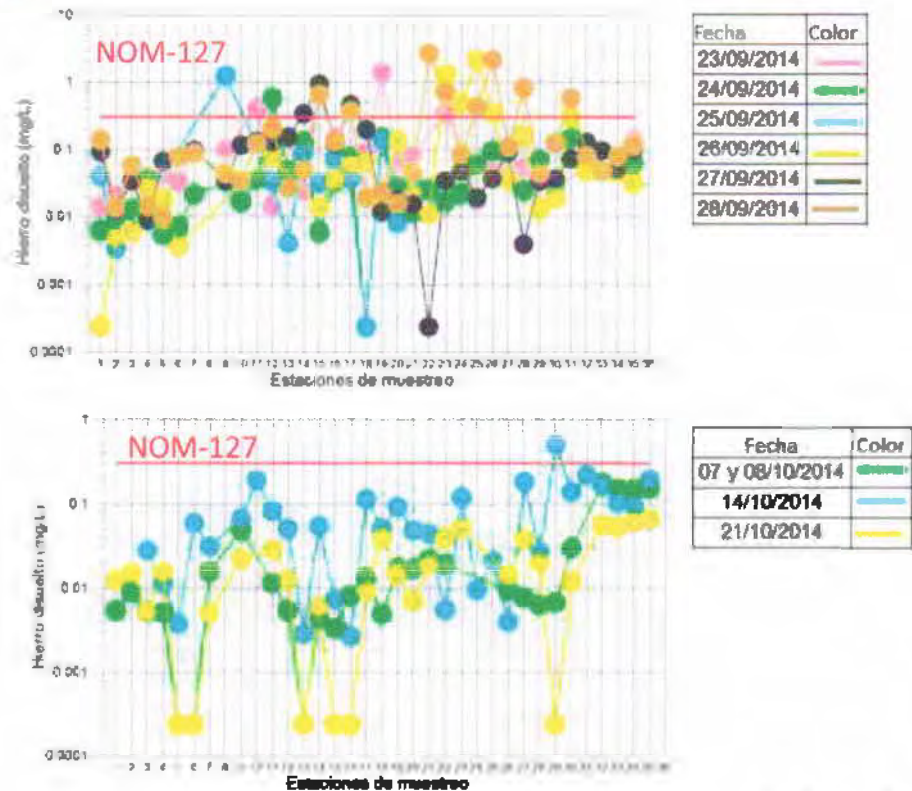


Figura 3.9 Comportamiento temporal de las concentraciones totales del hierro (Fe) en los cuerpos de aguas superficiales del río Sonora



**Figura 3.10** Comportamiento temporal de las concentraciones disueltas del hierro (Fe) en los cuerpos de aguas superficiales del río Sonora



## **3.2 Agua subterránea**

### **3.2.1 Concentración total de elementos potencialmente tóxicos**

#### **A) Muestreo y análisis**

Los datos analizados corresponden a muestreos realizados por CONAGUA, Consultores de Grupo México y Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis S.A. de C.V. Todos los análisis fueron realizados por Laboratorios ABC<sup>27</sup>.

Las muestras que se tomaron corresponden a dos periodos:

d) 18 de agosto al 28 de septiembre

Muestreo diario sistemático desde la parte alta de la cuenca (Bacanuchi) hasta la parte baja (presa El Molinito).

e) 30 de septiembre al 21 de octubre

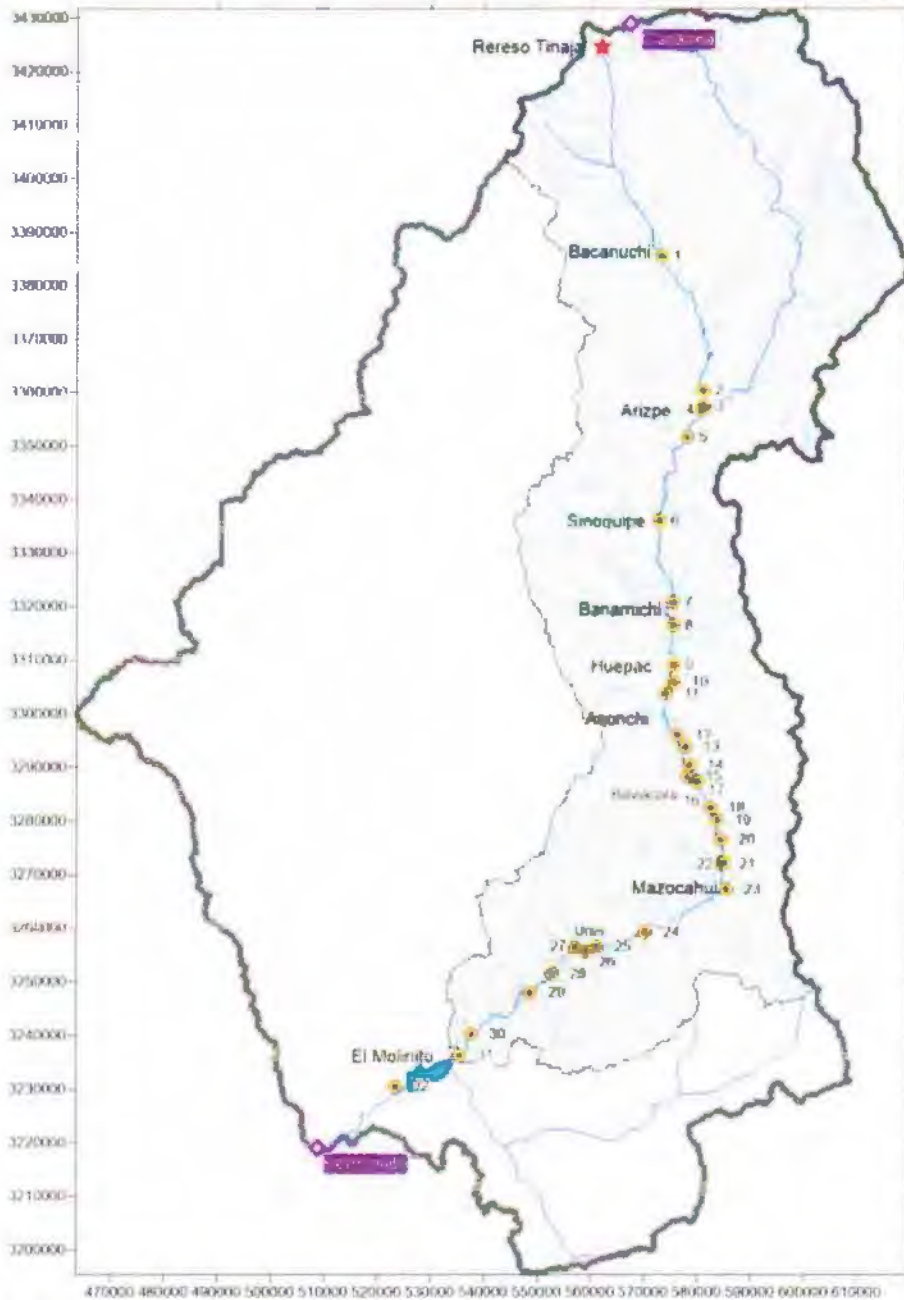
Muestreo semanal sistemático desde la parte alta de la cuenca (Bacanuchi) hasta la parte baja (presa El Molinito).

En esto dos periodos de muestreo se colectaron aproximadamente 700 muestras de aguas subterráneas para determinar la concentración total de 13 metales: aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb) y zinc (Zn). Las concentraciones totales incluyen las concentraciones de los contaminantes disueltos 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, con lo cual se disuelven los metales contenidos en el material particulado del agua del río.

Los sitios para el muestreo fueron seleccionados por la CONAGUA y se presentan en la Figura 3.11. La descripción de los sitios muestreados y sus respectivas coordenadas se presentan en la Tabla 3.2.

<sup>27</sup> Estos datos fueron proporcionados vía electrónica por la SEMARNAT, previa solicitud de los autores, el 11 de noviembre de 2014





**Figura 3.11 Ubicación de los sitios de muestreo de aguas subterráneas (pozos y norias) en la cuenca del río Sonora para valorar la afectación del derrame de solución ácida ferro-cuprúfera que se derramó el pasado 06 de agosto de 2014 del represo Tinajas 1 de Buena Vista del cobre, Cananea-Sonora**



X	Y	CLAVE 2	Descripcion	Clave mapa
573096	3385585	MET-001	BACANUCHI POZO	1
580915	3360457	MET-007	TAHUICHOPA POZO	2
580993	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	SINOQUIPE POZO	6
575263	3320904	MET-016	BANAMICHI 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	BAVIÁCORA POZO 3	15
579857	3287436	MET-083	BAVIÁCORA POZO 1	16
580013	3287403	MET-084	BAVIÁCORA POZO 2	17
582423	3282597	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

**Tabla 3.2** Coordenadas y descripción de los sitios seleccionados para el muestreo de agua subterránea en la cuenca del río Sonora



## **B) Resultados**

### **B.1) Concentración total y disuelta de los contaminantes directamente asociados al derrame**

#### **B.2.1) Elementos traza<sup>28</sup>**

- **Bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn).**

En general, las concentraciones totales y disueltas, en los cuerpos de agua superficiales de la cuenca del río Sonora, de los elementos traza como el Ba, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn están por debajo de los límites permisibles para aguas de consumo humano (NOM-127 y OMS), lo que implica que estos contaminantes no representan un riesgo para a la salud de la población que pueda abastecerse de estos cuerpos de agua.

- **Arsénico (As) y antimonio (Sb)**

**a) Periodo entre 18/08/2014 y 22/08/2014 (Figura 3.12 A) y entre 28/08/2014 y 01/09/2014 (Figura 3.12 B)**

En la Figura 3.12 se puede observar que a 25 días de ocurrido el derrame, las concentraciones totales de As y Sb son inferiores a los límites señalados por la NOM-127 y la Organización Mundial de la Salud (OMS)

---

<sup>28</sup> Como ya se ha venido mencionando, de la lista de elementos químicos sistemáticamente han venido analizando en la cuenca del río Sonora, el Sb, As, Ba, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn se clasifican geoquímicamente como elemento traza, que son los que están presentes de manera natural en bajas concentraciones (< 0.1%) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos).



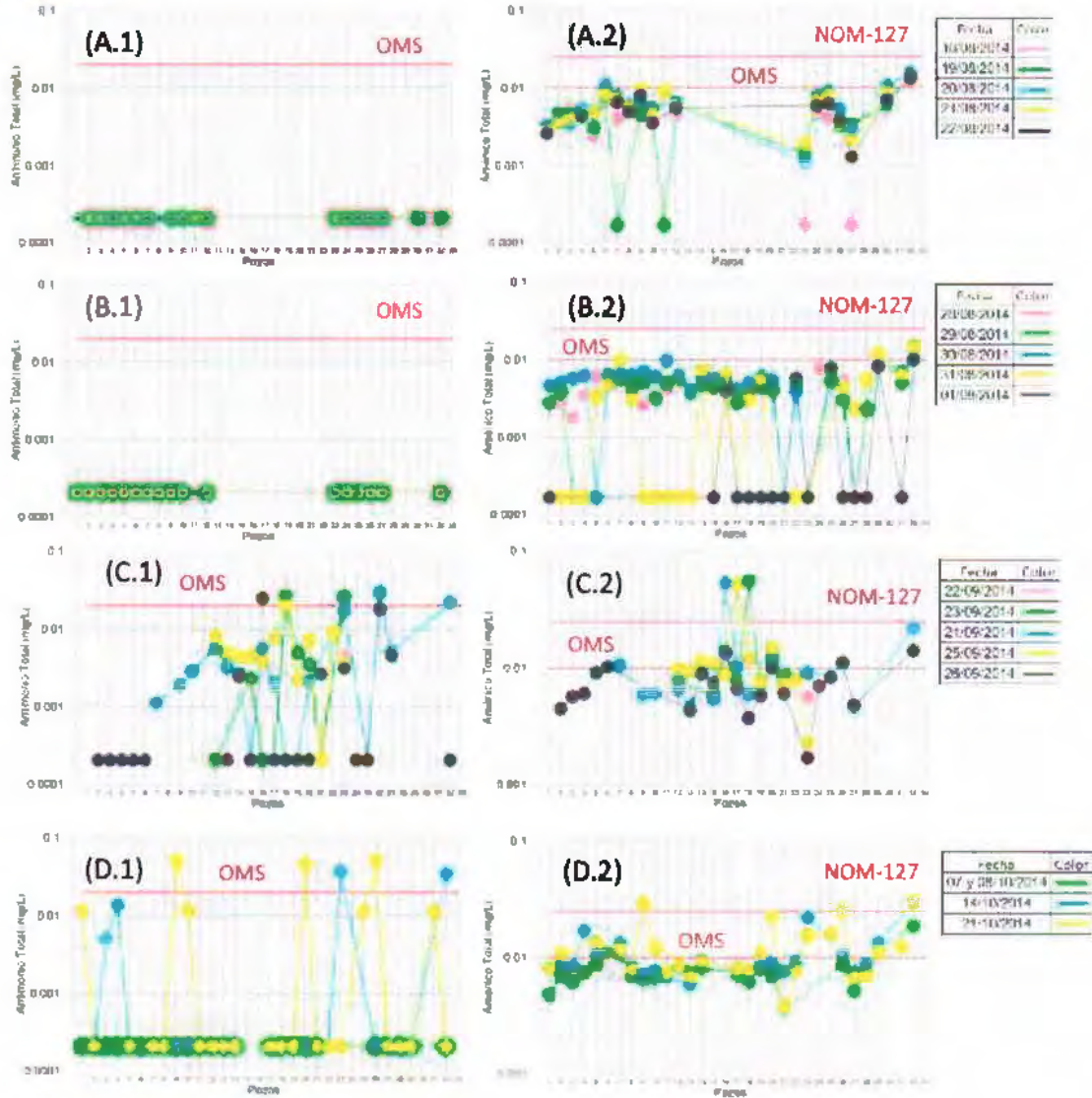
**b) Periodo entre 22/09/2014 y 26/09/2014 (Figura 3.12 D) y entre 07/10/2014 y 21/10/2014 (Figura 3.12 E)**

En estos periodos se observa un incremento en las concentraciones totales de As y Sb. En el periodo entre 22/09/2014 y 26/09/2014 (Figura 3.12 D), el incremento de las concentraciones de As y Sb se observa en los pozos de la cuenca media, lo que coincide con las consecuencias del huracán Odile y sus lluvia anómalas. En el caso del Sb, las concentraciones totales también son ligeramente superiores a los límites de la OMS en el periodo entre 07/10/2014 y 21/10/2014 (Figura 3.12 E).

Considerado que el antimonio no fue detectado en la fuente de contaminación (represo Tinajas 1) y el hecho de que el flanco este de la cuenca, entre Aconchi y Baviácora, existe una anomalía altas de Sb y As que cubre unos 60 km<sup>2</sup> y que está relacionada con una zona mineralizada y que sigue aguas abajo del arroyo El Rancho hasta drenar al río Sonora al norte de Baviacora (ver figuras 1.10 y 1.20 de la sección 1.3 de este informe), se puede suponer una fuente de Sb y As diferente al derrame y que amerita ser evaluada.

Así mismo, en las cercanías de la presa El Molinito, se identificaron anomalías intermedias de Sb, lo que podrían tener relación directa con las concentraciones ligeramente altas de Sb en las aguas subterráneas, en estos periodos, en esta parte de la cuenca, posiblemente asociadas a las lluvias intensas que provocó el huracán Odile.

Debido a que los estudios realizados hasta ahora no son suficientes para valorar el aporte natural y antropogénico, es de suma importancia para valorar el daño asociado al derrame dilucidar este asunto, pues la fuente del derrame es finita (Desde pocos días después del derrame ya no constituye fuente de contaminación), en cambio una fuente natural es constante y podría estar impactando negativamente los cuerpos de agua subterráneos del río Sonora por tiempo indefinido.



**Figura 3.12 Comportamiento temporal de las concentraciones totales del antimonio (Sb) y arsénico (As) y en las aguas subterráneas de la cuenca del río Sonora**



### **B.2.2) Elementos mayores<sup>29</sup>**

- **Aluminio (Al), hierro (Fe) y manganeso (Mn)**

En general, las concentraciones totales y disueltas, en los cuerpos de agua subterráneos de la cuenca del río Sonora, de los elementos mayores como Al y Fe han tenido un comportamiento particular, tanto espacial como temporalmente.

Sin embargo, en el caso del Mn, las concentraciones totales en las aguas subterráneas de la cuenca han estado bajo el límite de detección de la técnica de análisis; por lo que a continuación se hace el análisis de los resultados para el Al, como representante del comportamiento de los elementos mayores en las aguas subterráneas de la cuenca del río Sonora.

**a) Periodo entre 18/08/2014 y 22/08/2014 (Figura 3.13 A) y entre 28/08/2014 y 01/09/2014 (Figura 3.13 B)**

Las concentraciones del Al y Fe en estos periodos indica concentraciones altas y superiores a los límites de la NOM.127 en pozos de la cuenca media-alta y media-baja; sin embargo no hay datos para valora su comportamiento en la cuenca media.

**b) Periodo entre 22/09/2014 y 26/09/2014 (Figura 3.13 D) y entre 07/10/2014 y 21/10/2014 (Figura 3.13 E)**

Las concentraciones del Al y Fe en estos periodos indica concentraciones altas y superiores a los límites de la NOM.127 en pozos de la cuenca media; pero

---

<sup>29</sup> Como ya se ha venido mencionando, de la lista de elementos químicos sistemáticamente han venido analizando en la cuenca del río Sonora, el Al, Fe y Mn se clasifican geoquímicamente como elemento mayores que son los que están presentes de manera natural en altas concentraciones (> 1.0% ) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos).



concentraciones bajas e inferiores al límites de la NOM-127 en las partes de la cuenca alta y baja.

Las mayores concentraciones del Al y Fe se determinaron el en periodo 22/09/2014 y 26/09/2014 (Figura 3.13 D), lo que coincide con las lluvias anómalas provocadas por el huracán Odile.

Considerando que en la cuenca del río Sonora, la presencia de Fe y de Al se debe a las particularidades geológicas de la zona, se puede especular que es poco probable, que las altas concentraciones de estos elementos mayores en las aguas subterráneas se deban principalmente a causas naturales si consideramos la existencia de extensa anomalías de Fe y Al cubriendo centenas de kilómetros cuadrados que se han definido (ver figuras 1.9, 1.16 y 1.17 de la sección 1.3 de este informe) con base en la geoquímica de sedimentos reportados por el SGM (1993 – 2005).



DIAGNÓSTICO - ESTUDIO RÍO SONORA  
UNAM-UNISON-ITSON

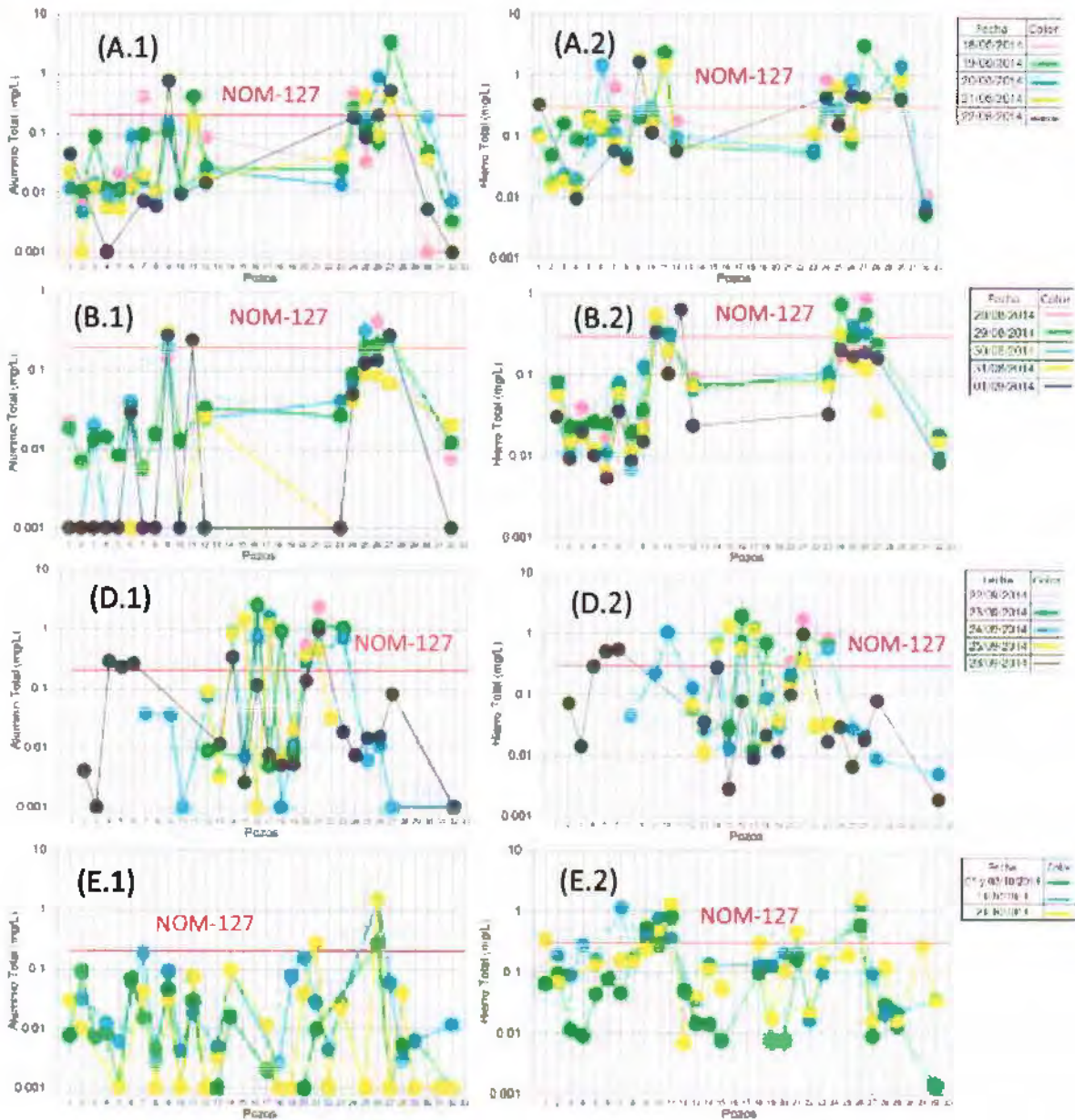


Figura 3.13 Comportamiento temporal de las concentraciones totales de aluminio (Al) y hierro (Fe) en los aguas subterráneas de la cuenca del río Sonora





### 3.3 Análisis multivariado de los resultados analíticos en muestras de agua superficiales y subterráneas

#### 3.1.1 Descripción metodológica

Este análisis se basa en los datos del laboratorio ABC producto de la toma de muestras en agua superficial y subterránea. Los datos se agrupan en tres conjuntos que se muestran en la tabla 3.3.

Conjunto	Periodo
Agua superficial, elementos totales	18 de agosto al 30 de septiembre, 2014
Agua superficial, elementos disueltos	25 de agosto al 30 de septiembre, 2014
Agua subterránea, elementos totales	18 de agosto al 28 de septiembre, 2014

Tabla 3.3 Agrupación de datos para el análisis multivariado

Los elementos reportados son: Al, Sb, As, Ba, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb, Zn, y en algunos casos sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), turbiedad y sólidos suspendidos totales.

El análisis multivariado que se presenta aquí se basa en el análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés) y posteriormente el agrupamiento de las muestras con base en el análisis de conglomerados (análisis de clusters).

El PCA se basa en el análisis de valores propios de una matriz  $n \times p$  de correlación de la composición química, donde  $n$  es el número de muestras y  $p$  es el número de especies químicas. Los vectores propios de la matriz de correlación forman un nuevo sistema ortogonal de coordenadas conocidas como los componentes principales (PC) del conjunto de datos. El primer vector propio (PC1) está alineado con la dirección de la varianza más grande en el conjunto de datos. El segundo vector propio (PC2) está alineado con la dirección de la variación más



grande en el segundo conjunto de datos, y así sucesivamente. Típicamente, los dos o tres primeros vectores propios explican cerca del 90% de la variabilidad en un conjunto de datos. Por lo tanto, PCA se puede utilizar como una herramienta para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos grande y para encontrar patrones en sistemas complejos. Posteriormente, las muestras con características químicas similares se agrupan por análisis de conglomerados. Las agrupaciones se generan con base a las puntuaciones obtenidas a partir del análisis PCA para evitar la inclusión de variables mutuamente dependientes. Referencias a estas técnicas pueden ser consultadas en Everitt y Hothorn (A handbook of statistical analyses using R, 2010).

Estos análisis requieren que todas las variables que se incluyan deben poseer un valor numérico. Por esta razón, todas las muestras que presentaron valores inferiores al límite de detección para algún elemento (señaladas como ND en la base de datos), les fue asignado el valor LDM (límite de detección del método) para el elemento correspondiente. Adicionalmente, los sitios de muestreo que para los que no se reportan datos en las fechas seleccionadas fueron eliminados del análisis.

Las fechas seleccionadas para el análisis son

Agosto 18 y 25	(La primera fecha con datos para cada conjunto)
Septiembre 5	(durante el huracán "Norbert")
Septiembre 23	(después del huracán "Odile")

La siguiente figura (Figura 3.14) ilustra las fechas seleccionadas (marcadas con flechas negras) con respecto a las lluvias registradas en toda la Cuenca del Río Sonora.

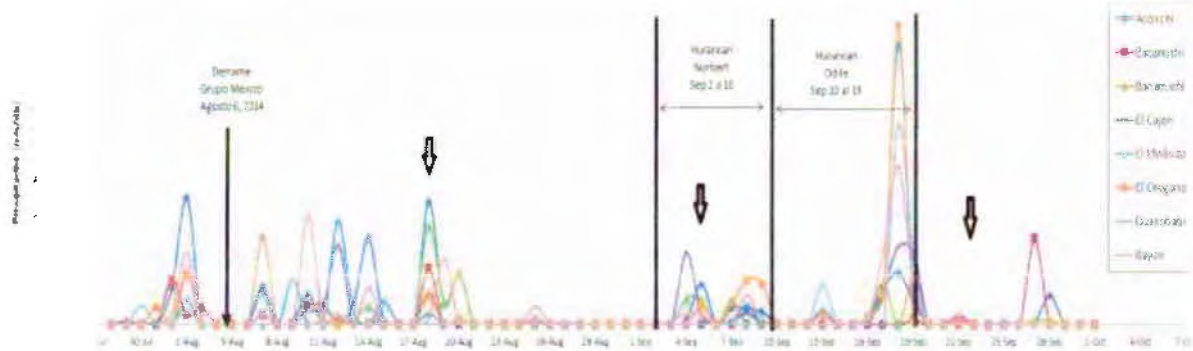


Figura 3.14 Lluvias registrada en las diferentes estaciones meteorológicas de la cuenca del río Sonora

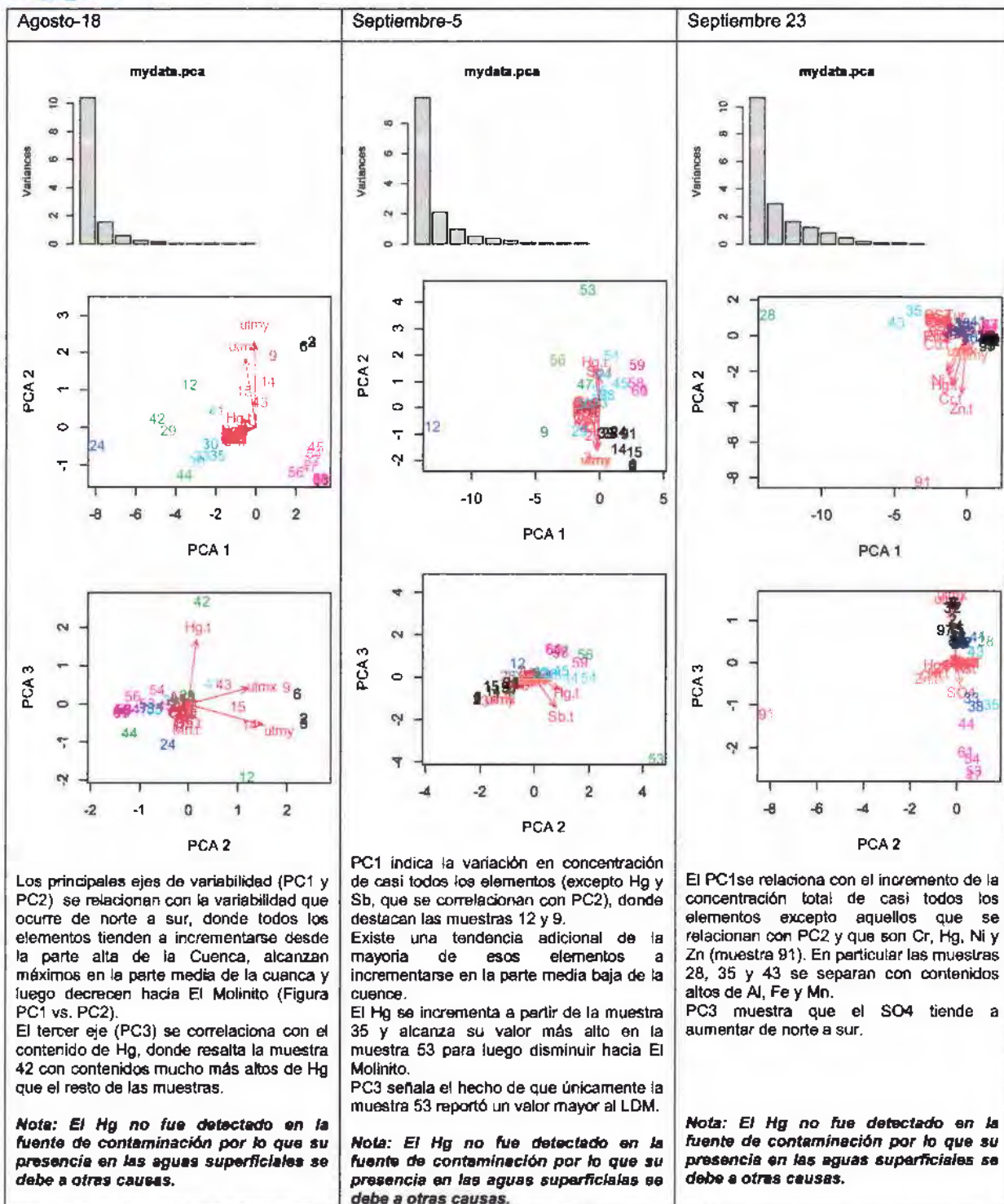
### 3.1.2 Resultados

#### A) Agua superficial, concentración total

Estos resultados incluyen el análisis de los componentes solubles y aquellos suspendidos. En la Figura 3.15 se muestra que aproximadamente el 90% de la varianza de estos resultados puede ser descrita por los primeros dos componentes principales (PC1 y PC2).

Las figuras muestran que en general, la concentración de metales y As tiende a aumentar desde la parte alta hacia la parte media de la Cuenca para disminuir hacia la parte baja (a partir de la zona de Mazocahui y hacia El Molinito).

El comportamiento durante el 23 de septiembre es un tanto diferente a las otras dos fechas, debido a que la inclusión de  $SO_4^{2-}$  (no disponibles para agosto 18 y septiembre 5) cambia la configuración de los grupos en los gráficos de componentes principales. Esto sugiere que el patrón de concentraciones totales probablemente depende de la producción de sedimentos en las zonas de aportación lateral de la Cuenca. Por ejemplo, en agosto 18 el Ba sobrepasa los 0.5 mg/l desde Arizpe (muestra 9) hasta Ures (muestra 44).



Nota: Para facilitar la identificación de muestra, se excluye el prefijo MET-0 de la clave de los sitios

**Figura 3.15 Análisis multivariado de las concentraciones totales de los metales de interés para muestras de agua superficial**



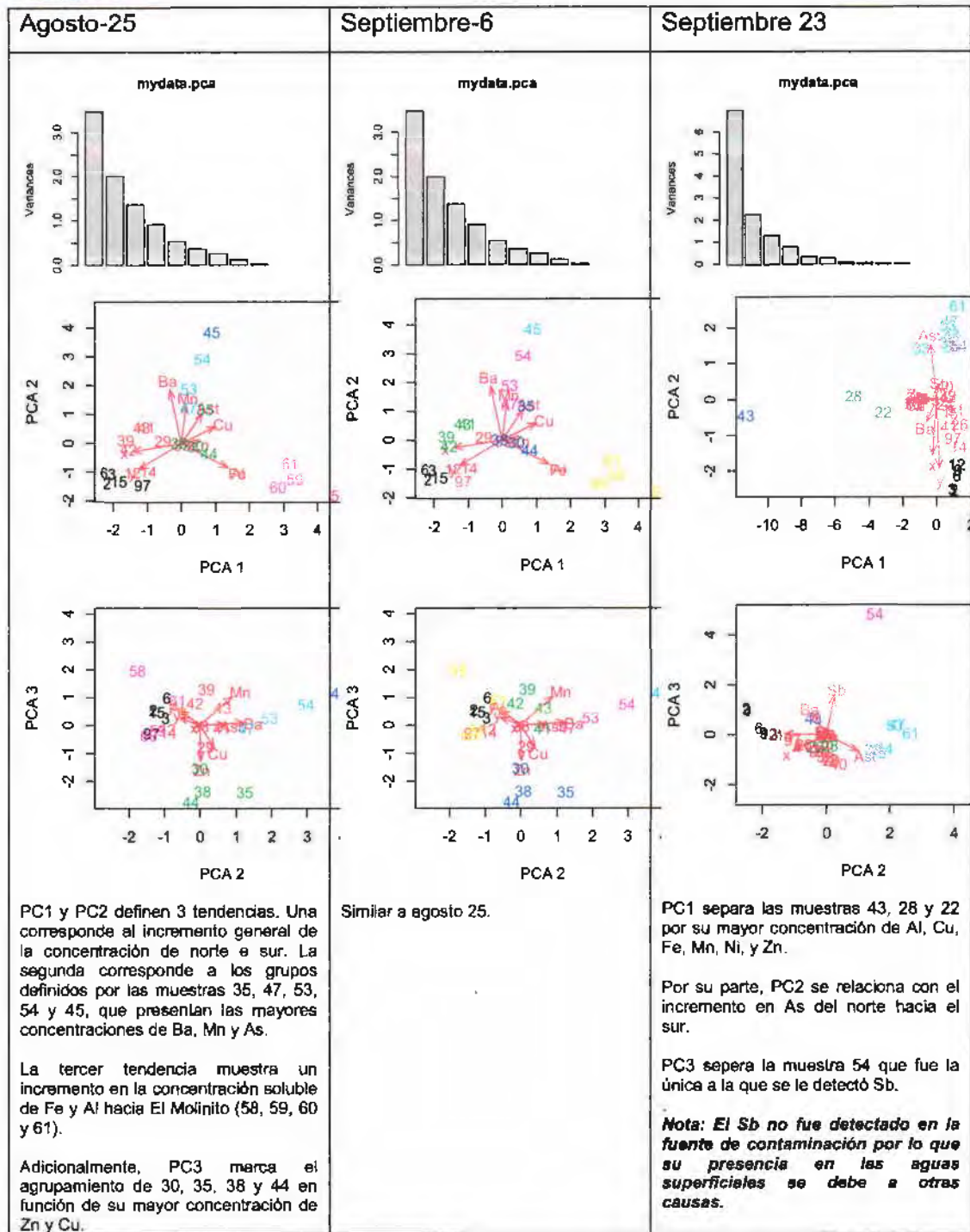
## **B) Agua superficial, concentración de metales disueltos**

En el caso de los componentes en solución, la distribución de la varianza es más extendida que en el caso anterior (Figura 3.16). Aun así, aproximadamente el 80% de la varianza de estos resultados puede ser descrita por los primeros tres componentes principales (PC1, PC2 y PC3).

Para las primeras dos fechas consideradas, los dos primeros componentes principales, PC1 y PC2, definen 3 tendencias. Una corresponde al incremento aparente de la concentración de los elementos en la dirección norte a sur. Sin embargo, este incremento toma dos rutas, lo que define la segunda tendencia.

Esta corresponde a los grupos (definidos por las muestras 35, 47, 53, 54 y 45 para agosto 25 y septiembre 6), que presentan las mayores concentraciones de Ba, Mn y As. La otra "ruta" define la tercera tendencia, que muestra un incremento en la concentración soluble de Fe y Al hacia El Molinito (58, 59, 60 y 61 para agosto 25 y septiembre 6). Adicionalmente, PC3 marca el agrupamiento de 30, 35, 38 y 44 en función de su mayor concentración de Zn y Cu.

El comportamiento durante septiembre 23 cambia con respecto a las fechas anteriores. PC1 separa las muestras 43, 28 y 22 por su mayor concentración de Al, Cu, Fe, Mn, Ni, y Zn. Por su parte, PC2 se relaciona con el incremento en As del norte hacia el sur. El tercer componente principal, PC3 separa la muestra 54 que fue la única a la que se le detectó Sb.



**Figura 3.16** Análisis multivariado de las concentraciones de metales disueltos de interés para muestras de agua superficial



### **C) Agua subterránea, concentración total**

En el caso del agua subterránea, la distribución de la varianza es más extendida que en el agua superficial, sugiriendo una mayor cantidad de factores que inciden en la variabilidad observada en la composición (Figura 3.17). Aproximadamente entre el 70% y 80% de la varianza de estos resultados puede ser descrita por los primeros tres componentes principales (PC1, PC2 y PC3).

En este caso es difícil extraer conclusiones generales debido a que durante las fechas seleccionadas (y en general en todo el registro disponible de datos), no se obtuvieron muestras en todos los sitios de manera consistente. Durante agosto 18 solo se tomaron 14 muestras en sitios correspondientes, 29 sitios durante septiembre 5 y únicamente 9 sitios durante septiembre 23.

Durante agosto 18, la mayor variabilidad la aportan las concentraciones de Al, Fe y Ba (relacionados con PC1). La segunda fuente de variabilidad son las concentraciones de As (51, 34, 46) y Cu (32) en PC2. El resto de los elementos se relacionan en mayor o menor medida con PC1 y PC2. Por su parte, el tercer eje (PC3) se correlaciona con el contenido de Zn y Cu, lo que separa a la muestra 32.

Durante septiembre 5, PC1 se relaciona con las concentraciones de Al y Fe (112 y 23) y también As. (sitios cerca de El Molinito: 51, 110, 112, 113, 36, 37). Por su parte, PC2 se relaciona con Hg (sitios 88, 32) y con As. Finalmente, PC3 se relaciona con la concentración de Ba y en menor medida con Mn (78, 23) y Zn.

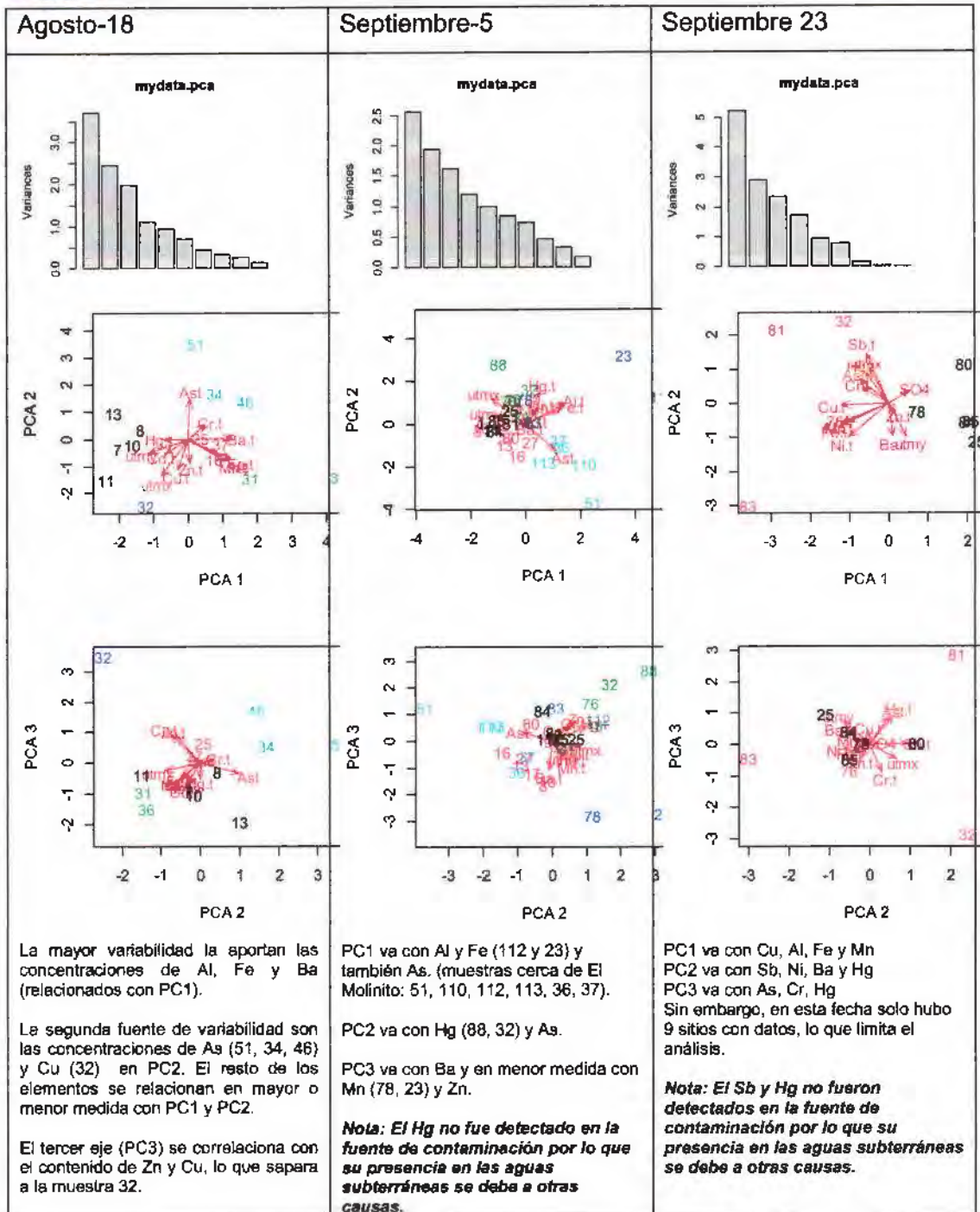


Figura 3.17 Análisis multivariado de las concentraciones de metales totales de interés para muestras de agua subterránea





#### **4. Calidad de sedimentos y suelos**

##### **4.1 Sedimentos**

###### **A) Muestreo y análisis**

Los datos analizados corresponden a muestreos realizados por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, consultores de Sonora y el laboratorio acreditado INTERTEK. Todos los análisis fueron realizados por Laboratorios INTERTEX.

En esta campaña de muestreo se colectaron 95 muestras de sedimentos dentro de la zona que se presume afectada por el derrame; además de 65 de sedimentos obtenidas en áreas fuera de la influencia del derrame. En este informe solamente se analizan los resultados de las muestras colectadas dentro de la zona que se presume contaminada por el derrame.

Se determinaron las concentraciones totales de los elementos químicos asociados al derrame (aluminio (Al), arsénico (As), bario (Ba), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb) y zinc (Zn)) y otros que están regulados en la Norma Oficial Mexicana de suelos contaminados por metales (NOM-147).

Los sitios de muestreo fueron seleccionados a juicio de experto, pues no existen normas oficiales, ni mexicanas, que regulen este medio abiótico.

Los sitios para el muestreo se presentan en la Figura 4.1. La descripción de los sitios muestreados y sus respectivas coordenadas se presentan en la Tabla 4.1.



**Figura 4.1. Ubicación de los sitios de muestreo de sedimentos de la cuenca del río Sonora para valorar la afectación del derrame de solución ácida ferro-cuprífera que se derramó el pasado 06 de agosto de 2014 del represo Tinajas 1 de Buena Vista del cobre, Cananea-Sonora**



DIAGNÓSTICO - ESTUDIO RÍO SONORA  
UNAM-UNISON-ITSON

X	Y	Clave		X	Y	Clave		X	Y	Clave	
		mapa	campo			mapa	campo			mapa	campo
563653	3406814	1	SGM-002	576308	3294654	40	SGM-048	511057	3221509	79	SGM-093
565277	3401459	2	SGM-003	578328	3290575	41	SGM-049	512974	3220643	80	SGM-094
567504	3396259	3	SGM-004	579858	3288451	42	SGM-050	513589	3223383	81	SGM-095
568555	3394343	4	SGM-005	579933	3286680	43	SGM-051	513357	3214608	82	SGM-096
571344	3390851	5	SGM-006	580922	3284956	44	SGM-052	510560	3212969	83	SGM-097
572477	3386499	6	SGM-007	582664	3282162	45	SGM-053	508672	3212847	84	SGM-098
572749	3385055	7	SGM-008	583349	3280977	46	SGM-054	508016	3213001	85	SGM-099
573355	3384111	8	SGM-009	583567	3280425	47	SGM-055	580193	3362095	86	SGM-100
574690	3382845	9	SGM-010	584315	3276555	48	SGM-056	562907	3421500	87	STG-003
576705	3380024	10	SGM-011	583762	3273510	49	SGM-057	563078	3419687	88	STG-004
579576	3376419	11	SGM-012	584219	3272318	50	SGM-058	563505	3417933	89	STG-006
580452	3373404	12	SGM-013	584676	3269270	51	SGM-059	563950	3415812	90	STG-007
580570	3371520	13	SGM-014	584499	3269081	52	SGM-060	563827	3413043	91	STG-008
581302	3368511	14	SGM-015	585216	3267412	53	SGM-061	563450	3410554	92	STG-010
580630	3363987	15	SGM-017	582855	3265963	54	SGM-062	562806	3409303	93	STG-011-A
581005	3359764	16	SGM-018	571381	3260931	55	SGM-063	563738	3408350	94	STG-012
580978	3356896	17	SGM-025	570134	3259705	56	SGM-064	564530	3409013	95	STG-013-A
580411	3356208	18	SGM-026	562376	3256687	57	SGM-065				
578455	3354072	19	SGM-027	559504	3256634	58	SGM-066				
578180	3351998	20	SGM-028	557768	3255835	59	SGM-067				
578229	3351212	21	SGM-029	552688	3251662	60	SGM-068				
576300	3349858	22	SGM-030	551202	3250152	61	SGM-069				
575086	3349329	23	SGM-031	548599	3248247	62	SGM-070				
576169	3345992	24	SGM-032	547489	3248359	63	SGM-071				
574299	3345308	25	SGM-033	544789	3243866	64	SGM-072				
573975	3340965	26	SGM-034	545213	3244346	65	SGM-073				
573572	3339802	27	SGM-035	541423	3243961	66	SGM-074				
572998	3336087	28	SGM-036	540296	3242582	67	SGM-075				
572952	3333748	29	SGM-037	537939	3240252	68	SGM-076				
575160	3324512	30	SGM-038	535709	3236454	69	SGM-077				
575251	3320918	31	SGM-039	534518	3235409	70	SGM-078				
575797	3316685	32	SGM-040	525939	3231125	71	SGM-085				
574608	3311394	33	SGM-041	522725	3229092	72	SGM-086				
575135	3309732	34	SGM-042	523260	3226366	73	SGM-087				
574829	3306274	35	SGM-043	520101	3227478	74	SGM-088				
574510	3303132	36	SGM-044	519549	3225508	75	SGM-089				
574078	3301875	37	SGM-045	517858	3226908	76	SGM-090				
573734	3299586	38	SGM-046	514473	3223869	77	SGM-091				
575428	3296653	39	SGM-047	513976	3216889	78	SGM-092				

Tabla 4.1 Coordenadas y descripción de los sitios seleccionados para el muestreo de sedimentos en la cuenca del río Sonora



## **B) Resultados**

Las concentraciones totales de Cd, Hg y Sb son inferiores al límite de detección de la técnica de análisis. Por otro lado, las concentraciones totales de Cr y Zn son inferiores a los valores de fondo regionales (promedio de las concentraciones totales reportadas por el SGM en aproximadamente 1,682 muestras de sedimentos de arroyo realizados entre 1995 y 2005).

Estos resultados permiten concluir que desde el punto de vista ambiental, estos contaminantes (Cd, Cr, Hg, Sb y Zn) no representan un peligro y riesgo para el medio ambiente en general.

### **B.1) Concentración total los Elementos traza<sup>30</sup>**

De los elementos traza que fueron detectados por la técnica de análisis y que en alguna de las muestras se superó el valor de fondo (As, Cu, Ni y Pb), el cobre es el más representativo.

La distribución de las concentraciones totales de cobre parece indicar que el impacto del derrame en los sedimentos parece extenderse desde el Represo "Tinajas 1" hasta Bacanuchi y posiblemente, hasta Arizpe. Desde Arizpe hasta Boquilla de Orégano se observa que las concentraciones de Cu superan ligeramente el valor de fondo. Sin embargo, dada las anomalías de Cu, y de otros elemento traza desde Banamichi hasta Mazacohau en los flancos este y oeste de la cuenca permite especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame del represo "Tinajas 1" que pueda deberse a zonas mineralizadas de la zona (Figura 4.2).

---

<sup>30</sup> De la lista de elementos químicos sistemáticamente han venido analizando en la cuenca del río Sonora, el Sb, As, Ba, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn se clasifican geoquímicamente como elemento traza, que son los que están presentes de manera natural en bajas concentraciones (< 0.1%) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos).



DIAGNÓSTICO - ESTUDIO RÍO SONORA  
UNAM-UNISON-ITSON

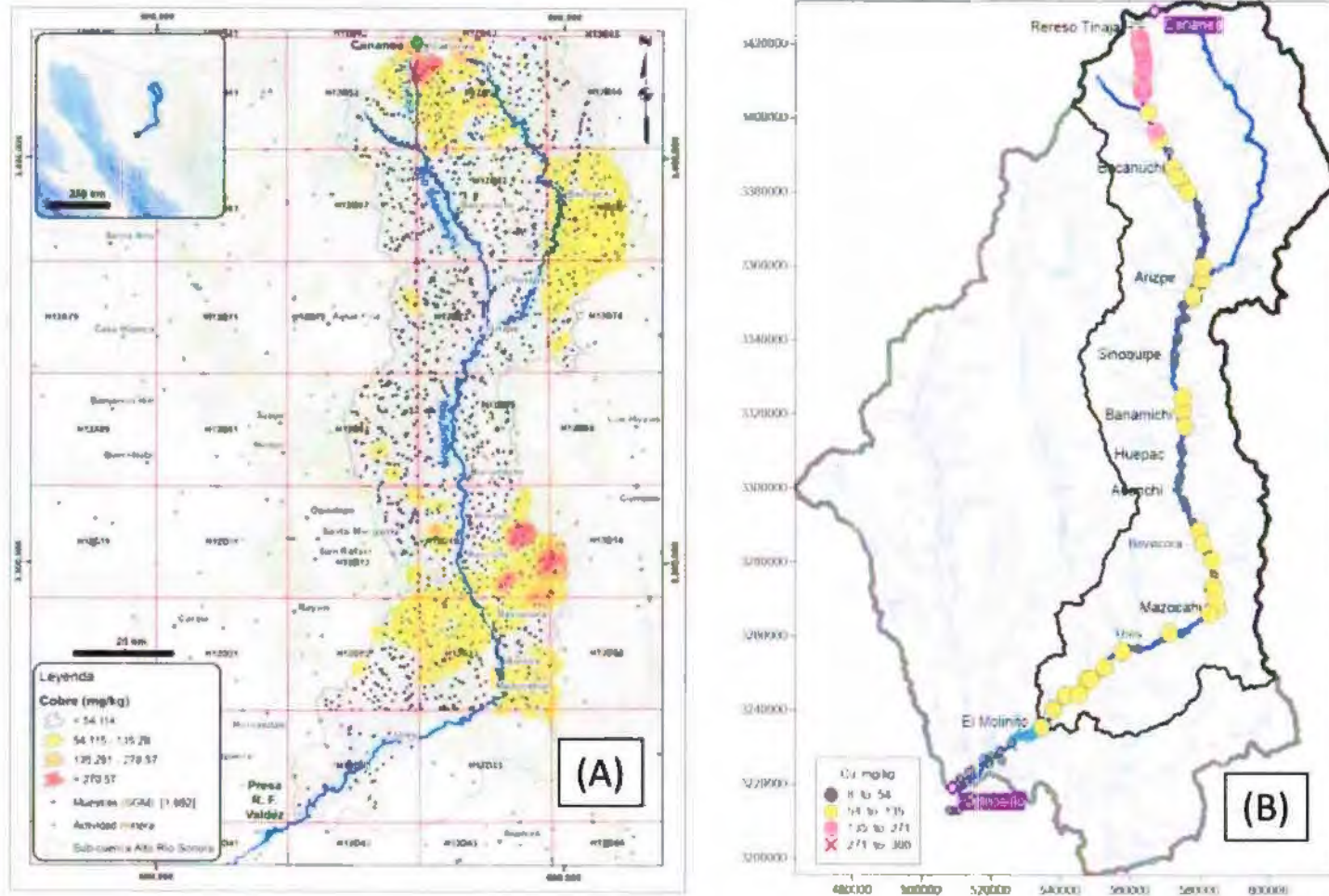


Figura 4.2 Distribución de la concentración total de cobre (Cu): (A) Sedimentos muestreado por le SGM entre 1993 y 2005 y (B) Sedimentos muestreado en este proyecto



### **B.2) Concentración total los Elementos mayores<sup>31</sup>**

De los elementos mayores (Al, Fe y Mn), el manganeso parece ser el más representativo. La distribución del manganeso parece indicar que el impacto del derrame en los sedimentos parece extenderse desde el Represo "Tinajas 1" hasta Bacanuchi y posiblemente, hasta Arizpe. Desde Arizpe hasta Boquilla de Orégano se observa que las concentraciones de Mn superan el valor de fondo. Sin embargo, dada las anomalías de Mn, y de otros elementos mayores, desde Huepac hasta Mazacohauí, en los flancos este y oeste de la cuenca, se puede especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame y que puede deberse a zonas mineralizadas de la zona (Figura 4.3).

### **B.3) Concentración total de elementos traza y mayores en las muestras tomadas en el muestreo orientativo de la UNAM**

En el muestreo orientativo realizado por la UNAM en los sedimentos de la parte alta, media y baja de la cuenca se tomaron un total de 10 muestras. Los análisis se realizaron en los laboratorios de la UNAM y los resultados se presentan en la Tabla 4.2.

De los elementos traza, el Cu y el As son representativos y corroboran los resultados reportados por la Universidad de San Lis Potosí acerca de que el impacto del derrame en los sedimentos parece extenderse desde el Represo "Tinajas 1" hasta Bacanuchi y posiblemente, hasta Arizpe (Figura 4.4).

En el caso de los elementos mayores, las concentraciones superiores a los valores de fondo están en la parte baja de la cuenca (Figura 4.5), lo que parece indicar fuente diferentes al derrame del represo de Tinajas 1.

<sup>31</sup> Como ya se ha venido mencionando, de la lista de elementos químicos sistemáticamente han venido analizando en la cuenca del río Sonora, el Al, Fe y Mn se clasifican geoquímicamente como elemento mayores que son los que están presentes de manera natural en altas concentraciones (> 1.0% ) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos).

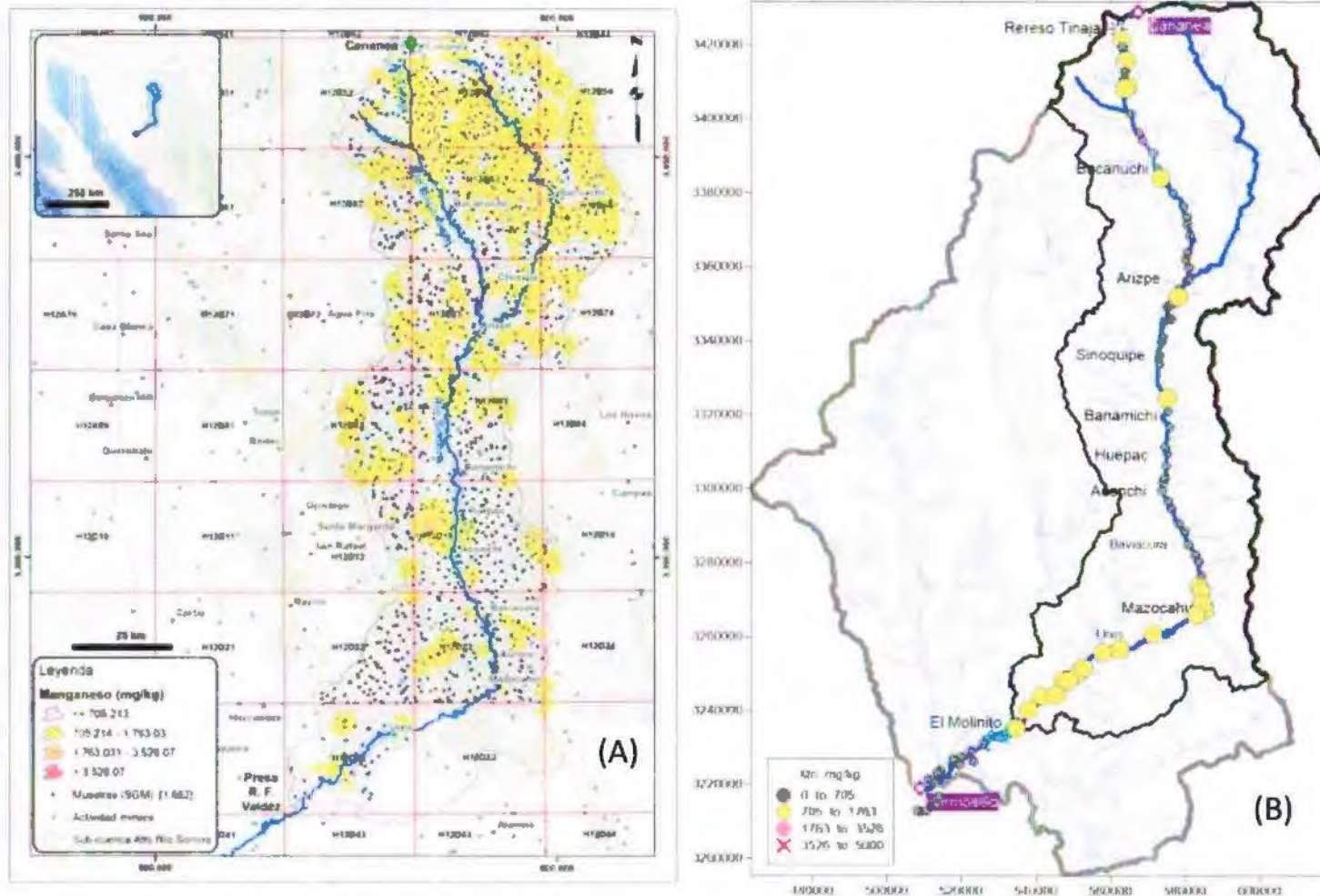


Figura 4.3 Distribución de la concentración total de manganeso (Mn): (A) Sedimentos muestreado por le SGM y (B) Sedimentos muestreado en este proyecto



Clave mapa informe	Muestra	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn	Hg
		mg/Kg											
Límite de detección		0.07	0.1	0.02	0.003	0.122	0.01	0.007	0.01	0.03	0.05	0.007	0.0005
1	SED-1Tinaja	24.6	111.9	<LOD	2.4	125.5	15193	378	<LOD	44.8	<LOD	93.2	0.032
2	SED-3 Bordo de contencion UNAM	7.3	32.5	<LOD	1.9	122.2	12597	552	<LOD	36.3	<LOD	102.7	0.024
3	SED-4 Sedimento UNAM	<LOD	56.2	<LOD	<LOD	32.1	6005	258	<LOD	1.8	<LOD	22.5	<LOD
4	SED-5 Bacanuchi antes de confluencia	4.1	95.6	<LOD	<LOD	95.3	10505	270	<LOD	<LOD	<LOD	42.7	0.052
5	SED-6 Rio Sinoquipe UNAM	<LOD	77.3	<LOD	<LOD	3.0	6169	212	<LOD	<LOD	<LOD	21.3	<LOD
6	SED-7 Aconchi Rio Sonora	0.4	61.4	<LOD	<LOD	0.1	6013	155	<LOD	0.4	<LOD	18.0	0.175
7	SED-8 URES UNAM	<LOD	44.2	<LOD	<LOD	<LOD	4747	144	<LOD	<LOD	<LOD	8.6	0.112
8	SED 9 UNAM	16.2	287.4	<LOD	18.7	52.0	28063	832	20.8	32.2	6.6	113.2	0.220
9	SED B San Jose de Garcia	6.3	82.3	<LOD	8.7	2.9	14326	988	6.1	8.4	3.8	35.0	0.071
10	SED 11 UNAM	4.7	58.5	<LOD	<LOD	1.9	7672	139	2.5	4.3	2.5	21.7	0.048
Valor de fondo		20	243	1	66	54	38260	705	17	56	3.4	102	ND

Tabla 4.2. Concentraciones totales de contaminantes asociados al derrame en muestras de sedimentos de la cuenca alta, media y baja del rio Sonora. Estos datos has sido generados en el muestreo análisis orientativo realizado por la UNAM



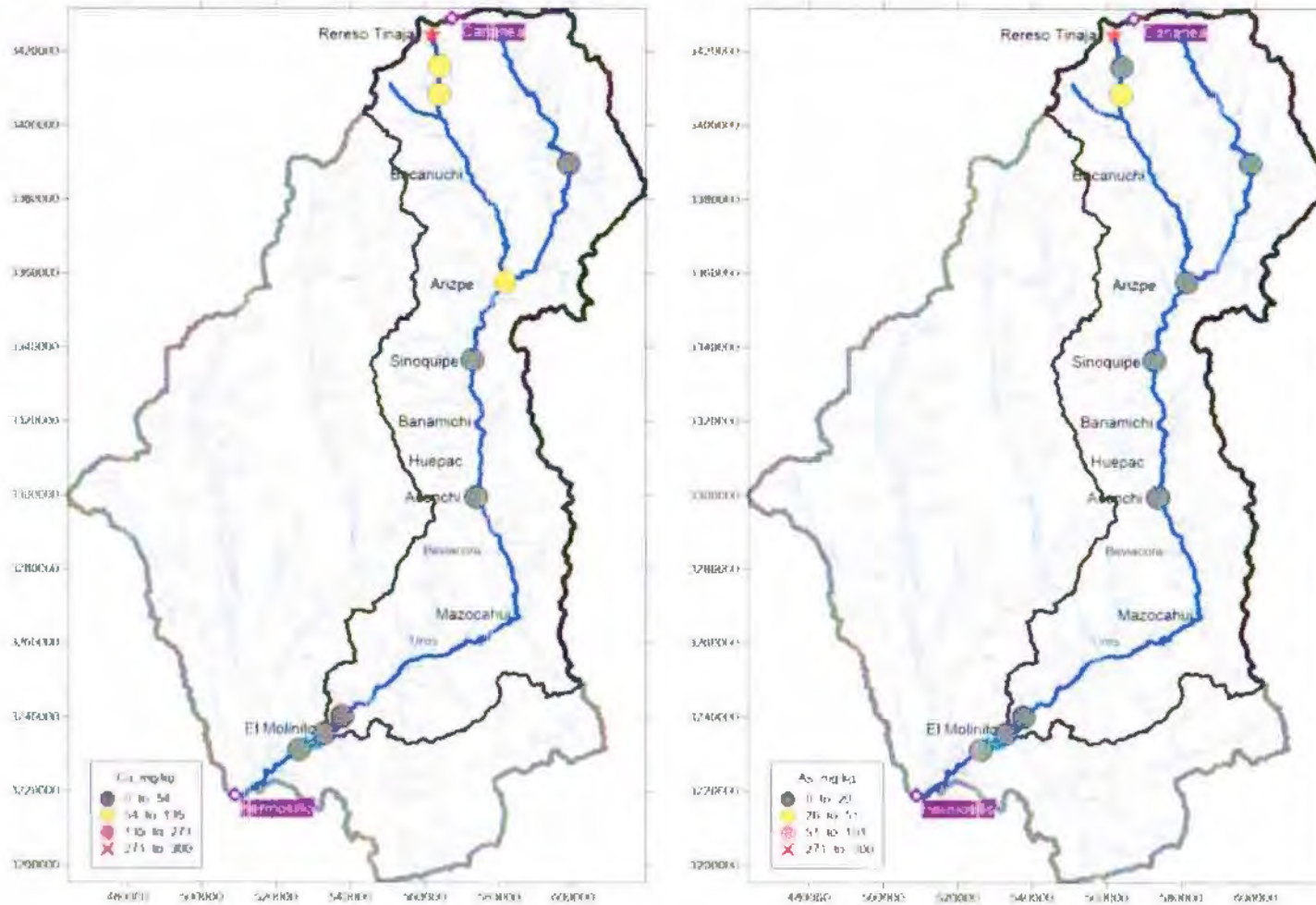


Figura 4.4 Distribución de la concentración total de cobre (Cu) y arsénico (As) en sedimentos de la cuenca alta, media y baja del río Sonora. Estos datos han sido generados en el muestreo análisis orientativo realizado por la UNAM

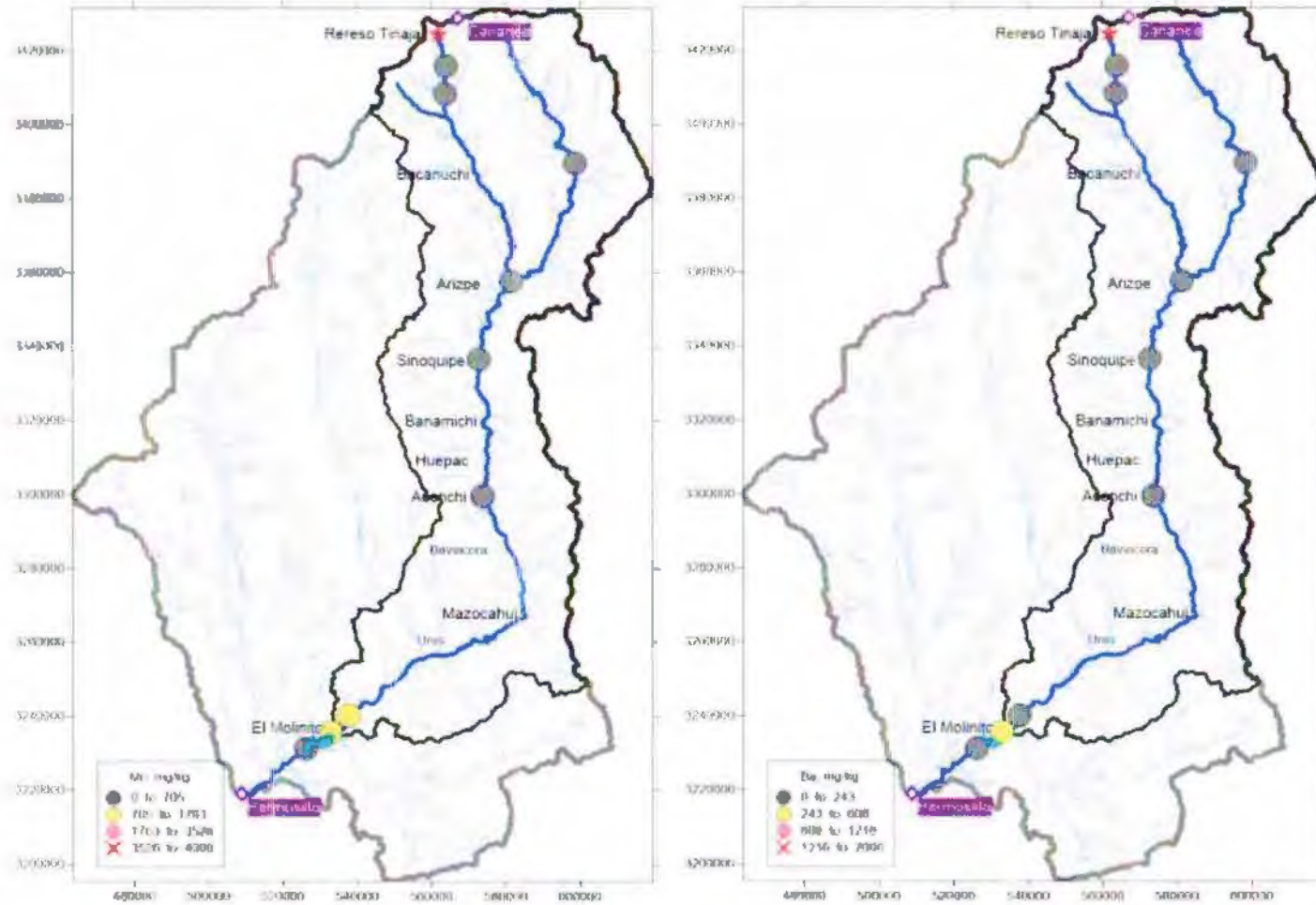


Figura 4.5 Distribución de la concentración total de manganeso (Mn) y bario (Ba) en sedimentos de la cuenca alta, media y baja del río Sonora. Estos datos han sido generados en el muestreo análisis orientativo realizado por la UNAM



## 4.2 Suelos

### A) Muestreo y análisis

Los datos analizados corresponden a muestreos realizados por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, consultores de Sonora y el laboratorio acreditado INTERTEK. Todos los análisis fueron realizados por Laboratorios INTERTEX.

En esta campaña de muestreo se colectaron 241 muestras de suelos dentro de la zona que se presume afectada por el derrame; además de 52 obtenidas en áreas fuera de la influencia del derrame. En este informe solamente se analizan los resultados de las muestras colectadas dentro de la zona que se presume contaminada por el derrame.

Se determinaron las concentraciones totales de los elementos químicos regulados en la Norma Oficial Mexicana aplicable (NOM-147) y otros de interés ambiental<sup>32</sup>

Los sitios de muestreo fueron seleccionados utilizando los criterios de la NMX-132<sup>33</sup>.

Los sitios para el muestreo se presentan en la Figura 4.6. La descripción de los sitios muestreados y sus respectivas coordenadas se presentan en la Tabla 4.3.

---

<sup>32</sup> Elementos regulados en la NOM-147: arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.  
Otros elementos de interés ambiental en la zona : aluminio, antimonio, cobre, hierro, manganeso y zinc

<sup>33</sup> NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.



**Figura 4.6. Ubicación de los sitios de muestreo de sedimentos de la cuenca del río Sonora para valorar la afectación del derrame de solución ácida ferro-cuprífera que se derramó el pasado 06 de agosto de 2014 del represo Tinajas 1 de Buena Vista del cobra, Cananea-Sonora**



X	Y	Clave			X	Y	Clave		
		Mapa	Campo	laboratorio			Mapa	Campo	laboratorio
563625	3406817	1	SLG-002-A	4781-06	578180	3352024	41	SLG-028-B	4855-01
563698	3406811	2	SLG-002-B	4781-07	578081	3351275	42	SLG-029-A	4855-05
565196	3401402	3	SLG-003-A	4794-26	578229	3351204	43	SLG-029-B	4855-03
565350	3401502	4	SLG-003-B	4794-28	576260	3349831	44	SLG-030-A	4811-04
567468	3396232	5	SLG-004-A	4794-42	576353	3349884	45	SLG-030-B	4911-02
567545	3396287	6	SLG-004-B	4794-43	575070	3349336	46	SLG-031-A	4855-12
568518	3394393	7	SLG-005-A	4794-46	575146	3349316	47	SLG-031-B	4855-14
568622	3394401	8	SLG-005-B	4794-44	576108	3345885	48	SLG-032-A	4889-05
571328	3390821	9	SLG-006-A	4794-48	576207	3346005	49	SLG-032-B	4889-03
571407	3390894	10	SLG-006-B	4794-50	574130	3345283	50	SLG-033-A	4828-20
572435	3386471	11	SLG-007-A	4829-13	574416	3345267	51	SLG-033-B	4828-18
572583	3386539	12	SLG-007-B	4829-08	573926	3341198	52	SLG-034-A	4828-17
572721	3385000	13	SLG-008-A	4829-14	574039	3340926	53	SLG-034-B	4828-15
572753	3385070	14	SLG-008-B	4829-16	573452	3339789	54	SLG-035-A	4828-13
573357	3384040	15	SLG-009-A	4829-18	573701	3339818	55	SLG-035-B	4828-09
573370	3384187	16	SLG-009-B	4829-20	572897	3336075	56	SLG-036-A	4828-07
574688	3382802	17	SLG-010-A	4890-01	573024	3336055	57	SLG-036-B	4828-06
574702	3382869	18	SLG-010-B	4829-21	572855	3333714	58	SLG-037-A	4828-03
576640	3380044	19	SLG-011-A	4829-27	572954	3333766	59	SLG-037-B	4828-01
576740	3380028	20	SLG-011-B	4829-25	575164	3324413	60	SLG-038-A	4826-07
579530	3376489	21	SLG-012-A	4890-10	575345	3324615	61	SLG-038-B	4826-05
579596	3376413	22	SLG-012-B	4890-12	575345	3321155	62	SLG-039-A	4826-03
580450	3373416	23	SLG-013-A	4890-07	575251	3320912	63	SLG-039-B	4826-01
580546	3373448	24	SLG-013-B	4890-06	575437	3316892	64	SLG-040-A	4759-04
580559	3371535	25	SLG-014-A	4890-15	576092	3316836	65	SLG-040-B	4759-02
580606	3371507	26	SLG-014-B	4890-13	574489	3311321	66	SLG-041-A	4853-04
581302	3368511	27	SLG-015-A	4890-04	575179	3311413	67	SLG-041-B	4759-06
581313	3368499	28	SLG-015-B	4890-02	575025	3309745	68	SLG-042-A	4853-02
580566	3363923	29	SLG-017-A	4758-03	575521	3309783	69	SLG-042-B	4759-08
580650	3364013	30	SLG-017-B	4758-02	574682	3306252	70	SLG-043-A	4853-01
581000	3359762	31	SLG-018-A	4758-08	575156	3306320	71	SLG-043-B	4778-02
581073	3359760	32	SLG-018-B	4758-07	573442	3303273	72	SLG-044-A	4778-05
582395	3357729	33	SLG-024-B	4777-04	574527	3303137	73	SLG-044-B	4778-04
580845	3356887	34	SLG-025-A	4777-03	574072	3299983	74	SLG-046-B	4796-02
580992	3356666	35	SLG-025-B	4777-01	573492	3299486	75	SLG-046-A	4796-03
580390	3356225	36	SLG-026-A	4777-10	575776	3296831	76	SLG-047-B	4796-06
580520	3356185	37	SLG-026-B	4777-07	578407	3290648	77	SLG-049-B	4796-09
578436	3354177	38	SLG-027-A	4855-10	574414	3301897	78	SLG-045-B	4887-01
578464	3354052	39	SLG-027-B	4855-08	573974	3302033	79	SLG-045-A	4887-03
578144	3351966	40	SLG-028-A	4797-14	575188	3296518	80	SLG-047-A	4887-04

Tabla 4.3 Coordenadas y descripción de los sitios seleccionados para el muestreo de suelos en cuenca del río Sonora



X	Y	Clave			X	Y	Clave		
		Mapa	Campo	laboratorio			Mapa	Campo	laboratorio
576459	3294725	81	SLG-048-B	4887-06	550888	3250516	121	SLG-069-A	4886-08
576096	3294515	82	SLG-048-A	4887-07	551347	3249899	122	SLG-069-B	4886-10
578060	3290423	83	SLG-049-A	4887-08	548561	3248512	123	SLG-070-A	4909-02
579874	3288883	84	SLG-050-A	4887-09	548708	3248087	124	SLG-070-B	4909-05
579924	3288500	85	SLG-050-B	4824-03	547457	3248573	125	SLG-071-A	4909-07
579969	3286777	86	SLG-051-A	4796-10	547412	3248299	126	SLG-071-B	4909-09
580158	3286841	87	SLG-051-B	4796-11	544614	3243894	127	SLG-072-A	4761-02
580919	3284887	88	SLG-052-A	4911-07	544621	3243616	128	SLG-072-B	4761-03
580906	3284983	89	SLG-052-B	4824-06	544894	3244111	129	SLG-073-A	4761-07
582381	3282590	90	SLG-053-A	4911-08	545400	3244509	130	SLG-073-B	4761-04
582702	3282211	91	SLG-053-B	4824-08	541479	3244147	131	SLG-074-A	4827-27
583240	3281057	92	SLG-054-A	4939-01	541445	3243939	132	SLG-074-B	4827-25
583373	3281015	93	SLG-054-B	4915-09	540341	3242721	133	SLG-075-A	4827-23
583146	3280331	94	SLG-055-A	4915-08	540440	3242536	134	SLG-075-B	4827-21
583568	3280414	95	SLG-055-B	4824-10	537697	3240624	135	SLG-076-A	4827-20
584182	3276535	96	SLG-056-A	4915-07	537946	3240224	136	SLG-076-B	4827-19
584320	3276575	97	SLG-056-B	4830-03	535613	3236777	137	SLG-077-A	4827-07
583558	3273519	98	SLG-057-A	4915-06	535791	3236341	138	SLG-077-B	4827-06
583769	3273509	99	SLG-057-B	4830-05	534545	3235465	139	SLG-078-A	4827-09
583980	3272519	100	SLG-058-A	4830-08	534442	3235014	140	SLG-078-B	4827-11
584311	3272345	101	SLG-058-B	4830-07	533633	3234210	141	SLG-079	4827-12
584532	3269348	102	SLG-059-A	4915-01	529963	3233678	142	SLG-080	4827-16
584385	3269076	103	SLG-060	4915-11	528254	3235145	143	SLG-081-A	4827-14
584520	3269061	104	SLG-060-B	4825-10	528267	3235168	144	SLG-081-B	4827-15
585012	3267388	105	SLG-061-A	4915-03	530237	3232501	145	SLG-082-A	4780-14
585247	3267425	106	SLG-061-B	4825-05	530198	3232499	146	SLG-082-B	4780-15
580735	3265755	107	SLG-062-A	4915-04	526977	3234790	147	SLG-083-A	4827-03
582865	3265968	108	SLG-062-B	4825-02	527047	3234844	148	SLG-083-B	4827-02
571193	3260984	109	SLG-063-A	4851-05	528538	3230142	149	SLG-084-A	4780-12
571163	3260723	110	SLG-063-B	4851-07	528504	3230010	150	SLG-084-B	4780-11
570126	3259967	111	SLG-064-A	4851-01	525925	3231133	151	SLG-085-A	4761-09
570142	3259600	112	SLG-064-B	4851-03	525967	3231122	152	SLG-085-B	4761-10
562090	3256466	113	SLG-065 B1	4939-03	522701	3229125	153	SLG-086-A	4761-14
562344	3256710	114	SLG-065-A	4851-09	522749	3229020	154	SLG-086-B	4761-12
562303	3256357	115	SLG-065-B	4851-11	523292	3226418	155	SLG-087-A	4761-16
557589	3255573	116	SLG-066 B1	4939-06	523156	3226119	156	SLG-087-B	4761-17
559304	3256844	117	SLG-066-A	4851-12	520078	3227531	157	SLG-088-A	4780-03
559611	3256194	118	SLG-066-B	4851-14	520078	3227531	158	SLG-088-B	4780-01
552449	3251931	119	SLG-068-A	4886-05	519556	3225516	159	SLG-089-A	4780-08
552936	3251527	120	SLG-068-B	4886-07	519534	3225468	160	SLG-089-B	4780-09

Tabla 4.3 Coordenadas y descripción de los sitios seleccionados para el muestreo de suelos en cuenca del río Sonora (continuación)



DIAGNÓSTICO - ESTUDIO RÍO SONORA  
UNAM-UNISON-ITSON

X	Y	Clave			X	Y	Clave		
		Mapa	Campo	laboratorio			Mapa	Campo	laboratorio
517820	3226905	161	SLG-090-A	4780-05	573050	3336111	201	PSL-10 B (25 m)	4888-19
517838	3226844	162	SLG-090-B	4780-06	573073	3336117	202	PSL-10 B (50 m)	4888-20
514380	3223881	163	SLG-091-A	4762-04	575325	3321173	203	PSL-11 A (25 m)	4910-01
514535	3223851	164	SLG-091-B	4762-01	575302	3321189	204	PSL-11 A (50 m)	4910-02
513953	3216919	165	SLG-092-A	4762-17	575518	3321142	205	PSL-11 B (25 m)	4910-08
513932	3216882	166	SLG-092-B	4762-19	574998	3309743	206	PSL-12 A (125 m)	4854-09
511028	3221469	167	SLG-093-A	4762-27	574996	3309744	207	PSL-12 A (25 m)	4854-07
511070	3221474	168	SLG-093-B	4762-29	574978	3309745	208	PSL-12 A (50 m)	4854-08
512958	3220657	169	SLG-094-A	4762-20	575254	3309604	209	PSL-12 B (25 m)	4854-06
512980	3220621	170	SLG-094-B	4762-23	573598	3299604	210	PSL-13 A (25 m)	4910-17
513570	3223405	171	SLG-095-A	4762-24	573573	3299598	211	PSL-13 A (50 m)	4910-19
513637	3223395	172	SLG-095-B	4762-26	573913	3299835	212	PSL-13 B (100 m)	4910-11
513362	3214608	173	SLG-096-A	4762-14	573878	3299775	213	PSL-13 B (25 m)	4910-09
513359	3214604	174	SLG-096-B	4762-16	573878	3299797	214	PSL-13 B (50 m)	4910-10
510535	3212958	175	SLG-097-A	4762-11	—	—	215	PSL-14 A (25 m)	4910-28
510576	3212900	176	SLG-097-B	4762-13	—	—	216	PSL-14 A (50 m)	4910-29
508592	3212819	177	SLG-098-A	4762-08	580935	3285089	217	PSL-14 B (100 m)	4910-22
508704	3212854	178	SLG-098-B	4762-10	580910	3285013	218	PSL-14 B (25 m)	4910-20
507996	3213008	179	SLG-099-A	4762-05	580921	3285036	219	PSL-14 B (50 m)	4910-21
508049	3213013	180	SLG-099-B	4762-07	585346	3287349	220	PSL-15 B (125 m)	4940-02
580153	3362026	181	SLG-100-A	4758-06	585281	3267410	221	PSL-15 B (50 m)	4940-01
580310	3362080	182	SLG-100-B	4758-05	570104	3260067	222	PSL-16 A (100 m)	4940-11
563795	3406801	183	PSL-05 A (100m)	4831-21	570117	3259996	223	PSL-16 A (25 m)	4940-08
583654	3408722	184	PSL-05 A (25m)	4831-18	570114	3280019	224	PSL-16 A (50 m)	4940-10
563582	3408700	185	PSL-05 A (50m)	4831-19	557706	3255852	225	PSL-17-A (25 m)	4935-24
563795	3406801	186	PSL-05 B (100m)	4831-24	557703	3255894	226	PSL-17-A (50 m)	4935-25
563726	3406773	187	PSL-05 B (25m)	4831-22	557839	3255661	227	PSL-17-B (100 m)	4935-29
563749	3406781	188	PSL-05 B (50m)	4831-23	557797	3255624	228	PSL-17-B (25 m)	4935-26
572415	3386460	189	PSL-06 A (25)	4829-12	557811	3255604	229	PSL-17-B (50 m)	4935-28
572347	3386426	190	PSL-06-A (100)	4829-10	535731	3236543	230	PSL-18-A (25 m)	4935-21
572394	3386450	191	PSL-08-A (50)	4829-11	535772	3236572	231	PSL-18-A (50 m)	4935-22
572605	3386553	192	PSL-06-B (25m)	4829-09	535845	3236371	232	PSL-18-B (100 m)	4935-20
582481	3357912	193	PSL-08 A (100 m)	4888-08	—	—	233	PSL-18-B (100 m)	4935-23
—	—	194	PSL-08 A (25 m)	4888-07	535778	3236441	234	PSL-18-B (25 m)	4935-18
582396	3357701	195	PSL-08 B (25 m)	4888-09	535799	3236409	235	PSL-18-B (50 m)	4935-19
582397	3357877	196	PSL-08 B (50 m)	4888-10	512883	3220717	236	PSL-19-A (100 m)	4935-12
580795	3356875	197	PSL-09 A (50 m)	4888-13	512954	3220669	237	PSL-19-A (25 m)	4935-10
581010	3356649	198	PSL-09 B (25 m)	4888-11	512932	3220690	238	PSL-19-A (50 m)	4935-11
581033	3356640	199	PSL-09 B (50 m)	4888-12	513074	3220554	239	PSL-19-B (100 m)	4935-09
573127	3336118	200	PSL-10 B (100 m)	4888-21	513021	3220628	240	PSL-19-B (25 m)	4935-07

Tabla 4.3 Coordenadas y descripción de los sitios seleccionados para el muestreo de suelos en cuenca del río Sonora (continuación)



## B) Resultados

Para interpretar los resultados se consideraron los valores genéricos de referencia señalados en Norma Oficial Mexicana NOM-147<sup>34</sup> (Tabla 4.4). Para los elementos no contemplados en la NOM-147 se seleccionaron los valores de referencia de la US-EPA<sup>35</sup>. Estos valores genéricos de referencia están calculados considerando el riesgo a la salud humana y asumiendo la biodisponibilidad total de los contaminantes considerados.

Elementos potencialmente tóxicos	Uso agrícola/ residencial/ comercial
	(mg/Kg)
<b>NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004</b>	
Arsénico (As)	22
Bario (Ba)	5400
Berilio (Be)	150
Cadmio (Cd)	37
Cromo Hexavalente (Cr VI)	280
Mercurio (Hg)	23
Níquel (Ni)	1600
Plata (Ag)	390
Plomo (Pb)	400
Selenio (Se)	390
Talio (Tl)	5.2
Vanadio (V)	78
<b>Regional Screening Level (RSL) Resident Soil Table (TR=1E-6, HQ=1) May 2014</b>	
Hierro (Fe)	55000
Aluminio (Al)	78000
Antimonio (Sb)	31
Manganeso (Mn)	1900
Cromo total (Cr)	
Cobre (Cu)	3100
Zinc (Zn)	23000

**Tabla 4.4 Valores genéricos de referencia que marcan los límites permisibles en suelos**

<sup>34</sup> Elementos regulados en la NOM-147: arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

<sup>35</sup> Regional Screening Level (RSL) Resident Soil Table (TR=1E-6, HQ=1) May 2014





Las concentraciones totales de Se, Be, Cd, Ag, Tl, Hg y Cr VI son inferiores al límite de detección de la técnica de análisis. Por otro lado, las concentraciones totales de Ba, Ni, Al, Cr, Mn, Zn y Cu son inferiores a los valores genéricos de referencia. Estos resultados permiten concluir que estos metales (Se, Be, Cd, Ag, Tl, Hg y Cr VI, Ba, Ni, Al, Cr, Mn, Zn y Cu) no representan un riesgo para la salud humana.

### **B.1) Concentración total los Elementos traza<sup>36</sup>**

De los elementos traza que fueron detectados por la técnica de análisis y que en alguna de las muestras se superó el valor de referencia genérico (As, V y Pb), el arsénico y el vanadio (V) parecen tener una distribución similar.

La distribución de las concentraciones totales de arsénico parece indicar que el impacto del derrame en los suelos parece extenderse desde el Represo "Tinajas 1" hasta Bacanuchi y posiblemente, hasta Arizpe. Desde Arizpe hasta casi el Molinito, hay algunas muestras con valores de As que superan el valor genérico de referencia.

Sin embargo, las anomalías, naturales o asociadas a actividades mineras antiguas, de As, y de otros elemento traza, desde Banamichi hasta Mazacohau, en el flanco este de la cuenca, permite especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame del represo "Tinajas 1" que pueda deberse a zonas mineralizadas de la zona (Figura 4.7).

En el caso del plomo (Pb), solamente en dos muestras (una cercana a Huepac y otra unos 15 km antes de El Molinito y dadas las anomalías naturales naturales o

---

<sup>36</sup> De la lista de elementos químicos sistemáticamente han venido analizando en la cuenca del río Sonora, el Sb, As, Ba, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn se clasifican geoquímicamente como elemento traza, que son los que están presentes de manera natural en bajas concentraciones (< 0.1%) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos).



asociadas a actividades mineras antiguas de Pb desde Banamichi hasta Mazacohau, en el flanco este de la cuenca, permite especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame del represo "Tinajas 1" que pueda deberse a zonas mineralizadas de la zona (Figura 4.8).

## **B.2) Concentración total los Elementos mayores<sup>37</sup>**

De los elementos mayores (Al, Fe y Mn), solamente en el caso del Fe se superó el valor genérico de referencia en un par de muestras (en las cercanías de el Molinito)

Al igual que en el caso del plomo (Pb), dadas las anomalías naturales naturales o asociadas a actividades mineras antiguas, de Fe a partir de Baviácora hasta Mazacohau, tanto en el flanco oeste y este de la cuenca, se puede especular sobre una fuente de contaminación distinta al derrame del represo "Tinajas 1" que pueda deberse a zonas mineralizadas de la zona (Figura 4.9).

---

<sup>37</sup> Como ya se ha venido mencionando, de la lista de elementos químicos sistemáticamente han venido analizando en la cuenca del río Sonora, el Al, Fe y Mn se clasifican geoquímicamente como elemento mayores que son los que están presentes de manera natural en altas concentraciones (> 1.0% ) en la corteza terrestre (rocas, suelos, sedimentos).



## ARSÉNICO

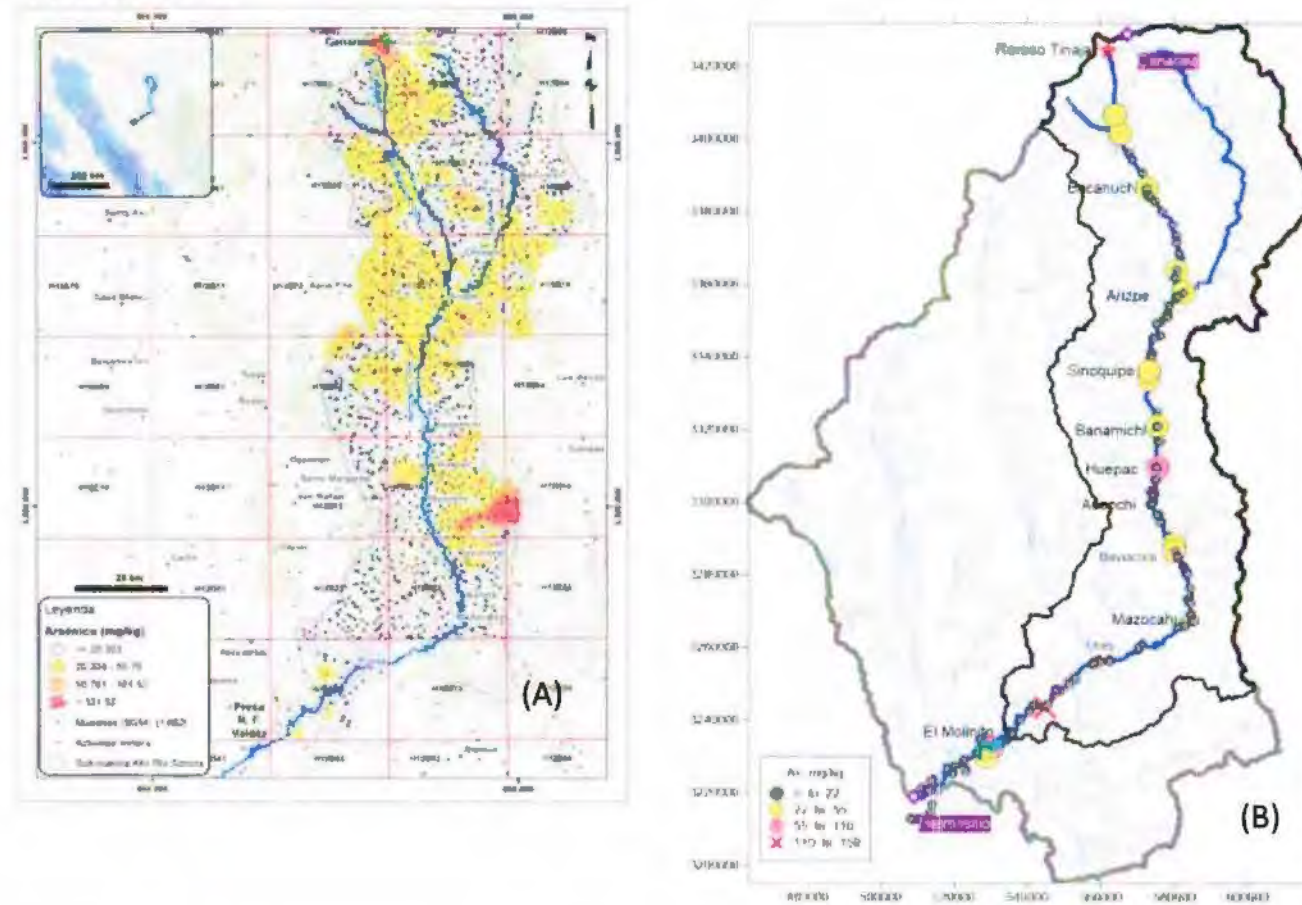


Figura 4.7 Distribución de la concentración total de arsénico (As): (A) Sedimentos muestreado por le SGM entre 1993 y 2005 y (B) Suelos muestreado en este proyecto



DIAGNÓSTICO - ESTUDIO RÍO SONORA  
UNAM-UNISON-ITSON

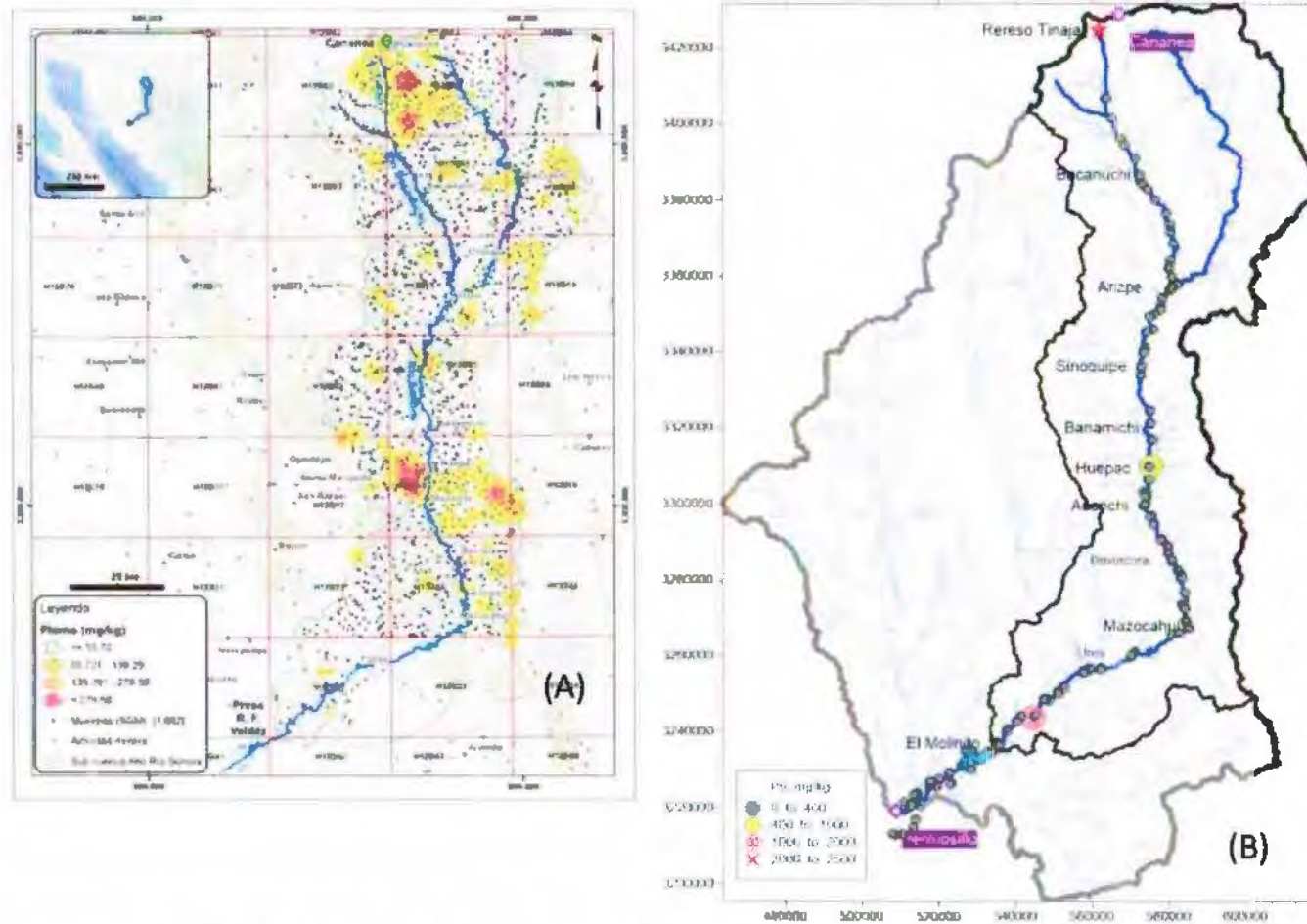


Figura 4.8 Distribución de la concentración total de plomo (Pb): (A) Sedimentos muestreado por le SGM entre 1993 y 2005 y (B) Suelos muestreado en este proyecto

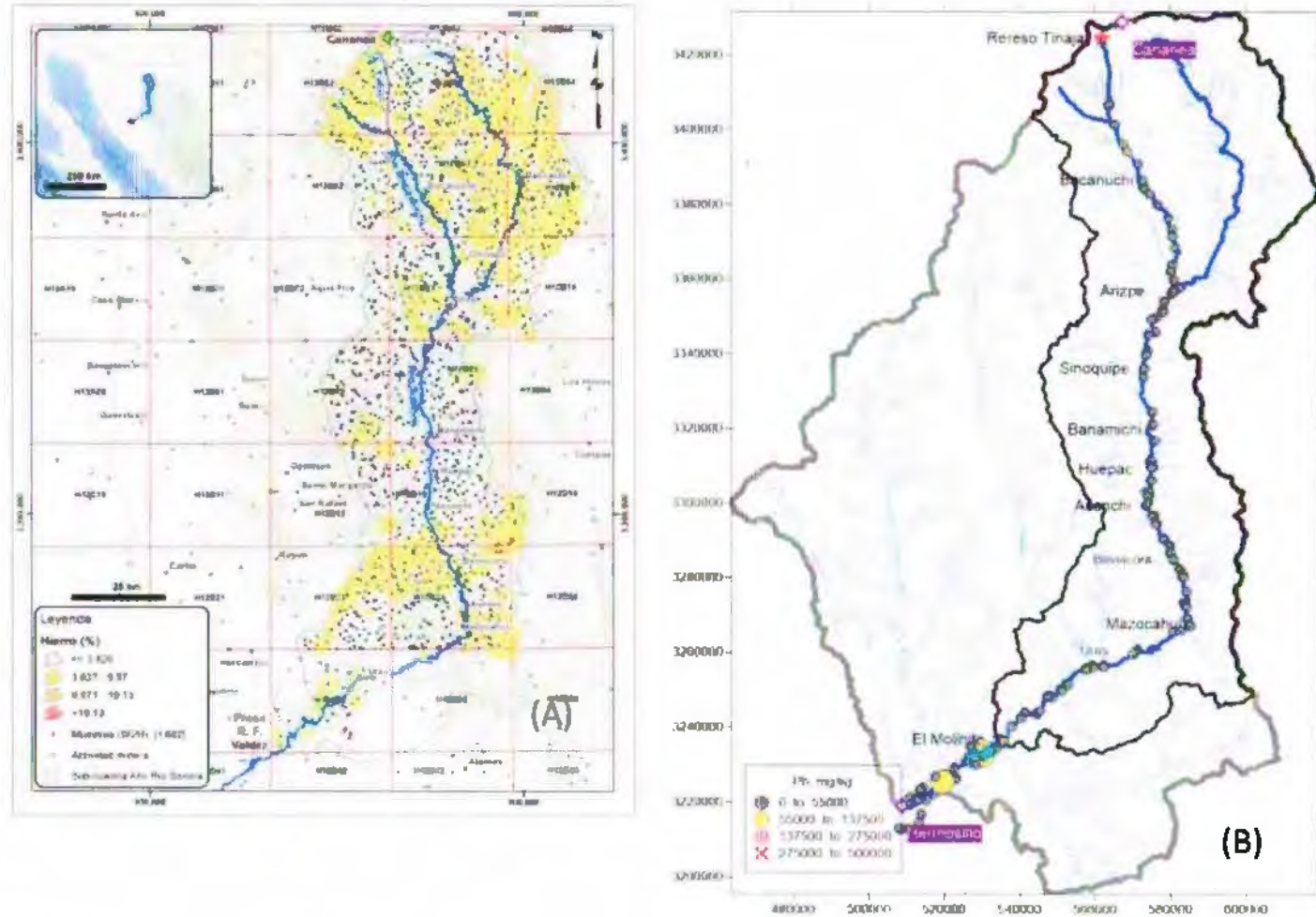


Figura 4.9 Distribución de la concentración total de hierro (Fe): (A) Sedimentos muestreado por le SGM entre 1993 y 2005 y (B) Suelos muestreado en este proyecto



### **4.3 Interpretación geoquímica de suelos y sedimentos través de análisis estadístico**

Los datos analizados corresponden a muestreos realizados por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el laboratorio acreditado INTERTEK. Todos los análisis fueron realizados por Laboratorios INTERTEX. Del total de muestras tomadas (en las zonas dentro y fuera de la influencia del derrame) se consideran en este análisis aquellas cuya ubicación es totalmente clara.

En las Tablas 4.5 – 4.9 se muestra la estadística descriptiva de los resultados en suelos y sedimentos tomados en la zona dentro de la influencia del derrame y en la zona que se presume no afectada por el derrame.

En el caso de los suelos, en la zona que se resume afectada por el derrame, hay algunos sitios que sobrepasan los valores de referencia para el caso del As (n = 22), V (n = 6), Pb (n = 2) y Fe (n = 1).

Sin embargo, es importante notar que en los suelos fuera de la influencia del derrame se determinaron las mayores concentraciones de vanadio y en mayor cantidad de muestras (en 11 muestras se excede el valor de referencia de la NOM-147). En el caso del As, en 3 muestras de los suelos de referencia se excede el límite de la NOM-147. Este comportamiento sugiere una fuente de contaminación adicional al derrame.

En el caso de los sedimentos, en la zona que se presumen contaminada por el derrame, las concentraciones totales de los contaminantes estudiados en los sedimentos (dentro y fuera de la zona de influencia del derrame) están dentro de los intervalos de los valores reportados por el SGM en los sedimentos activos de la cuenca del río Sonora (SGM, 1993 – 2005); lo que amerita un estudio más específico para poder delimitar los sedimentos afectados por el derrame de Buena Vista del Cobre.



Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	CRT
						(mg/Kg)
						mg/kg
As	157	5.0	158.5	15.3	13.2	22a
Se	157	5.0	5.0	5.0	0.0	390a
Ba	157	25.6	1457.0	209.3	166.1	5400a
Be	157	1.0	2.0	1.9	0.3	150a
Cd	157	1.0	4.5	1.9	0.3	37a
Ag	157	1.0	2.6	1.9	0.3	390a
Pb	157	5.0	1428.0	30.3	113.3	400a
V	157	10.0	142.6	44.6	19.1	78a
Ni	157	2.5	67.6	13.1	6.8	1600a
Al	157	77.9	32801.4	14237.8	6998.1	76000b
Cr	157	3.9	51.9	13.4	6.7	210b
Fe	157	5372.6	60887.2	27164.4	9280.6	23000b
Mn	157	34.5	1493.6	467.3	202.1	1800b
Zn	157	2.5	52.3	13.0	6.9	23000b
Cu	157	2.5	100.5	29.5	19.7	3100b

(a) NOM-147-SEMARNAT\_ssa1-2004; (b) RSG US-EPA2014.

**Tabla 4.5 Estadística descriptiva en muestras de suelos dentro de la zona de influencia del derrame**

Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	CRT
						(mg/Kg)
						mg/kg
As	44	5.0	25.6	12.2	4.3	22a
Ba	44	5.0	978.6	163.7	146.0	5400a
Be	44	1.0	2.1	2.0	0.2	150a
Cd	44	1.0	2.0	2.0	0.2	37a
Ag	44	1.0	9.5	2.1	1.2	390a
Pb	44	5.0	103.8	35.0	28.4	400a
V	44	11.8	129.0	51.5	30.4	78a
Ni	44	2.5	112.0	16.1	18.3	1600a
Al	44	5000.0	28122.9	15508.7	5505.9	76000b
Cr	44	4.7	44.3	20.7	10.0	210b
Fe	44	11265.7	52737.4	35518.0	10133.0	23000b
Mn	44	270.1	1017.1	559.1	198.2	1800b
Zn	44	2.5	45.2	19.1	9.8	23000b
Cu	44	8.3	138.3	53.6	28.0	3100b

(a) NOM-147-SEMARNAT\_ssa1-2004; (b) RSG US-EPA2014.

**Tabla 4.6 Estadística descriptiva en muestras de suelos de referencia (fuera de la zona de influencia del derrame)**



Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
As	85	10.0	46.4	16.5	7.2
Ba	85	20.3	535.4	209.4	102.2
Be	85	1.0	2.0	1.9	0.3
Cd	85	1.0	2.0	1.9	0.3
Ag	85	1.0	2.0	1.9	0.3
Pb	85	5.0	1010.0	41.4	109.3
V	85	8.0	124.9	44.1	20.5
Ni	85	4.3	35.6	14.5	5.7
Al	85	1763.9	40025.1	16356.6	8094.5
Cr	85	2.5	53.9	13.7	7.3
Fe	85	2634.7	83283.0	27412.7	10732.0
Mn	85	26.6	1253.8	537.6	270.1
Zn	85	2.5	55.6	13.0	7.3
Cu	85	2.5	175.4	56.4	44.2

Tabla 4.7 Estadística descriptiva en muestras de sedimentos dentro de la zona de influencia

Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
As	54	5.0	81.2	21.5	16.6
Ba	54	46.4	395.4	205.1	99.6
Be	54	1.0	2.0	1.9	0.4
Cd	54	1.0	2.0	1.9	0.4
Ag	54	1.0	2.0	1.9	0.4
Pb	54	5.0	115.9	30.9	23.8
V	54	5.0	124.0	45.9	24.2
Ni	54	5.0	45.8	15.7	8.3
Al	54	1677.0	36060.0	16625.9	7986.6
Cr	54	4.0	103.7	15.7	14.0
Fe	54	7619.6	65600.2	30425.5	11166.8
Mn	54	92.5	1299.3	579.7	272.6
Zn	54	3.2	106.9	15.1	14.7
Cu	54	2.5	349.1	50.7	58.1

Tabla 4.8 Estadística descriptiva en muestras de sedimentos de referencia (tributarios fuera de la zona de influencia del derrame)





Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	CR <sub>T</sub>
						(mg/Kg)
		mg/kg				
As	339	5.0	158.5	16.1	12.0	22 <sup>a</sup>
Ba	339	5.0	1457.0	202.9	140.8	5400 <sup>a</sup>
Be	339	1.0	2.1	1.9	0.3	150 <sup>a</sup>
Cd	339	1.0	4.5	1.9	0.3	37 <sup>a</sup>
Ag	339	1.0	9.5	1.9	0.5	390 <sup>a</sup>
Pb	339	5.0	1428.0	33.7	95.4	400 <sup>a</sup>
V	339	5.0	142.6	45.5	22.1	78 <sup>a</sup>
Ni	339	2.5	112.0	14.3	9.2	1600 <sup>a</sup>
Al	339	77.9	40025.1	15335.9	7323.2	76000 <sup>b</sup>
Cr	339	2.5	103.7	14.8	9.1	210 <sup>b</sup>
Fe	339	2634.7	83283.0	28819.9	10440.5	23000 <sup>b</sup>
Mn	339	26.6	1493.6	515.0	236.0	1800 <sup>b</sup>
Zn	339	2.5	106.9	14.1	9.3	23000 <sup>b</sup>
Cu	339	2.5	349.1	42.4	37.6	3100 <sup>b</sup>

(a) NOM-147-SEMARNAT\_ssa1-2004; (b) RSG US-EPA2014.

**Tabla 4.9 Estadística descriptiva general**

### A) Interpretación general

En general, en los suelos dentro de la zona de influencia hay una clara correlación de plomo con arsénico con un coeficiente de Pearson igual a 0.881 (Tabla 4.10).

Esta correlación no se encuentra en las muestras de sedimentos dentro y fuera de la zona de influencia o suelos de referencia (Tablas 4.11 - 4.14), lo que indica una posible fuente puntual que pudiera relacionarse a una zona mineralizada (poca probabilidad de acuerdo a la tipología de yacimientos minerales en la zona) o a la actividad agrícola, por lo que se sugiere realizar estudios específicos en las áreas con altas concentraciones de arsénico y plomo.

Los valores más elevados para As y Pb se relacionan con las siguientes áreas: Banamichi-Huépac-San Felipe de Jesús, y cercanías a Baviácora, en estas zonas



hay actividad agrícola intensa por lo que se sugieren estudios detallados sobre residuos de plaguicidas (arseniatos de plomo) posiblemente usados en el pasado.

Es probable que los valores de As-Pb no se relacionen con actividades mineras, ya que la correlación importante solo se detectó en suelos y no en suelos de referencia y de la zona impactada. La Figura 4.10 muestra el resultado del estudio de análisis de componentes principales para suelos y su comparativo con la zona impactada y los suelos de referencia. Las figuras muestran firmas geoquímicas muy distintas, por lo que se sugiere realizar estudios detallados por zona para identificar las fuentes de metales.

La zona impactada y los sedimentos de los tributarios solo muestran correlación para Cr y Zn.

En general el Cr y Zn están correlacionados en todas las muestras, independientemente si son sedimentos de tributarios, suelos de referencia, suelos ó muestras colectadas en la zona impactada (Tablas 4.11 – 4.13). Esto indica un origen común de estos metales, sin embargo la tipología de los minerales y las asociaciones geoquímicas en rocas no muestran un proceso común natural, es decir no hay minerales que contengan ambos elementos en cantidades proporcionales, por lo que se sugiere consultar el uso de morteros de wolframio ó de acero para evaluar posible contaminación por Cr-Zn durante la pulverización de las muestras, ya que se ha documentado ampliamente la contaminación por estos elementos al no utilizar morteros de ágata<sup>38</sup>.

El diagrama de PCA muestra dos grupos de variables claramente relacionadas: Pb-As y Cu-Mn-V-Ni-Fe-Al-Cr-Zn, con Ba ligeramente separado. Esto indica que Pb-As tienen un origen común, y el otro grupo de metales pueden compartir fuentes comunes.

---

<sup>38</sup> Hickson, C.J., Jura, S.J. 1986. Sampling contamination by grinding. *Mineralogist* Vol. 24: 585-589.

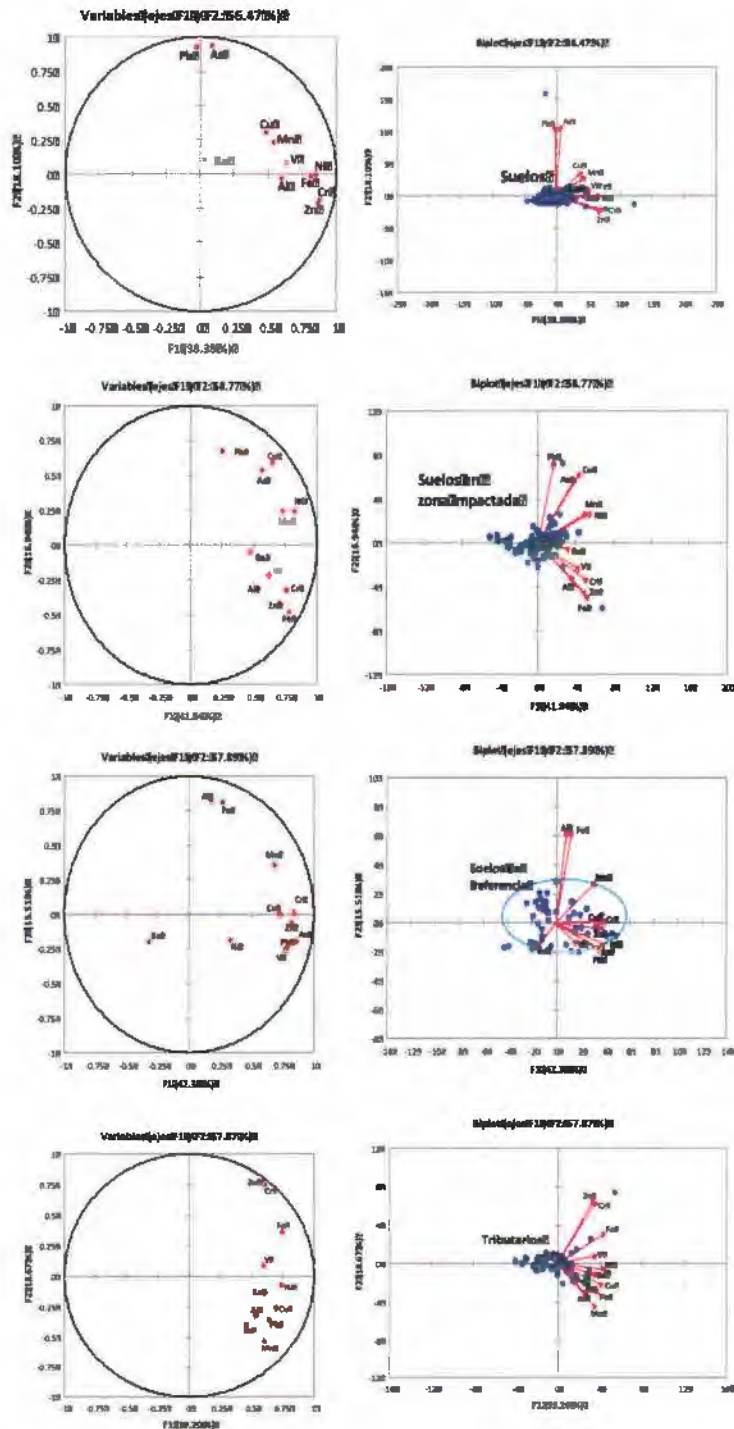


Figura 4.10 Resultados del análisis de componentes principales



Variables	As	Ba	Be	Cd	Ag	Pb	V	Ni	Al	Cr	Fe	Mn	Zn	Cu
As	1	0.012	0.071	0.562	0.206	0.881	0.16	0.048	0.02	-0.042	0.107	0.126	-0.059	0.167
Ba	0.012	1	0.037	0.015	0.033	-0.015	-0.043	0.077	0.082	-0.093	0.063	0.108	-0.101	0.151
Be	0.071	0.037	1	0.814	0.988	0.035	-0.016	0.089	-0.027	0.043	0.013	-0.009	0.041	0.002
Cd	0.562	0.015	0.814	1	0.895	0.603	0.008	0.031	-0.057	-0.024	-0.043	-0.009	-0.039	0.027
Ag	0.206	0.033	0.988	0.895	1	0.189	-0.01	0.077	-0.036	0.027	-0.002	-0.009	0.021	0.009
Pb	0.881	-0.015	0.035	0.603	0.189	1	0.054	-0.042	-0.056	-0.084	-0.072	0.055	-0.108	0.108
V	0.16	-0.043	-0.016	0.008	-0.01	0.054	1	0.657	0.24	0.479	0.42	0.128	0.479	0.203
Ni	0.048	0.077	0.089	0.031	0.077	-0.042	0.657	1	0.413	0.688	0.559	0.438	0.679	0.377
Al	0.02	0.082	-0.027	-0.057	-0.036	-0.056	0.24	0.413	1	0.417	0.503	0.305	0.41	0.271
Cr	-0.042	-0.093	0.043	-0.024	0.027	-0.084	0.479	0.688	0.417	1	0.674	0.288	0.996	0.24
Fe	0.107	0.063	0.013	-0.043	-0.002	-0.072	0.42	0.559	0.503	0.674	1	0.441	0.677	0.307
Mn	0.126	0.108	-0.009	-0.009	-0.009	0.055	0.128	0.438	0.305	0.288	0.441	1	0.259	0.53
Zn	-0.059	-0.101	0.041	-0.039	0.021	-0.108	0.479	0.679	0.41	0.996	0.677	0.259	1	0.21
Cu	0.167	0.151	0.002	0.027	0.009	0.108	0.203	0.377	0.271	0.24	0.307	0.53	0.21	1

Tabla 4.10 Matriz de correlación para muestras de suelos dentro de la zona de influencia



Variables	As	Ba	Be	Cd	Ag	Pb	V	Ni	Al	Cr	Fe	Mn	Zn	Cu
As	1	-0.193	0.374	0.369	-0.009	0.716	0.698	0.219	0.027	0.606	0.037	0.555	0.579	0.722
Ba	-0.193	1	-0.551	-0.557	-0.184	-0.202	-0.145	0.046	0.066	-0.314	-0.36	-0.094	-0.268	-0.161
Be	0.374	-0.551	1	0.998	0.214	0.19	0.281	0.153	0.151	0.288	0.469	0.278	0.269	0.352
Cd	0.369	-0.557	0.998	1	0.216	0.192	0.269	0.151	0.148	0.281	0.474	0.273	0.261	0.344
Ag	-0.009	-0.184	0.214	0.216	1	0.007	-0.078	-0.04	-0.03	0.03	0.144	0.235	0.011	0.179
Pb	0.716	-0.202	0.19	0.192	0.007	1	0.631	0.049	-0.184	0.536	0.102	0.549	0.504	0.622
V	0.698	-0.145	0.281	0.269	-0.078	0.631	1	0.23	-0.02	0.646	0.08	0.301	0.661	0.387
Ni	0.219	0.046	0.153	0.151	-0.04	0.049	0.23	1	0.116	0.293	-0.19	0.192	0.334	0.292
Al	0.027	0.066	0.151	0.148	-0.03	-0.184	-0.02	0.118	1	0.166	0.511	0.45	0.131	0.087
Cr	0.606	-0.314	0.288	0.281	0.03	0.536	0.646	0.293	0.166	1	0.237	0.421	0.975	0.369
Fe	0.037	-0.36	0.469	0.474	0.144	0.102	0.08	-0.19	0.511	0.237	1	0.301	0.16	0.173
Mn	0.555	-0.094	0.278	0.273	0.235	0.549	0.301	0.192	0.45	0.421	0.301	1	0.385	0.644
Zn	0.579	-0.268	0.269	0.261	0.011	0.504	0.661	0.334	0.131	0.975	0.16	0.385	1	0.352
Cu	0.722	-0.161	0.352	0.344	0.179	0.622	0.387	0.292	0.087	0.369	0.173	0.644	0.352	1

Tabla 4.11 Matriz de correlación para muestras de suelos fuera de la zona de influencia (suelos de referencia)



Variables	As	Ba	Be	Cd	Ag	Pb	V	Ni	Al	Cr	Fe	Mn	Zn	Cu
As	1	0.256	-0.031	-0.031	-0.031	0.249	0.267	0.428	0.082	0.222	0.236	0.518	0.155	0.685
Ba	0.256	1	-0.154	-0.154	-0.154	-0.098	0.311	0.339	0.521	0.056	0.37	0.499	0.035	0.198
Be	-0.031	-0.154	1	1	1	0.045	0.038	-0.002	-0.373	-0.001	-0.131	-0.244	0.003	0.032
Cd	-0.031	-0.154	1	1	1	0.045	0.038	-0.002	-0.373	-0.001	-0.131	-0.244	0.003	0.032
Ag	-0.031	-0.154	1	1	1	0.045	0.038	-0.002	-0.373	-0.001	-0.131	-0.244	0.003	0.032
Pb	0.249	-0.098	0.045	0.045	0.045	1	-0.091	0.487	-0.135	0.179	-0.108	0.199	0.097	0.44
V	0.267	0.311	0.038	0.038	0.038	-0.091	1	0.579	0.199	0.441	0.506	0.239	0.438	0.286
Ni	0.428	0.339	-0.002	-0.002	-0.002	0.487	0.579	1	0.291	0.556	0.431	0.556	0.492	0.584
Al	0.082	0.521	-0.373	-0.373	-0.373	-0.135	0.199	0.291	1	0.23	0.576	0.642	0.22	0.107
Cr	0.222	0.056	-0.001	-0.001	-0.001	0.179	0.441	0.556	0.23	1	0.712	0.298	0.993	0.326
Fe	0.236	0.37	-0.131	-0.131	-0.131	-0.108	0.506	0.431	0.576	0.712	1	0.432	0.714	0.264
Mn	0.518	0.499	-0.244	-0.244	-0.244	0.199	0.239	0.556	0.642	0.298	0.432	1	0.234	0.57
Zn	0.155	0.035	0.003	0.003	0.003	0.097	0.438	0.492	0.22	0.993	0.714	0.234	1	0.24
Cu	0.685	0.198	0.032	0.032	0.032	0.44	0.286	0.584	0.107	0.326	0.264	0.57	0.24	1

Tabla 4.12 Matriz de correlación para muestras de sedimentos dentro de la zona de influencia



Variabes	As	Ba	Be	Cd	Ag	Pb	V	Ni	Al	Cr	Fe	Mn	Zn	Cu
As	1	0.02	-0.005	-0.005	-0.005	0.579	0.139	0.222	0.204	0.051	0.307	0.305	0.018	0.508
Ba	0.02	1	0.179	0.179	0.179	0.362	0.44	0.575	0.399	0.23	0.211	0.421	0.218	0.249
Be	-0.005	0.179	1	1	1	0.086	0.137	0.135	-0.078	0.1	0.097	-0.152	0.121	0.009
Cd	-0.005	0.179	1	1	1	0.086	0.137	0.135	-0.078	0.1	0.097	-0.152	0.121	0.009
Ag	-0.005	0.179	1	1	1	0.086	0.137	0.135	-0.078	0.1	0.097	-0.152	0.121	0.009
Pb	0.579	0.362	0.086	0.086	0.086	1	0.268	0.473	0.092	0.201	0.216	0.468	0.155	0.602
V	0.139	0.44	0.137	0.137	0.137	0.268	1	0.577	0.197	0.258	0.447	0.09	0.253	0.354
Ni	0.222	0.575	0.135	0.135	0.135	0.473	0.577	1	0.292	0.34	0.323	0.37	0.323	0.473
Al	0.204	0.399	-0.078	-0.078	-0.078	0.092	0.197	0.292	1	0.064	0.506	0.705	0.051	0.237
Cr	0.051	0.23	0.1	0.1	0.1	0.201	0.258	0.34	0.064	1	0.683	0.035	0.996	0.253
Fe	0.307	0.211	0.097	0.097	0.097	0.216	0.447	0.323	0.506	0.683	1	0.342	0.675	0.384
Mn	0.305	0.421	-0.152	-0.152	-0.152	0.468	0.09	0.37	0.705	0.035	0.342	1	0.004	0.474
Zn	0.018	0.218	0.121	0.121	0.121	0.155	0.253	0.323	0.051	0.996	0.675	0.004	1	0.226
Cu	0.508	0.249	0.009	0.009	0.009	0.602	0.354	0.473	0.237	0.253	0.384	0.474	0.226	1

Tabla 4.13 Matriz de correlación para muestras de sedimentos fuera de la zona de influencia (tributarlos)



Variables	As	Ba	Be	Cd	Ag	Pb	V	Ni	Al	Cr	Fe	Mn	Zn	Cu
As	1	0.042	0.016	0.281	0.025	0.611	0.171	0.128	0.094	0.041	0.143	0.261	0.017	0.364
Ba	0.042	1	-0.046	-0.049	-0.065	-0.028	0.048	0.13	0.198	-0.062	0.05	0.187	-0.058	0.101
Be	0.016	-0.046	1	0.91	0.6	0.04	0.072	0.076	-0.138	0.082	0.039	-0.1	0.085	0.021
Cd	0.281	-0.049	0.91	1	0.57	0.366	0.071	0.05	-0.144	0.049	0.009	-0.096	0.047	0.017
Ag	0.025	-0.065	0.6	0.57	1	0.068	0.004	0.011	-0.095	0.065	0.063	-0.007	0.057	0.049
Pb	0.611	-0.028	0.04	0.366	0.068	1	0.046	0.092	-0.068	0.042	-0.053	0.134	0.008	0.243
V	0.171	0.048	0.072	0.071	0.004	0.046	1	0.457	0.181	0.441	0.393	0.18	0.438	0.27
Ni	0.128	0.13	0.076	0.05	0.011	0.092	0.457	1	0.267	0.423	0.269	0.352	0.418	0.368
Al	0.094	0.198	-0.138	-0.144	-0.095	-0.068	0.181	0.267	1	0.231	0.513	0.516	0.219	0.219
Cr	0.041	-0.062	0.082	0.049	0.065	0.042	0.441	0.423	0.231	1	0.827	0.241	0.991	0.292
Fe	0.143	0.05	0.039	0.009	0.063	-0.053	0.393	0.269	0.513	0.627	1	0.413	0.613	0.302
Mn	0.261	0.187	-0.1	-0.096	-0.007	0.134	0.18	0.352	0.516	0.241	0.413	1	0.2	0.546
Zn	0.017	-0.058	0.085	0.047	0.057	0.008	0.438	0.418	0.219	0.991	0.613	0.2	1	0.246
Cu	0.364	0.101	0.021	0.017	0.049	0.243	0.27	0.368	0.219	0.292	0.302	0.546	0.246	1

Tabla 4.14 Matriz de correlación general





## **B) Distribución espacial de metales y metaloides en suelos**

La distribución espacial del arsénico en suelos se asocia a dos tipos de áreas (Figura 4.11): en el sitio donde ocurrió el derrame (zona Tinajas) y en cercanías a zonas agrícolas al sur de Ures, en Pesqueira en las cercanías a Hermosillo y en las cercanías a la presa Rodolfo Félix Valdéz (El Molinito). El análisis espacial concuerda con el análisis de componentes principales al asociar el arsénico a otras fuentes adicionales al de la zona impactada, por lo que se sugieren estudios más detallados para identificar estas fuentes diferentes.

La distribución del arsénico en los sedimentos de los tributarios muestra claramente tres áreas (Figura 4.12) con concentraciones anómalas de este elemento: (i) la zona impactada directamente (zona Tinajas en el mapa), (ii) un área al sur de Arizpe que pudiera ser reflejo de dos procesos separados o combinados: erosión de rocas mineralizadas de la zona ó impacto de las zonas agrícolas, y (iii) una tercera zona en las cercanías a la presa El Molinito, con importante actividad agrícola y también es el reservorio de sedimentos más importante del Río Sonora. Se sugieren estudios detallados en estas áreas para poder determinar no solo el comportamiento de los elementos potencialmente tóxicos sino también la fuente de los mismos.

El plomo en sedimentos presenta un comportamiento espacial similar al arsénico (Figuras 4.14), con la excepción de una zona de tributarios al norte de Arizpe y en la zona de Bacanuchi. En el caso de las zonas al sur de Arizpe y en las cercanías a la presa El Molinito, se debe investigar si la correlación Pb-As en los suelos detectada a partir del Análisis de Componentes Principales es debido al uso pasado de plaguicidas arsenicales ó alguna otra fuente.

La distribución espacial, en sedimentos, del Ba, Al, V y Ni (Figuras 4.16 – 4.19) también sugieren la presencia de tres zonas que requieren estudios de detalle para identificar las fuentes de contaminación adicionales a derrame de Buena Vista del Cobre.

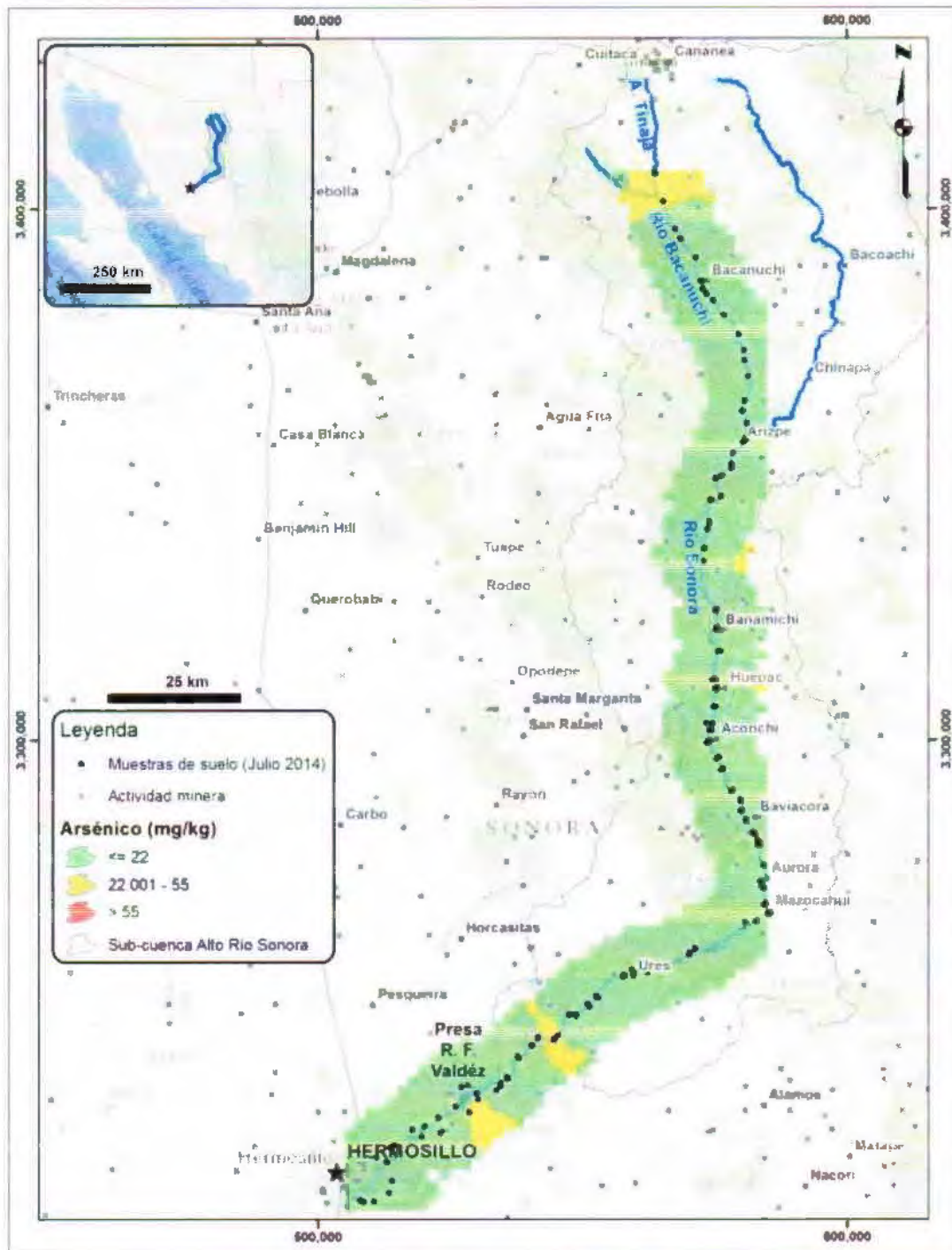


Figura 4.11 Distribución de arsénico (As) en suelos

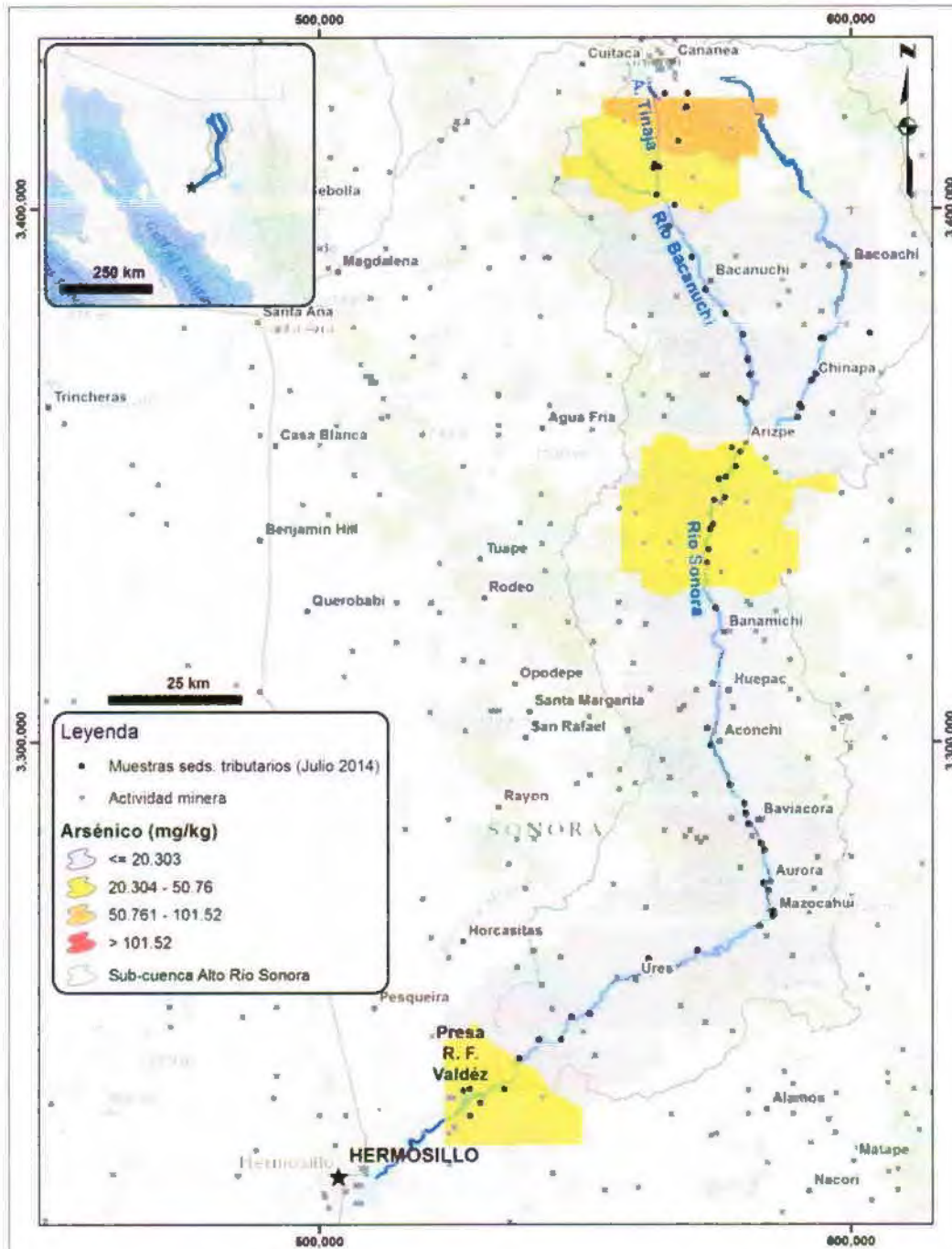


Figura 4.12 Distribución de arsénico (As) en sedimentos

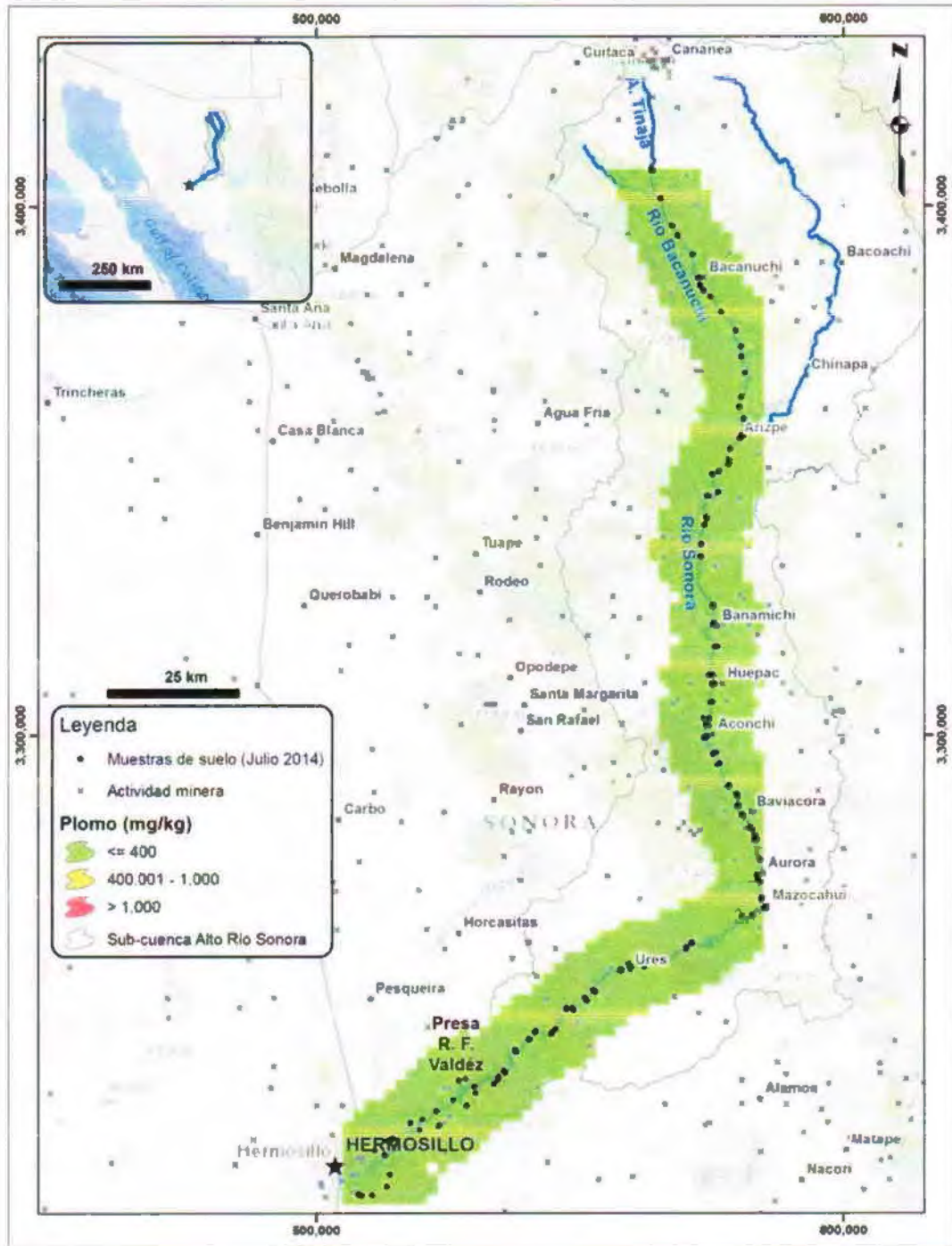


Figura 4.13 Distribución de plomo (Pb) en suelos

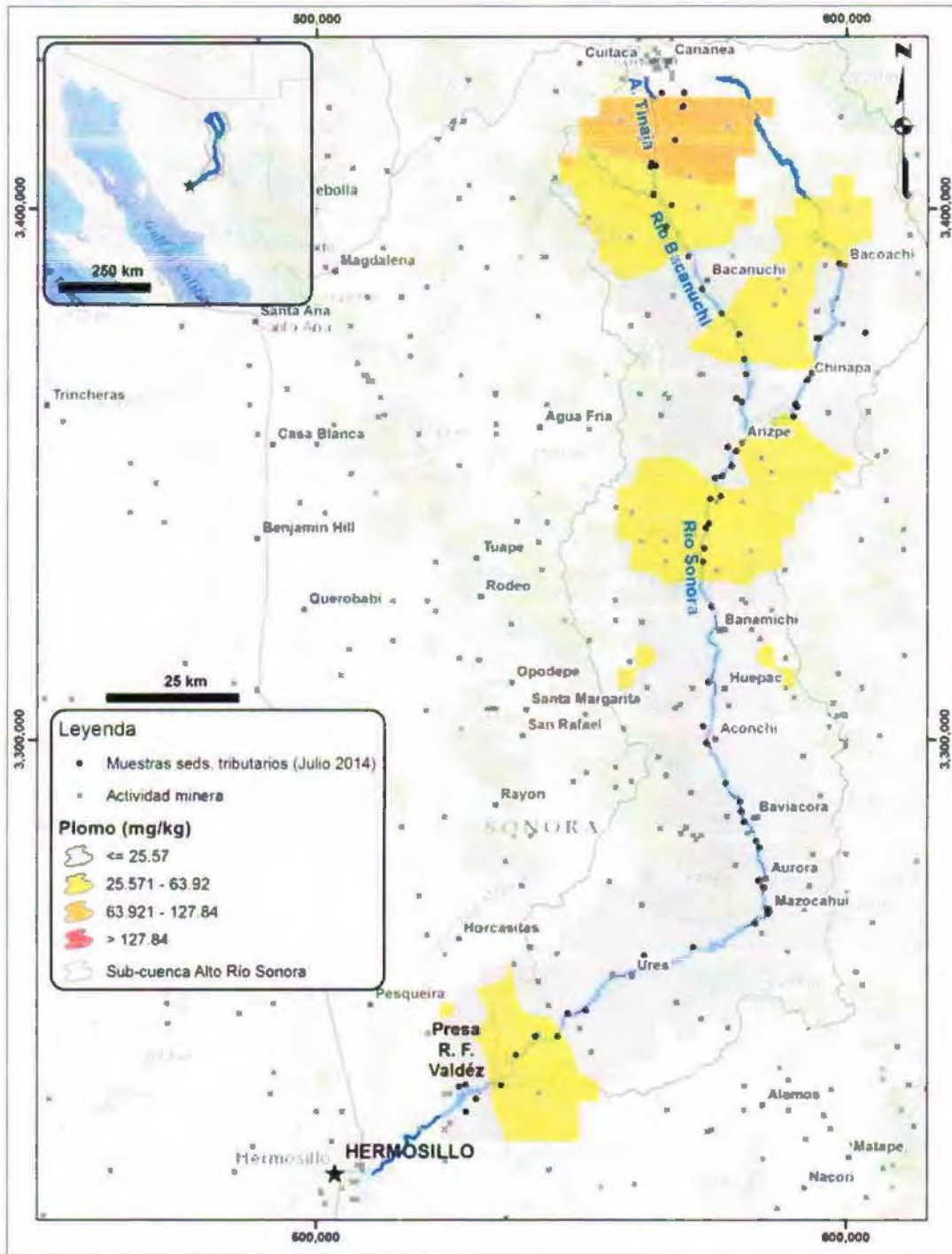


Figura 4.14 Distribución de plomo (Pb) en sedimentos

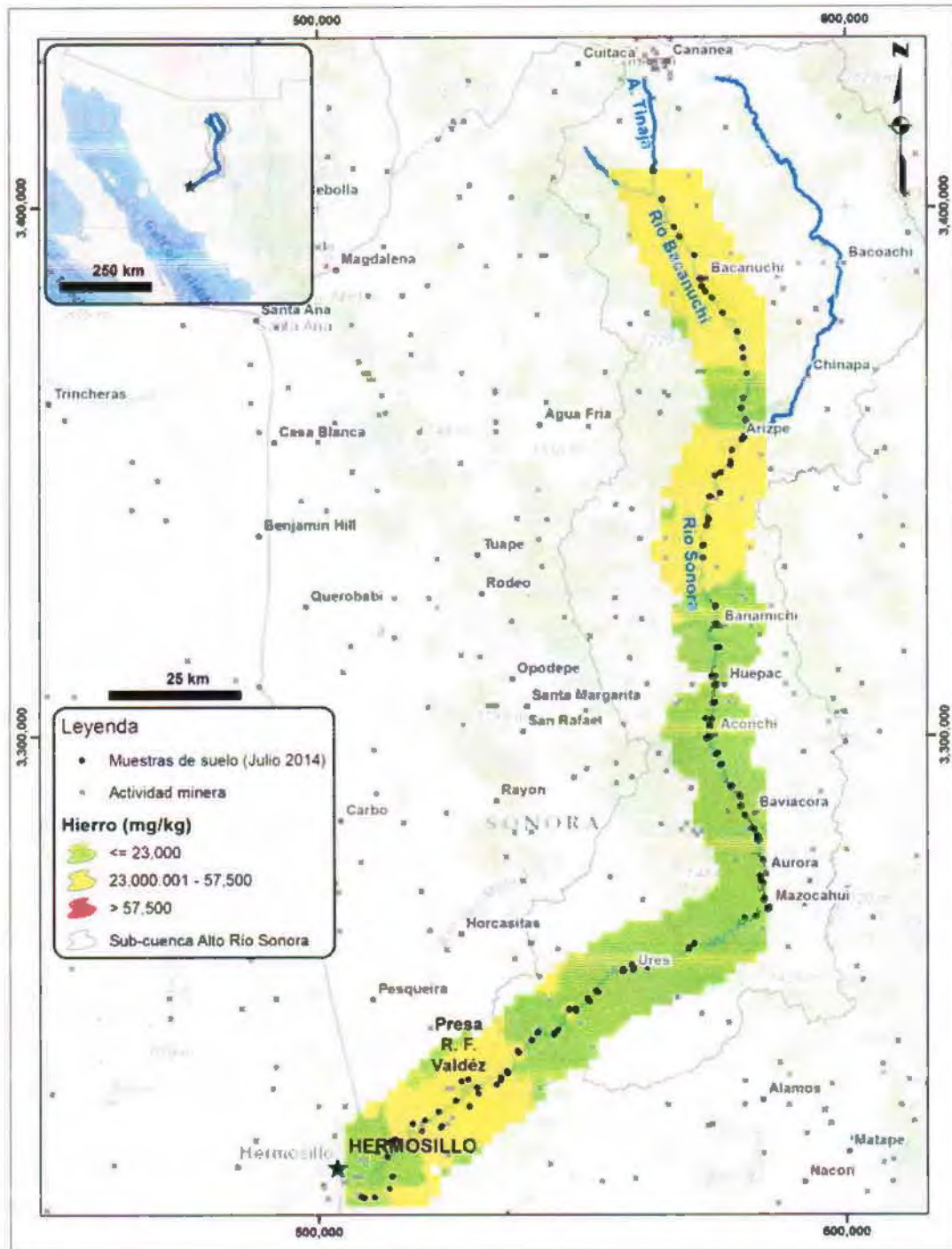


Figura 4.15 Distribución de hierro (Fe) en suelos

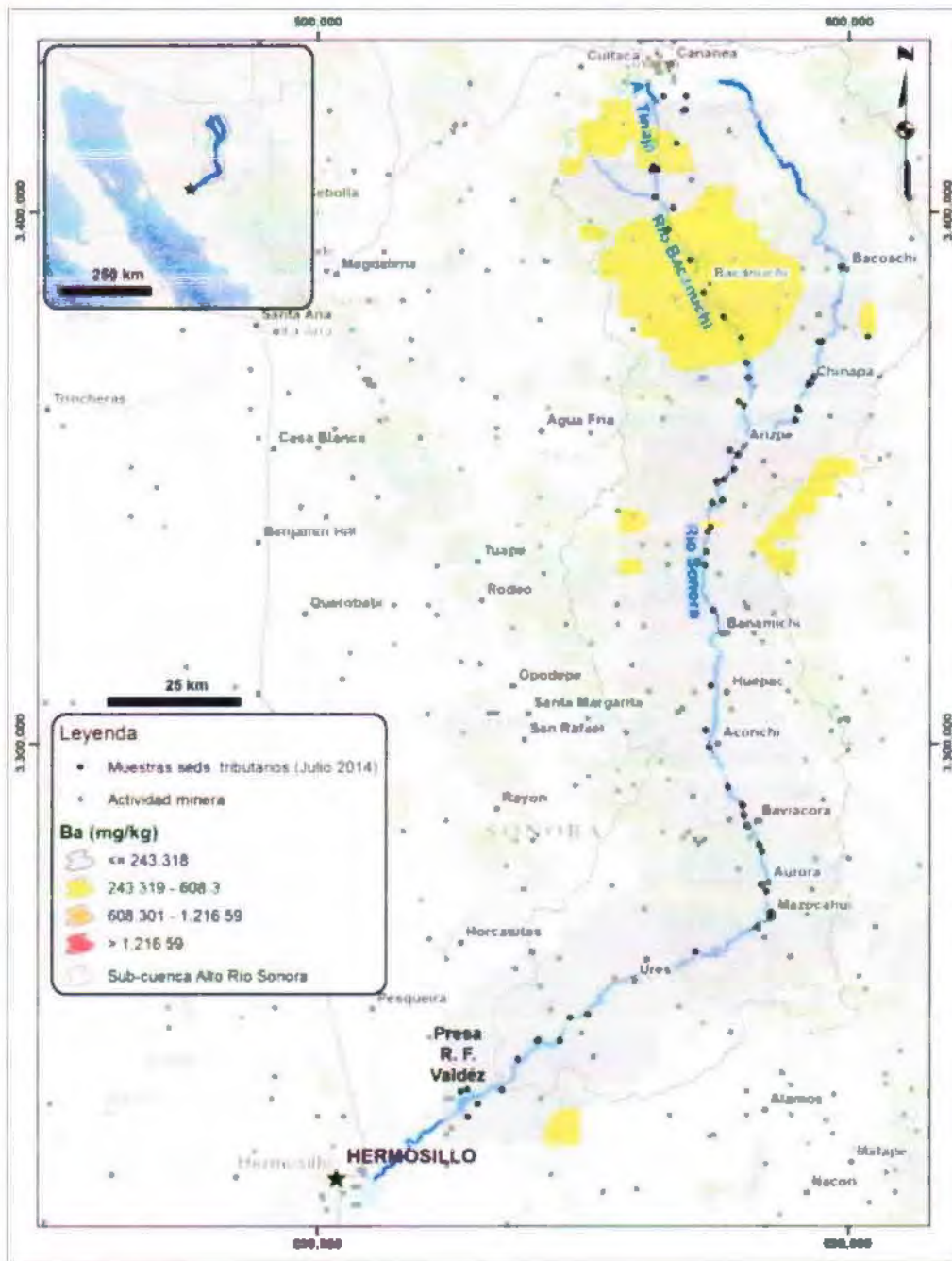


Figura 4.16 Distribución de bario (Ba) en sedimentos

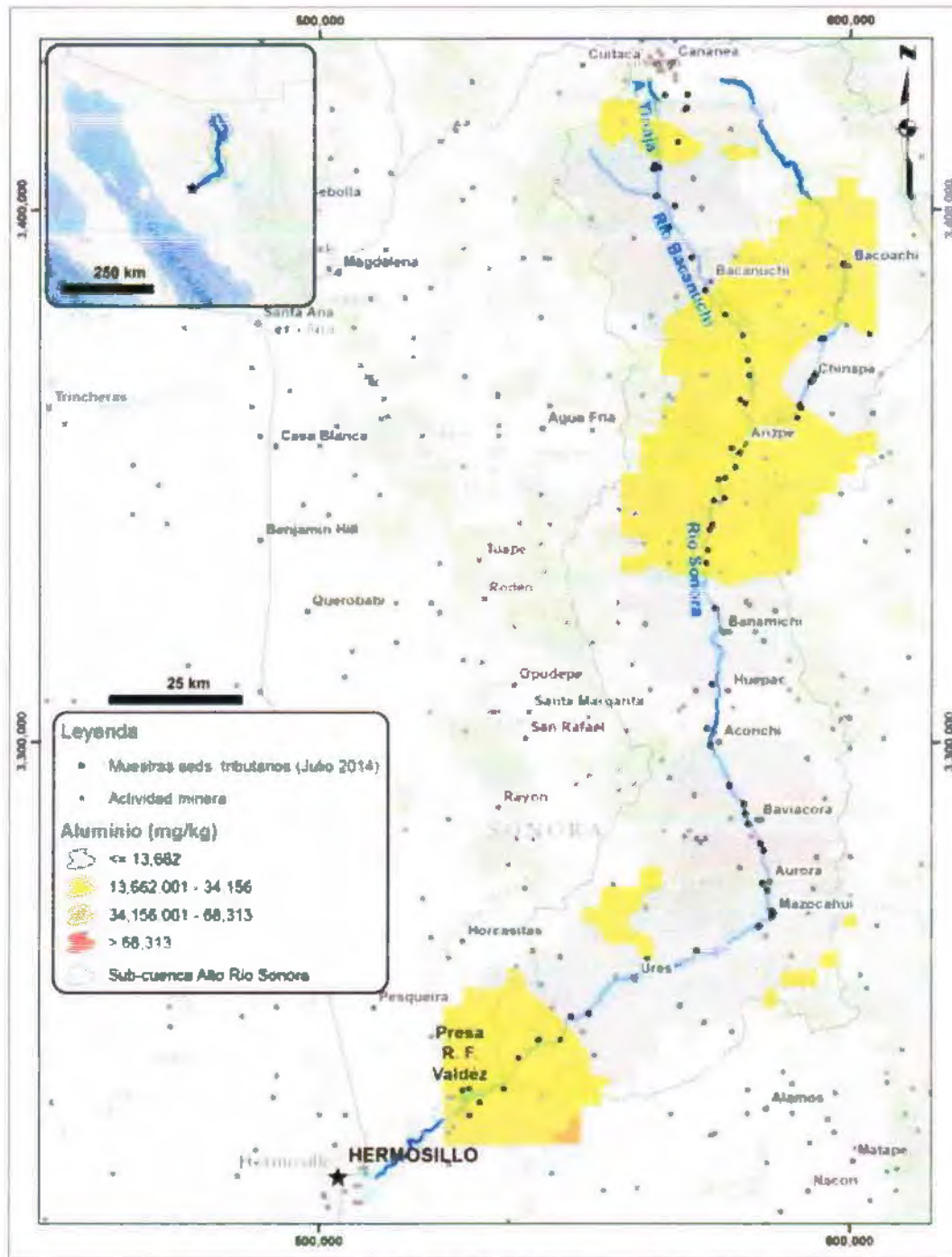


Figura 4.17 Distribución de aluminio (Al) en sedimentos



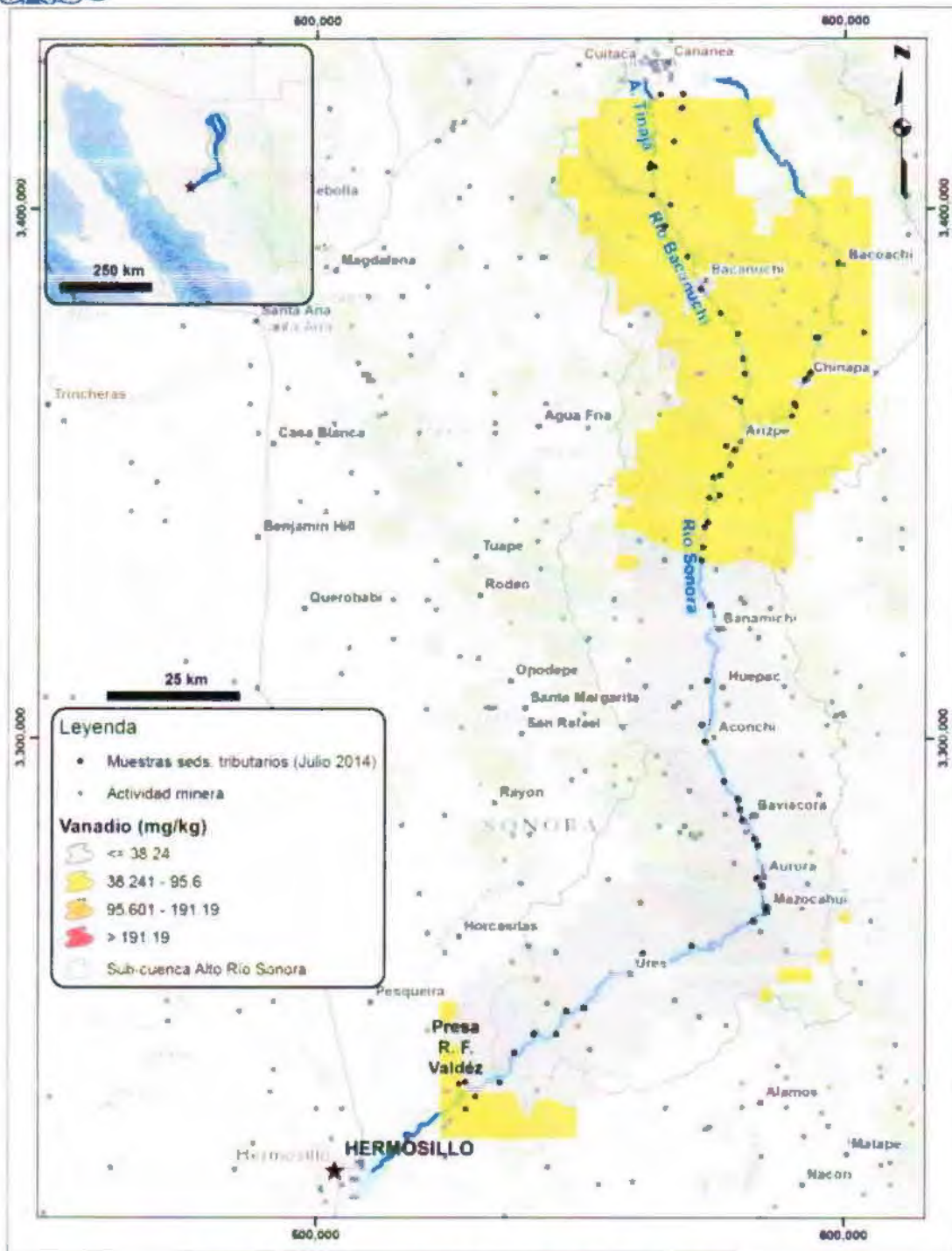


Figura 4.18 Distribución de vanadio (V) en sedimentos

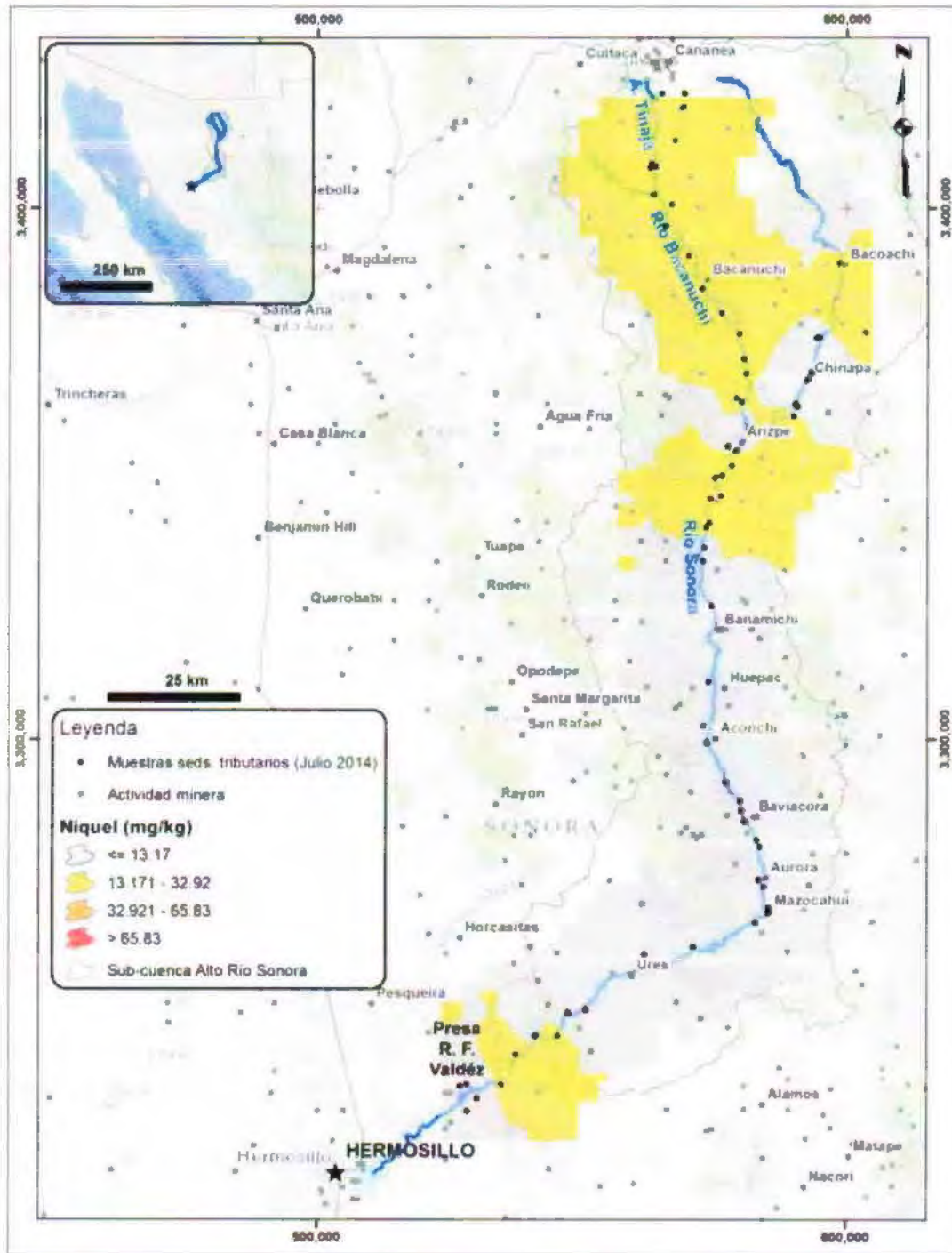


Figura 4.19 Distribución de níquel (Ni) en sedimentos



## 5. PRODUCTOS LACTEOS

## 6. CONCLUSIONES

### a) Fuente de contaminación

De acuerdo a resultaos reportados por CONAGUA y de los resultados del muestreo orientativo realizado por el grupo de la UNAM se puede afirmar que:

- ✓ La solución derramada no contiene mercurio (Hg), bario (Ba) y antimonio (Sb).
- ✓ La carga contaminante asociada al derrame y vertida a los arroyos de la cuenca del río Sonora es en orden descendente: 43200 kg de Fe, 19,440 kg de Al, 4560 kg de Cu, 3924 kg de Mn, 204 kg de Zn, 1,708 kg de As, 440 kg de Ni, 310 kg de Cd, 100 kg de Pb y 62 kg de Cr.
- ✓ El patrón de los elementos de tierras raras (ETR) de los lixiviados asociados al derrame es muy particular y al parecer el fenómeno de dilución no parece afectarlos, por lo que podemos pensar que puede ser un buen trazador para seguir el rastro de la afectación de los cuerpos de aguas de la cuenca del río Sonora, afectados por el derrame de la solución ácido ferro-cuprífera que se almacenaba en el represo Tinajas 1.

### b) Cuerpos de agua

Los resultados generados indican que, en general, actualmente la calidad de los cuerpos de agua superficial y subterránea cumple con la norma de agua para consumo humano

Es necesario el monitoreo periódico para confirmar que se mantienen las condiciones de seguridad para la población humana

### b) Sedimentos y suelos

Utilizando los valores de fondo preliminares (SGM, 1993 – 2005) se puede concluir:



En la parte alta de la cuenca (Represo "Tinajas 1" hasta Bacanuchi), las evidencias indican que los sedimentos y, en menor proporción, los suelos parecen estar afectados por el derrame. En esta parte de la cuenca es necesario la caracterización (escala detalle) para implementar acciones de remediación, en el corto plazo

En la parte media y baja, las evidencias indican la existencia de fuentes de contaminación adicional al derrame del pasado 06.08.14.

## **6. Recomendaciones**

a) Determinar el estado base para valorar el daño ambiental asociado al derrame. Es necesario diferenciar el aporte antropogénico (derrame) y el natural (geología)

b) Conocer la dinámica entre aguas superficiales - subterráneas y su interacción con sedimentos y material acuífero, respectivamente

c) Valorar el destino final de los contaminantes asociados al derrame bajo diferentes escenarios climáticos y físico-químicos. Predicción del comportamiento de los contaminantes en el mediano y largo plazo haciendo énfasis en los efectos al ambiente y ecosistema

d) Delimitar de zonas donde se identifique daño ambiental asociado al derrame y valorar el riesgo potencial ambiental (ecológico y la salud humana) a través de bioensayos y bioaccesibilidad de los contaminantes

e) Realizar la evaluación de riesgo ecológico y a la salud humana a través de bio-indicadores de exposición y efecto, en las zonas donde se identifique daño ambiental asociado al derrame y riesgo potencial ambiental.



f) Proponer un plan de remediación en los sitios donde se identifique que puede haber riesgo ambiental o la salud humana