

ANÁLISIS DE DISPERSIÓN DE METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL RÍO SONORA

DOCUMENTO TÉCNICO



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO



ITSON
UNIVERSIDAD



ANÁLISIS DE DISPERSIÓN DE METALES PESADOS EN LA CUENCA DEL RÍO SONORA

DOCUMENTO TÉCNICO

JUNIO, 2024

Página 1 de 32



INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

ADRIÁN PEDROZO ACUÑA

Director general

COORDINACIÓN DE SEGURIDAD HÍDRICA

MARCO RODRIGO LÓPEZ LÓPEZ

COORDINACIÓN DE CALIDAD Y ECOLOGÍA DEL AGUA

NORMA RAMIREZ SALINAS

ERIC GIOVANNI MESA GONZÁLEZ

HUMBERTO GARCIA FICUNDO

MANUEL SANCHEZ ZARZA

JORGE LUIS CASTILLO REYES

AXEL FALCÓN ROJAS

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

MARIANA MORALES HERNÁNDEZ

Encargada de Despacho de la Dirección General

LUIS DANIEL SIFUENTES VÁZQUEZ

MONTSERRAT AGUILAR PICHARDO

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

A LA COLABORACIÓN DE:

AGUSTÍN ROBLES MORÚA DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA

FERNANDO ROMERO GALVÁN DE LA UNIVERSIDAD DE CORNELL

AL ACOMPAÑAMIENTO DE LOS COMITÉS DE CUENCA RÍO SONORA



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. ANTECEDENTES	5
3. METODOLOGÍA	7
3.1 Ubicación de la zona de estudio	7
3.2 Plan de muestreo.....	7
3.3 Recolección de muestras	9
3.4 Análisis de las muestras	12
4. RESULTADOS.....	13
5. CONCLUSIONES	30
6. REFERENCIAS.....	31

Figuras

Figura 3.1. Cuenca del Río Sonora y Ubicación de las zonas de muestreo ...	8
Figura 3.2 Recolección de muestras aguas arriba de Bacanuchi	9
Figura 3.3 Recolección y catalogación de muestras en la Heroica Ciudad de Ures.....	10
Figura 3.4 Ubicación de muestras y clasificación en suelo y sedimento.	11
Figura 4.1 Mapa con resultados de concentración de Aluminio.....	20
Figura 4.2 Mapa con resultados de concentración de Arsénico.....	21
Figura 4.3 Mapa con resultados de concentración de Cobre	22
Figura 4.4 Mapa con resultados de concentración de Cobre	23
Figura 4.5 Mapa con resultados de concentración de Manganeso.....	24
Figura 4.6 Mapa con resultados de concentración de Plomo	25
Figura 4.7 Mapa con resultados de concentración de Zinc	26





Tablas

Tabla 4.1 Resultados de las concentraciones de metales pesados en mg/kg (ppm).....13

Tabla 4.2 Resultados estadísticos de concentración de Aluminio.....27

Tabla 4.3 Resultados estadísticos de concentración de Arsénico.....27

Tabla 4.4 Resultados estadísticos de concentración de Arsénico.....28

Tabla 4.5 Resultados estadísticos de concentración de Hierro.....28

Tabla 4.6 Resultados estadísticos de concentración de Hierro.....28

Tabla 4.7 Resultados estadísticos de concentración de Niquel.....29

Tabla 4.8 Resultados estadísticos de concentración de Plomo.....29

Tabla 4.9 Resultados estadísticos de concentración de Zinc.....29





1. INTRODUCCIÓN

Durante el mes de febrero de 2024, personal adscrito al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y el Instituto Tecnológico de Sonora, llevaron a cabo una campaña de campo en la cuenca del Río Sonora, con el objetivo de coleccionar muestras de suelo y sedimento sobre el cauce principal y sus tributarios, así como suelos en las márgenes y planicies para su posterior análisis con apoyo de equipo de espectrometría de absorción atómica (AA) o Plasma acoplado inductivamente (ICP).

El objetivo de este trabajo fue cuantificar las concentraciones de metales pesados dentro de la cuenca del Río Sonora, a fin de conocer si los impactos del derrame de los 40,000 m³ de solución ácida ferro-cuprífera del represo Tinajas 1, de la Mina Buenavista del Cobre, persisten actualmente.

Los hallazgos obtenidos en este trabajo presentan evidencia suficiente de la persistencia de contaminación por metales pesados en la Cuenca del Río Sonora, y cuya causal está relacionada con los elementos tóxicos liberados a consecuencia del derrame en la mina Buenavista del Cobre en 2014.

2. ANTECEDENTES

Hace casi 10 años (6 de agosto de 2014) ocurrió un accidente en la mina Buenavista del Cobre, municipio de Cananea, Sonora. En dicho accidente, se derramaron aproximadamente 40,000 m³ de solución ácida de la presa de jales hacia el Arroyo Tinajas. La solución derramada estaba enriquecida con hierro, aluminio, cobre y otros metales pesados disueltos (solución ácida ferro-cuprífera) y esto inició una migración de metales provenientes del derrame tanto en cuerpos de agua superficiales como subterráneos.

A pesar de que se realizaron acciones de remediación durante el año 2015 aguas abajo del sitio del derrame, se desconoce si los impactos asociados a este derrame siguen hoy en día, representando los siguientes riesgos a



mediano y largo plazo para los habitantes y ecosistemas de la cuenca del Río Sonora:

(1) Dispersión y almacenamiento de metales en sistemas fluviales (ej. Burgos et al., 2013; Kraus y Wiegand, 2006) y planicies de inundación (ej. Bird, et al., 2008; Miller, 1997), (2) Reparación y redistribución de metales por eventos de inundación y erosión (ej. Coulthard y Macklin, 2003), (3) Contaminación severa en suelos para actividades productivas y áreas naturales protegidas (ej. Burgos, et al., 2013), (4) Toxicidad y mortalidad en flora y fauna (ej. Levit y Bozeman, 2010; Solà et al., 2004) y posteriormente pérdida de biodiversidad (el. Riba et al., 2004; Sabater, 2000), (5) Consumo y exposición prolongada de metales pesados a niveles sub-letales e irreversibles para la población por diversas causas como el consumo de agua contaminada (ej. Santos et al., 2002), inhalación de polvo y/o ingestión de comida contaminada (ej. Gil et al., 2006).

En el año 2016, la Universidad Nacional Autónoma de México en conjunto con el Instituto Tecnológico de Sonora, presentaron un Diagnóstico Ambiental en la Cuenca del Río Sonora (UNAM & ITSON, 2016), en donde con base en el análisis de los sedimentos muestreados en zanjas a lo largo del arroyo Tinajas y del Río Bacanuchi, se encontraron altas proporciones de metales (hierro, aluminio, cobre, manganeso y arsénico); lo que indicó una migración vertical de metales provenientes del derrame, con concentraciones de cobre y cadmio en sedimentos superiores a los valores de fondo (Intervalo de concentraciones de metales pesados distribuidos naturalmente en una región).

Con el objetivo de establecer que los impactos del derrame persisten actualmente en la región, el presente análisis proporciona la información más reciente en lo que se refiere a la concentración de diferentes metales pesados a lo largo de los corredores fluviales de las partes altas de las cuencas de los ríos Bacanuchi y Bacoachi así como en las partes medias de la cuenca Río Sonora, en la cercanías de la comunidades de Arizpe, Banámichi y la Heroica Ciudad de Ures, respectivamente.



3. METODOLOGÍA

3.1 Ubicación de la zona de estudio

El objetivo de este proyecto fue llevar a cabo un muestreo de suelo y sedimentos en la cuenca del Río Sonora para cuantificación de metales pesados. Los metales analizados fueron los siguientes: Aluminio (Al), Arsénico (As), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Niquel (Ni), Plomo (Pb) y Zinc (Zn).

En el periodo del 29 de febrero al 4 de marzo de 2024, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en conjunto con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), llevaron a cabo una campaña de muestreo de suelo y sedimentos en las localidades de Bacanuchi, Bacoachi, Arizpe, Banámichi y la Heroica Ciudad de Ures; ubicadas dentro de la Cuenca del Río Sonora en el estado que lleva el mismo nombre. La ubicación de las zonas de muestreo se presenta en el mapa de la Figura 3.1.

3.2 Plan de muestreo

Se realizó un trabajo de gabinete para diseñar la campaña y elegir los puntos para la recolección de las muestras de suelo y sedimento. Para la elección de los puntos se consideró el tipo y cobertura de suelo, de tal manera que dichos puntos o muestras fueran representativas de la zona y permitieran visualizar y analizar la dispersión de los contaminantes a lo largo de los Ríos Bacanuchi y Sonora.

Para llevar a cabo este estudio se establecieron dos zonas:

- a) Zona de influencia: Localidades de Bacanuchi, Arizpe, Banámichi y Heroica Ciudad de Ures
- b) Zona de control: Localidad de Bacoachi, que se encuentra fuera de la influencia del derrame.



En el mapa de la Figura 3.1 se presenta la cuenca del Río Sonora y las zonas en donde se realizó la recolección de muestras.

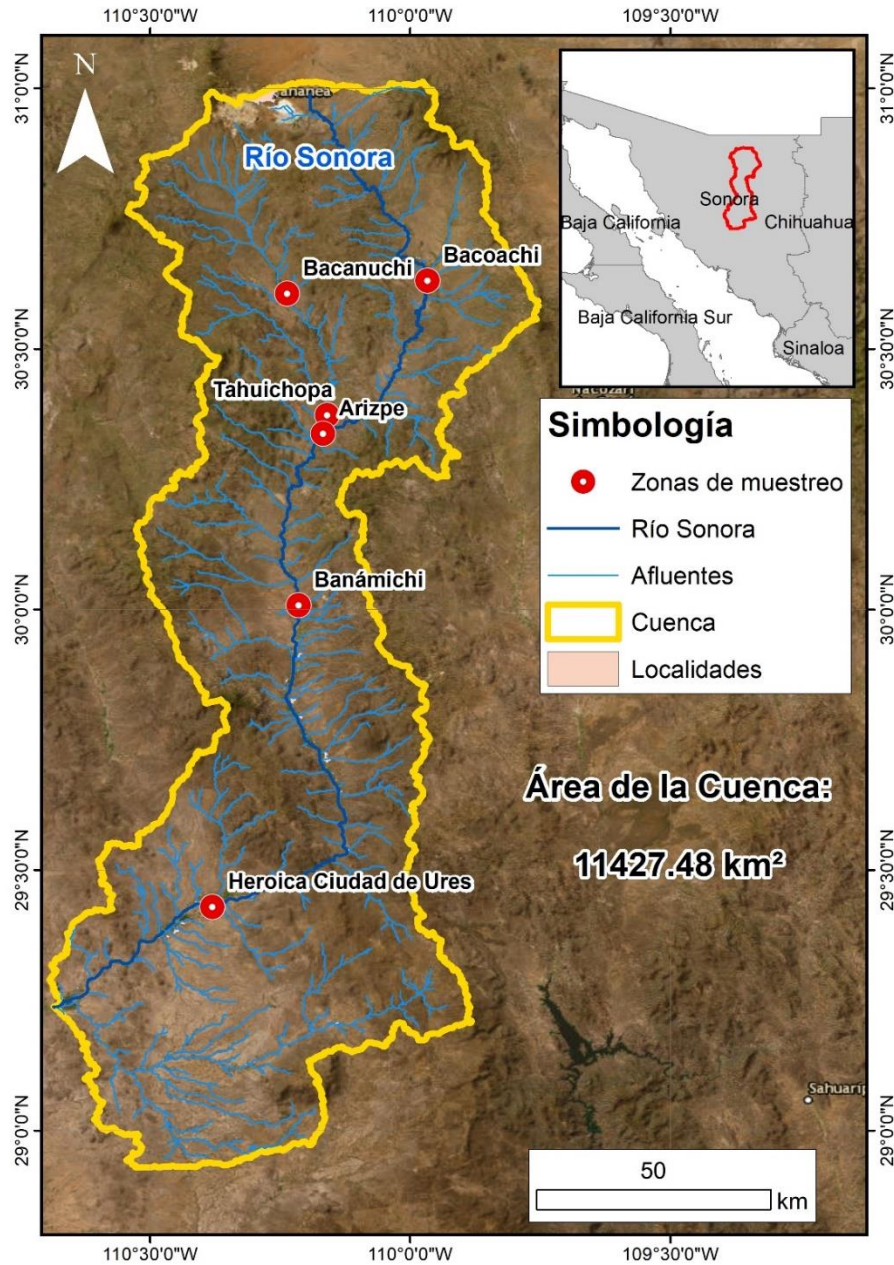


Figura 3.1. Cuenca del Río Sonora y Ubicación de las zonas de muestreo



3.3 Recolección de muestras

El número total de muestras recolectadas entre sedimento y suelo fue de 160, con aproximadamente 1 kg de peso para cada una de ellas. Los puntos de muestreo clasificados por tipo de muestra (suelo o sedimento) se presentan en el mapa de la Figura 3.4.

Para la colección de las muestras se utilizó una pala; la cual se limpió cuidadosamente antes de cada colecta, a fin de asegurar que no existiera residuos de muestras previas.

Cada una de las muestras fue almacenada en una bolsa de plástico y posteriormente catalogadas de acuerdo con su ubicación; caracterización como suelo o sedimento, identificadas con la persona que realizó el muestreo, fecha, matriz y tipo de análisis a realizar; así como sus coordenadas geográficas (ver Tabla 4.1).

A continuación, se presentan algunas imágenes de las labores de colección de las muestras.



Figura 3.2 Recolección de muestras aguas arriba de Bacanuchi



Figura 3.3 Recolección y catalogación de muestras en la Heroica Ciudad de Ures



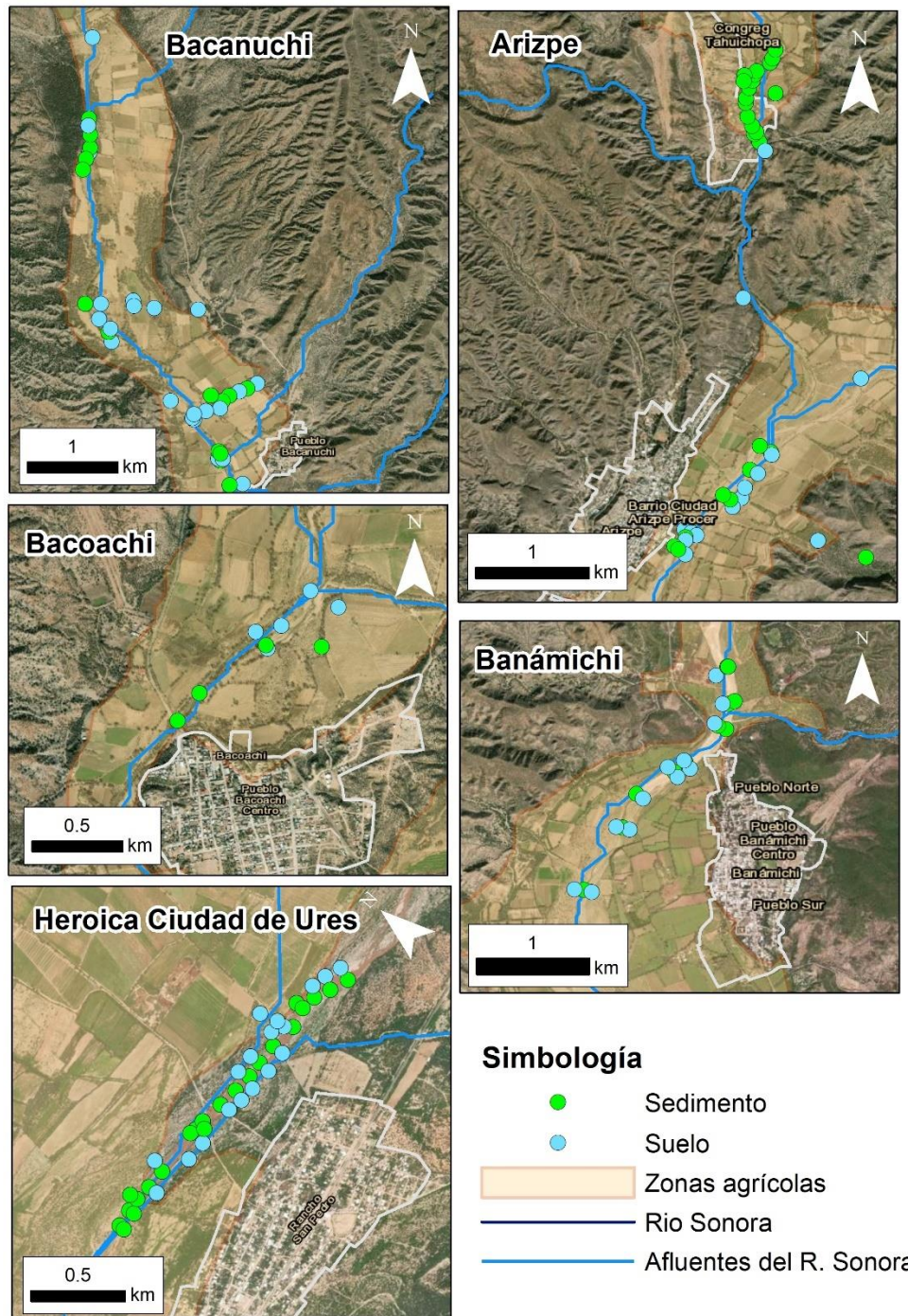


Figura 3.4 Ubicación de muestras y clasificación en suelo y sedimento.



3.4 Análisis de las muestras

Las muestras fueron enviadas a los laboratorios de IMTA e INECC para su correspondiente análisis.

La recepción de las muestras en cada uno de los laboratorios, se llevó a cabo conforme a lo establecido en los correspondientes Manuales de Procedimientos.

El procesamiento y análisis de muestras para los metales (Aluminio, Zinc, Manganeso, Cobre, Hierro) y metaloide (Arsénico), se llevó a cabo de conformidad con los procedimientos aplicables y acorde a los procedimientos del Sistema de Gestión de Calidad de los Laboratorios, realizando en ambos casos previo al análisis instrumental, una digestión en medio ácido para la eliminación de materia orgánica y permitir que los elementos se encuentren en una forma apropiada para que puedan ser cuantificados y libres del efecto de matriz.

Una vez digeridas las muestras se procedió al análisis de las mismas para determinar la concentración de los metales y el metaloide en cada una de ellas. Los análisis fueron realizados por el método de absorción atómica, técnica de flama (metales) y generador de hidruros (metaloide) conforme corresponde y/o por el método de Espectroscopia de emisión óptica acoplada a plasma de acoplamiento inducido (ICP-OES). Se utilizó material de referencia, con el objeto de tener la exactitud del método, y se aplicó el correspondiente procedimiento de control de calidad de los resultados.

Una vez analizadas las muestras se procedió a obtener la concentración de los metales y metaloide en cada una ellas, corroborando el cumplimiento con los procedimientos aplicables.



4. RESULTADOS

En la tabla siguiente se presentan los resultados de las concentraciones de metales pesados, resaltando en color amarillo las concentraciones observadas más altas para cada uno de los metales analizados.

Tabla 4.1 Resultados de las concentraciones de metales pesados en mg/kg (ppm)

Nombre del sitio	Localidad	ID	LAT	LON	Matriz	Al	As	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
BCN suelo	Bacanuchi	1	30.61	-110.24	Suelo	4556.51	5.22	31.37	6964.43	423.66	25.78	48.76	84.93
BCN suelo	Bacanuchi	2	30.61	-110.24	Sedimento	6141.22	8.49	23.48	13276.98	489.24	18.70	22.88	42.44
BCN suelo	Bacanuchi	3	30.61	-110.24	Suelo	4477.53	4.28	20.42	5263.16	394.74	26.12	37.90	36.14
BCN sedimento	Bacanuchi	4	30.61	-110.24	Sedimento	4277.53	4.28	17.5	12871.33	381.36	19.68	26.15	31.07
BCN sedimento	Bacanuchi	5	30.61	-110.24	Sedimento	4999.07	10.47	15.82	10073.52	211.24	18.24	20.94	31.64
BCN suelo	Bacanuchi	6	30.61	-110.24	Suelo	3242.56	4.13	13.43	3487.50	317.05	23.13	33.57	21.45
BCN sedimento	Bacanuchi	7	30.61	-110.24	Sedimento	5308.96	15.33	21.22	14592.30	579.78	21.02	26.69	36.66
BCN suelo	Bacanuchi	8	30.61	-110.24	Suelo	4173.02	5.44	23.84	4341.09	480.62	25.58	41.86	31.78
BCN suelo	Bacanuchi	9	30.61	-110.24	Suelo	2357.44	4.42	38.48	3740.77	334.24	22.93	48.00	41.39
BCN sedimento	Bacanuchi	10	30.61	-110.24	Sedimento	4047.05	9.36	24.52	6984.04	352.53	15.87	26.99	42.47
BCN suelo	Bacanuchi	11	30.61	-110.24	Suelo	2898.83	5.02	43.17	3957.60	412.29	23.34	39.87	39.67
BCN sedimento	Bacanuchi	12	30.61	-110.24	Sedimento	3918.88	6.73	24.57	6854.84	363.84	15.75	28.04	41.17
BCN suelo	Bacanuchi	13	30.61	-110.24	Suelo	2242.2	4.28	45.04	3144.84	367.06	23.02	37.50	37.5
BCN suelo	Bacanuchi	14	30.61	-110.25	Suelo	4506.68	10.66	13.64	3725.30	656.13	26.28	32.41	29.84
BCN suelo	Bacanuchi	15	30.60	-110.24	Suelo	6921.97	9.92	46.23	6769.41	612.56	30.63	54.04	60.87
BCN sedimento	Bacanuchi	16	30.60	-110.24	Sedimento	3736.12	6.92	23.96	6759.66	446.17	14.40	76.54	44.35
BCN sedimento	Bacanuchi	17	30.61	-110.24	Sedimento	4683.65	10.31	32.11	8615.88	383.93	16.25	25.93	50.26
BCN suelo	Bacanuchi	18	30.61	-110.24	Suelo	3539	5.50	48.27	5355.77	446.15	23.08	38.27	47.12



Nombre del sitio	Localidad	ID	LAT	LON	Matriz	Al	As	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
BCN suelo	Bacanuchi	19	30.61	-110.24	Suelo	3833.17	5.73	38.37	5824.76	504.35	23.93	44.30	54.19
BCN sedimento	Bacanuchi	20	30.61	-110.24	Sedimento	4621.24	11.44	26.62	9949.48	442.09	16.13	29.93	47.9
BCN sedimento	Bacanuchi	21	30.61	-110.24	Sedimento	3945.76	9.80	25.16	8311.35	369.39	14.98	23.56	43.44
BCN suelo	Bacanuchi	22	30.62	-110.24	Suelo	4024.49	4.23	14.99	4186.14	399.14	24.34	33.80	25.9
BCN suelo	Bacanuchi	23	30.62	-110.25	Suelo	4539.83	6.48	61.19	7000.39	594.50	24.40	91.40	64.68
BCN suelo	Bacanuchi	24	30.62	-110.25	Suelo	4384.26	7.46	76.04	6405.94	746.53	26.34	60.00	71.49
BCN sedimento	Bacanuchi	25	30.62	-110.26	Sedimento	4542.59	10.90	15.63	7774.96	629.03	18.17	39.17	39.75
BCN suelo	Bacanuchi	26	30.62	-110.25	Suelo	2261.66	4.56	46.76	3841.68	382.23	18.04	43.27	44.24
BCN suelo	Bacanuchi	27	30.62	-110.25	Suelo	4922.5	6.36	22.98	3942.16	580.43	25.95	42.79	34.67
BCN sedimento	Bacanuchi	28	30.62	-110.25	Sedimento	3864.74	10.38	30.77	8199.42	380.75	14.34	28.21	53.41
BCN suelo	Bacanuchi	29	30.62	-110.25	Suelo	4316.57	7.16	62.1	7817.46	593.25	25.20	51.19	66.87
BCN suelo	Bacanuchi	30	30.62	-110.25	Suelo	6929.58	10.05	104.72	7687.65	738.50	32.28	62.95	70.02
BCN suelo	Bacanuchi	31	30.62	-110.25	Suelo	4600.06	8.79	85.13	7267.56	812.08	26.68	64.14	68.85
BCN suelo	Bacanuchi	32	30.64	-110.25	Suelo	6812.35	5.87	26.73	5501.45	714.88	32.53	43.72	45.59
BCN sedimento	Bacanuchi	33	30.64	-110.25	Sedimento	4603.8	12.25	32.27	10973.84	469.96	15.41	29.26	58.62
BCN sedimento	Bacanuchi	34	30.64	-110.25	Sedimento	4225.27	8.58	28.73	7846.75	504.70	13.72	30.21	51.11
BCN sedimento	Bacanuchi	35	30.64	-110.25	Sedimento	5077.85	11.53	34.15	10012.52	527.45	16.90	32.63	59.27
BCN suelo	Bacanuchi	36	30.64	-110.26	Suelo	5028.31	4.60	20.73	5183.41	490.43	25.72	43.86	44.66
BCN sedimento	Bacanuchi	37	30.64	-110.26	Sedimento	4041.76	7.72	26.03	7826.99	507.29	16.18	29.72	47.23
BCN sedimento	Bacanuchi	38	30.63	-110.26	Sedimento	4520.07	35.40	30.83	9220.13	442.76	17.29	34.77	53.59
BCN suelo	Bacanuchi	39	30.65	-110.25	Suelo	5665.84	6.59	75.93	6259.67	600.82	33.74	45.27	59.47
URES 1 sedimento	Ures	1	29.44	-110.35	Sedimento	2695.89	4.45	6.59	5090.84	146.24	12.18	20.96	25.25
URES 2 suelo	Ures	2	29.44	-110.35	Suelo	8132.84	7.45	29.11	8792.70	493.01	34.16	43.48	55.12
URES 3 suelo	Ures	3	29.44	-110.35	Suelo	3348.54	3.25	10.46	4064.72	178.37	25.26	29.20	27.43
URES 4 sedimento	Ures	4	29.44	-110.35	Sedimento	2993.88	3.36	5.1	4695.62	146.62	10.58	16.05	22.36



Nombre del sitio	Localidad	ID	LAT	LON	Matriz	Al	As	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
URES 5 sedimento	Ures	5	29.44	-110.35	Sedimento	2735.36	3.64	5.25	4233.16	123.10	11.09	14.60	19.56
URES 6 suelo	Ures	6	29.44	-110.35	Suelo	2867.95	3.42	9.2	3897.57	138.19	23.61	23.61	25.52
URES 7 sedimento	Ures	7	29.44	-110.35	Sedimento	2710.31	4.64	7.15	5235.45	158.95	11.42	17.19	26.43
URES 8 sedimento	Ures	8	29.44	-110.35	Sedimento	3134.12	5.00	7.37	7354.86	182.94	12.04	18.01	26.13
URES 9 sedimento	Ures	9	29.44	-110.36	Sedimento	3064.48	4.50	7.35	5897.34	176.82	11.85	16.07	26.84
URES 10 suelo	Ures	10	29.44	-110.36	Suelo	3182.89	3.18	11.8	3725.91	169.88	26.74	25.76	28.12
URES 11 sedimento	Ures	11	29.44	-110.37	Sedimento	3341.62	5.08	8.87	7186.51	199.63	12.91	16.46	27.5
URES 12 sedimento	Ures	12	29.44	-110.37	Sedimento	4202.96	7.04	12.17	10948.72	220.97	14.86	18.66	39.9
URES 13 sedimento	Ures	13	29.44	-110.37	Sedimento	2596.96	4.71	6.3	5817.67	153.94	12.69	15.09	24.79
URES 14 sedimento	Ures	14	29.44	-110.37	Sedimento	3698.7	6.81	11.57	10114.76	252.87	16.14	19.26	34.72
URES 15 sedimento	Ures	15	29.44	-110.37	Sedimento	2463.7	4.14	5.97	5194.93	148.29	12.50	19.40	23.13
URES 16 sedimento	Ures	16	29.44	-110.37	Sedimento	3377.78	6.63	9.97	9632.31	197.05	15.26	15.55	33.44
URES 17 sedimento	Ures	17	29.44	-110.37	Sedimento	2799.03	5.06	8.51	6242.59	187.97	14.74	16.42	26.12
URES 18 suelo	Ures	18	29.44	-110.37	Suelo	3924.2	4.31	13.45	4820.02	191.35	30.82	27.10	31.65
UR3S 19 sedimento	Ures	19	29.44	-110.36	Sedimento	3209.52	5.40	8.2	7521.95	185.85	14.34	17.27	30.54
URES 20 suelo	Ures	20	29.44	-110.36	Suelo	2304.1	2.74	8.64	2975.26	114.49	26.51	21.21	19.84
URES 21 sedimento	Ures	21	29.44	-110.36	Sedimento	2476.4	4.33	6.95	5338.87	154.47	13.52	17.38	23.85
URES 22 suelo	Ures	22	29.44	-110.36	Suelo	1363.69	1.99	7.11	2365.96	83.67	24.78	20.31	14.22
URES 23 sedimento	Ures	23	29.44	-110.36	Sedimento	2980.18	5.20	8.36	6761.60	181.74	13.84	19.02	27.68



Nombre del sitio	Localidad	ID	LAT	LON	Matriz	Al	As	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
URES 24 suelo	Ures	24	29.44	-110.36	Suelo	1797.51	2.52	31.37	2836.73	107.14	26.73	27.55	18.78
URES 25 sedimento	Ures	25	29.44	-110.36	Sedimento	2562.5	4.49	23.48	6504.93	135.80	11.70	20.49	24.36
URES 26 sedimento	Ures	26	29.44	-110.36	Sedimento	1597.43	7.31	20.42	10528.94	192.61	18.16	25.05	43.11
URES 27 sedimento	Ures	27	29.44	-110.36	Sedimento	2383.38	5.17	17.50	6689.23	159.27	13.74	18.32	26.18
URES 28 suelo	Ures	28	29.44	-110.36	Suelo	5610.73	5.44	15.82	6561.36	342.24	33.41	35.24	41.92
URES 29 sedimento	Ures	29	29.44	-110.36	Sedimento	2918.71	5.22	13.43	7070.80	211.27	14.75	18.55	29.03
URES 30 suelo	Ures	30	29.44	-110.36	Suelo		7.16	21.22	12924.27	258.98	16.48	22.46	44.14
URES 31 sedimento	Ures	31	29.44	-110.36	Sedimento	3277.83	5.57	23.84	7637.11	220.66	15.23	19.36	30.27
URES 32 suelo	Ures	32	29.44	-110.36	Suelo	3637.47	4.59	38.48	4216.87	211.82	28.57	33.62	29.15
URES 33 suelo	Ures	33	29.44	-110.36	Suelo	4808.96	4.95	24.52	5658.48	299.03	29.60	31.41	38.26
URES 34 sedimento	Ures	34	29.44	-110.36	Sedimento	3151.19	6.55	43.17	10446.34	200.38	15.19	17.66	32.95
URES 35 suelo	Ures	35	29.44	-110.36	Suelo	5837.7	4.83	24.57	6948.42	316.21	32.13	33.97	43.59
URES 36 suelo	Ures	36	29.44	-110.36	Suelo	4901.69	5.68	45.04	6012.91	363.20	31.68	36.52	42.57
URES 37 sedimento	Ures	37	29.44	-110.36	Sedimento	2751.65	5.19	13.64	6975.04	172.54	13.67	15.05	27.81
URES 38 suelo	Ures	38	29.44	-110.36	Suelo	2414.88	2.94	46.23	3442.62	122.13	26.23	26.64	20.49
URES 39 suelo	Ures	39	29.44	-110.36	Suelo	3794.89	3.85	23.96	4760.94	167.34	28.57	26.74	29.68
URES 40 suelo	Ures	40	29.44	-110.36	Suelo	3289.88	3.08	32.11	4079.79	157.58	26.86	27.06	25.46
URES 41 suelo	Ures	41	29.44	-110.36	Suelo	4597.72	5.19	48.27	5267.33	332.67	30.69	31.49	35.25
ARI-SE-01	Arizpe	1	30.37	-110.16	Sedimento		8.81	38.37	5874.59	228.42	10.24	6.10	
ARI-SE-02	Arizpe	2	30.37	-110.16	Sedimento		8.99	26.62	6616.12	296.52	10.75	13.91	
ARI-SE-03	Arizpe	3	30.37	-110.16	Sedimento		10.03	25.16	8288.33	296.25	11.89	16.50	
ARI-SE-04	Arizpe	4	30.37	-110.16	Sedimento		9.79	14.99	9469.81	301.46	10.95	23.55	



Nombre del sitio	Localidad	ID	LAT	LON	Matriz	Al	As	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
ARI-SE-05	Arizpe	5	30.37	-110.16	Sedimento		8.44	61.19	6246.58	253.08	11.44	15.07	
ARI-SE-06	Arizpe	6	30.37	-110.16	Sedimento		10.26	76.04	6743.59	229.14	12.95	15.24	
ARI-SE-07	Arizpe	7	30.37	-110.16	Sedimento		8.53	15.63	9166.55	256.61	16.32	16.00	
ARI-SE-08	Arizpe	8	30.37	-110.16	Sedimento		8.75	46.76	6141.51	328.67	13.65	13.08	
ARI-SE-09	Arizpe	9	30.37	-110.16	Sedimento		9.18	22.98	7201.42	253.17	15.05	16.37	
ARI-SE-10	Arizpe	10	30.37	-110.16	Sedimento		10.35	30.77	9432.86	442.60	18.33	20.31	
ARI-SE-11	Arizpe	11	30.37	-110.16	Sedimento		6.80	62.10	6509.12	232.54	11.70	10.50	
ARI-SE-12	Arizpe	12	30.37	-110.16	Sedimento		29.22	104.72	7415.78	304.54	12.84	14.43	
ARI-SE-13	Arizpe	13	30.37	-110.16	Sedimento		7.46	85.13	5567.42	221.26	11.36	8.53	
ARI-SE-14	Arizpe	14	30.37	-110.16	Sedimento		24.69	26.73	6784.11	242.74	11.36	9.72	
ARI-SE-15	Arizpe	15	30.37	-110.16	Sedimento		9.07	32.27	7718.14	281.06	12.92	21.72	
ARI-SE-16	Arizpe	16	30.37	-110.16	Sedimento		14.05	28.73	9334.49	279.65	14.22	20.46	
ARI-SE-17	Arizpe	17	30.37	-110.16	Sedimento		15.14	34.15	8136.13	251.79	13.20	15.04	
ARI-SE-18	Arizpe	18	30.37	-110.16	Sedimento		10.02	20.73	6055.29	277.96	13.53	16.62	
ARI-SA-19	Arizpe	19	30.35	-110.16	Suelo		13.10	26.03	10961.52	2063.35	13.64	15.47	
ARI-SU-20	Arizpe	20	30.37	-110.16	Suelo		10.40	30.83	6566.76	214.50	12.85	11.73	
ARI-SU-21	Arizpe	21	30.34	-110.16	Suelo		17.42	75.93	12724.37	583.14	15.76	13.73	
ARI-SA-22	Arizpe	22	30.34	-110.16	Suelo		11.49	6.59	10196.56	487.39	10.95	9.20	
ARI-SU-23	Arizpe	23	30.34	-110.16	Suelo		5.91	29.11	6466.11	250.54	6.06	9.92	
ARI-SE-24	Arizpe	24	30.34	-110.16	Sedimento		6.02	10.46	5098.62	220.77	9.60	15.62	
ARI-SE-25	Arizpe	25	30.34	-110.16	Sedimento		7.83	5.10	7175.90	275.55	9.16	17.10	
ARI-SE-26	Arizpe	26	30.34	-110.16	Sedimento		3.76	5.25	4052.47	178.41	11.85	9.79	
ARI-SU-27	Arizpe	27	30.34	-110.16	Suelo		8.42	9.20	7357.08	292.25	10.33	30.82	
ARI-SE-28	Arizpe	28	30.34	-110.16	Sedimento		8.94	7.15	6796.74	225.50	10.30	16.87	
ARI-SE-29	Arizpe	29	30.35	-110.15	Sedimento		7.52	7.37	5812.88	220.60	9.62	14.34	
ARI-SE-30	Arizpe	30	30.33	-110.15	Sedimento		7.25	7.35	7964.86	295.61	11.88	20.44	



Nombre del sitio	Localidad	ID	LAT	LON	Matriz	Al	As	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
ARI-SE-31	Arizpe	31	30.34	-110.16	Sedimento		7.21	11.80	6357.31	301.73	9.34	13.23	
ARI-SU-32	Arizpe	32	30.34	-110.16	Suelo		12.65	8.87	12930.15	786.10	15.63	35.69	
ARI-SU-33	Arizpe	33	30.35	-110.15	Suelo		11.89	12.17	17335.71	377.96	14.65	19.03	
ARI-SU-34	Arizpe	34	30.34	-110.16	Suelo		8.47	6.30	7683.32	322.20	9.40	10.62	
ARI-SU-35	Arizpe	35	30.34	-110.16	Suelo		13.54	11.57	10142.59	385.90	15.20	21.39	
ARI-SU-36	Arizpe	36	30.34	-110.16	Suelo		11.23	5.97	9177.07	329.52	11.71	20.10	
ARI-SE-37	Arizpe	37	30.34	-110.16	Sedimento		12.51	9.97	7171.88	311.83	13.94	17.34	
ARI-SU-38	Arizpe	38	30.34	-110.16	Suelo		9.16	8.51	7418.80	290.06	10.80	18.64	
ARI-SU-39	Arizpe	39	30.34	-110.15	Suelo		11.18	13.45	10691.51	667.82	11.19	20.19	
ARI-SE-40	Arizpe	40	30.33	-110.16	Sedimento		6.38	8.20	5737.33	276.48	6.74	9.50	
ARI-SU-41	Arizpe	41	30.33	-110.16	Suelo		16.56	8.64	16708.65	723.45	16.95	20.25	
ARI-SE-42	Arizpe	42	30.33	-110.16	Sedimento		5.38	6.95	6221.95	232.96	6.00	8.99	
ARI-SE-43	Arizpe	43	30.32	-110.17	Sedimento		6.29	7.11	6163.62	311.52	7.92	11.32	
ARI-SE-44	Arizpe	44	30.32	-110.17	Sedimento		10.20	8.36	7823.38	330.69	9.12	12.76	
BAC-SE-01	Bacoachi	1	30.66	-109.98	Sedimento		1.99	9.18	3870.19	156.76	2.42	16.46	
BAC-SE-02	Bacoachi	2	30.64	-109.96	Sedimento		1.34	7.64	3548.89	152.13	2.05	12.64	
BAC-SU-03	Bacoachi	3	30.64	-109.96	Suelo		4.15	16.97	7679.15	393.78	6.86	14.52	
BAC-SA-04	Bacoachi	4	30.64	-109.96	Suelo		3.93	7.07	10941.13	660.19	11.37	25.46	
BAC-SE-05	Bacoachi	5	30.66	-109.98	Sedimento		1.34	22.88	2922.10	134.12	1.90	9.91	
BAC-SU-06	Bacoachi	6	30.66	-109.98	Suelo		8.93	9.90	10192.35	752.81	10.89	29.77	
BAC-SU/SE -07	Bacoachi	7	30.64	-109.97	Suelo		3.32	14.81	5466.63	235.34	4.16	19.87	
BAC-SU-08	Bacoachi	8	30.64	-109.97	Suelo		6.40	10.03	7823.37	374.40	7.32	15.26	
BAC- SU/SE-09	Bacoachi	9	30.66	-109.97	Suelo		2.78	16.32	5657.17	187.10	3.49	15.94	
BAC-SU-10	Bacoachi	10	30.64	-109.97	Suelo		6.68	20.54	8828.22	594.98	12.23	18.86	
BAC-SE-011	Bacoachi	11	30.64	-109.97	Sedimento		3.58	11.30	6221.27	276.19	4.17	19.94	
BAC-SE-012	Bacoachi	12	30.64	-109.97	Sedimento		2.21	19.65	2984.58	162.22	2.13	12.74	



Nombre del sitio	Localidad	ID	LAT	LON	Matriz	Al	As	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
BAC-SE-013	Bacoachi	13	30.64	-109.97	Sedimento		1.89	26.03	25789.69	142.00	2.66	10.87	
BAN-SE-45	Banamichi	1	30.02	-110.22	Sedimento		4.07	9.27	3417.96	134.27	2.84	7.11	
BAN-SU-46	Banamichi	2	30.02	-110.22	Suelo		17.25	10.45	12084.51	621.30	12.72	20.30	
BAN-SU47	Banamichi	3	30.02	-110.22	Suelo		10.36	12.76	6951.73	235.97	6.41	16.04	
BAN-SE-48	Banamichi	4	30.02	-110.22	Sedimento		14.93	12.63	10528.18	232.91	10.45	14.59	
BAN-SU-49	Banamichi	5	30.02	-110.22	Suelo		13.04	24.36	8178.22	203.51	7.12	19.02	
BAN-SA-50	Banamichi	6	30.02	-110.22	Suelo		13.69	14.55	9648.62	418.51	9.41	14.57	
BAN-SE-51	Banamichi	7	30.01	-110.22	Sedimento		14.05	19.23	10752.71	573.89	10.37	16.36	
BAN-SU-52	Banamichi	8	30.01	-110.22	Suelo		20.97	18.59	16547.77	537.38	14.55	21.84	
BAN-SE-53	Banamichi	9	30.01	-110.23	Sedimento		7.15	27.41	6210.68	145.25	6.01	11.25	
BAN-SU-54	Banamichi	10	30.01	-110.22	Suelo		17.51	20.73	10642.02	546.60	13.29	23.05	
BAN-SU-55	Banamichi	11	30.01	-110.23	Suelo		7.11	21.17	5924.11	181.99	5.68	9.04	
BAN-SE-56	Banamichi	12	30.01	-110.23	Sedimento		15.07	27.34	11542.36	424.24	10.75	17.06	
BAN-SU-57	Banamichi	13	30.01	-110.23	Suelo		15.10	21.19	11322.43	421.13	11.11	18.37	
BAN-SU-58	Banamichi	14	30.01	-110.23	Suelo		11.05	19.35	8735.89	186.63	5.93	14.69	
BAN-SE-59	Banamichi	15	30.02	-110.22	Sedimento		7.11	26.78	7307.85	175.24	5.25	12.72	
BAN-SE-60	Banamichi	16	30.02	-110.22	Sedimento		13.27	14.63	9986.00	484.36	10.69	17.32	
BAN-SU-61	Banamichi	17	30.02	-110.22	Suelo		4.00	20.54	6422.51	144.65	3.35	9.69	
BAN-SE-62	Banamichi	18	30.02	-110.22	Sedimento		10.94	14.22	11336.51	815.12	9.06	17.46	
BAN-SE-63	Banamichi	19	30.02	-110.22	Sedimento		10.23	12.99	7511.70	176.61	7.14	22.57	
BAN-SU-64	Banamichi	20	30.02	-110.22	Suelo		16.69	19.84	9020.04	480.87	12.81	21.80	
BAN-SU-65	Banamichi	21	30.02	-110.22	Suelo		13.50	28.06	10790.64	357.14	9.49	15.87	
BAN-SE-66	Banamichi	22	30.02	-110.22	Sedimento		12.75	22.67	9826.86	254.51	8.37	19.99	
BAN-SE-67	Banamichi	23	30.02	-110.22	Sedimento		17.07	22.33	3395.52	33.16	12.20	21.81	

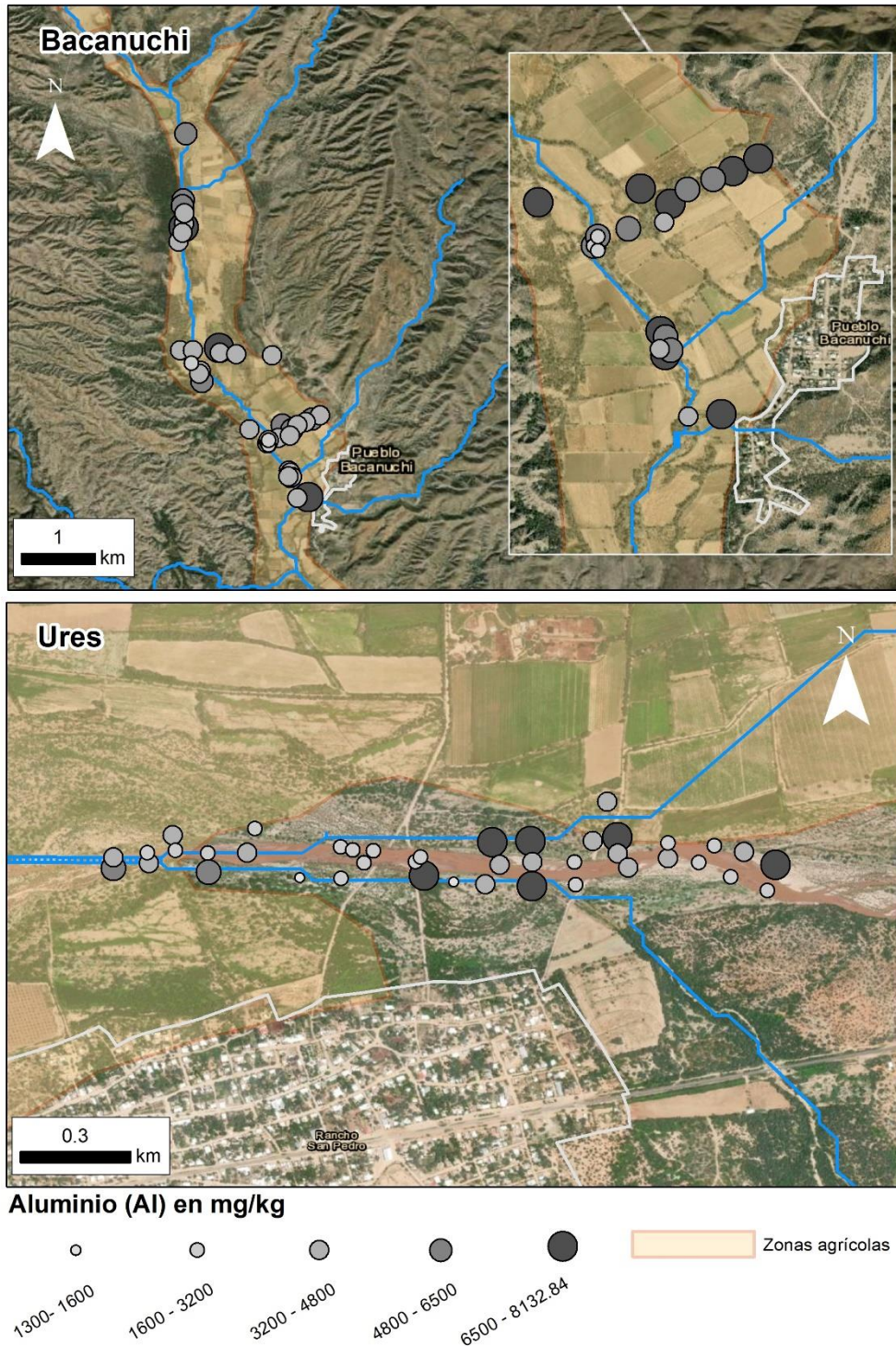


Figura 4.1 Mapa con resultados de concentración de Aluminio

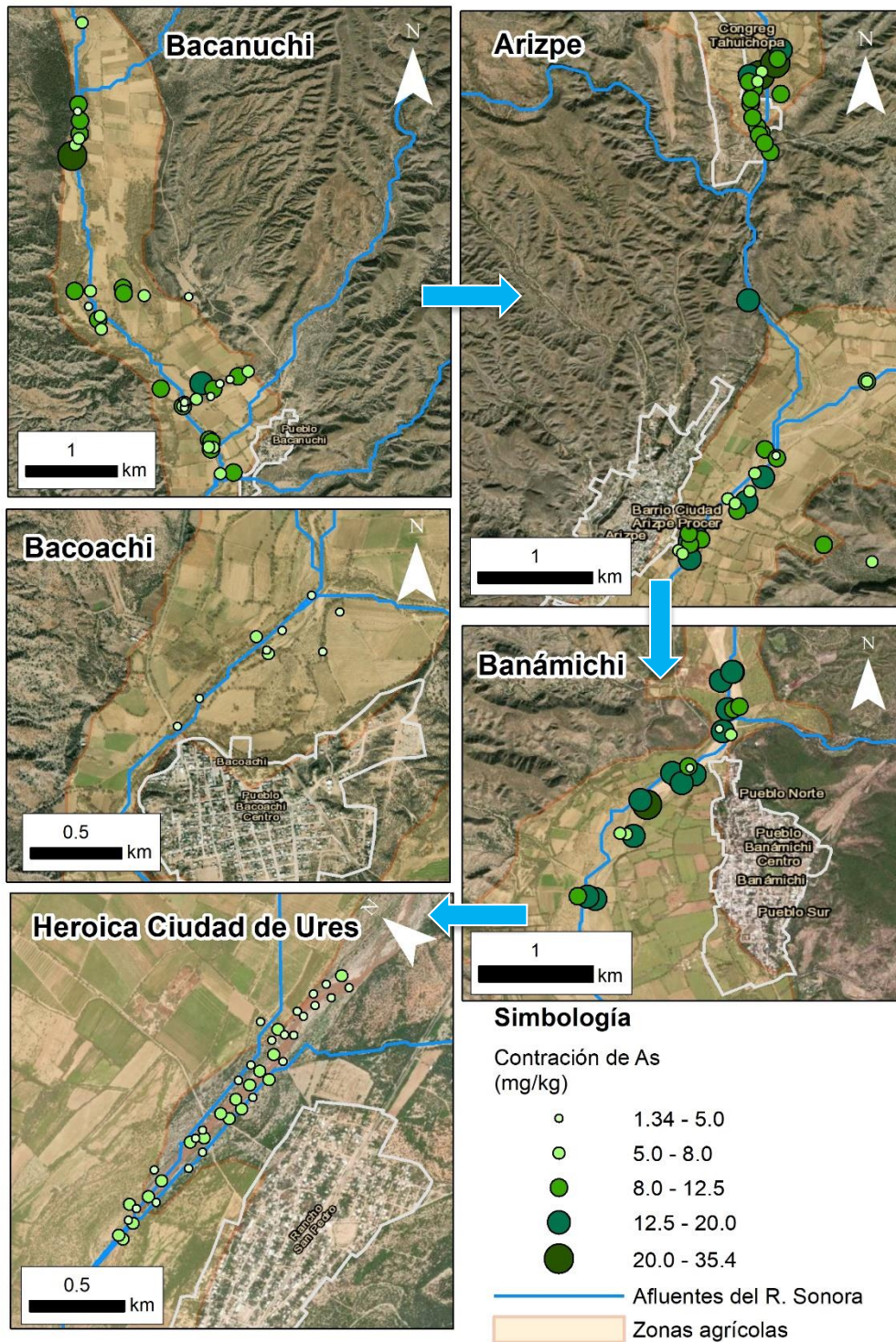


Figura 4.2 Mapa con resultados de concentración de Arsénico

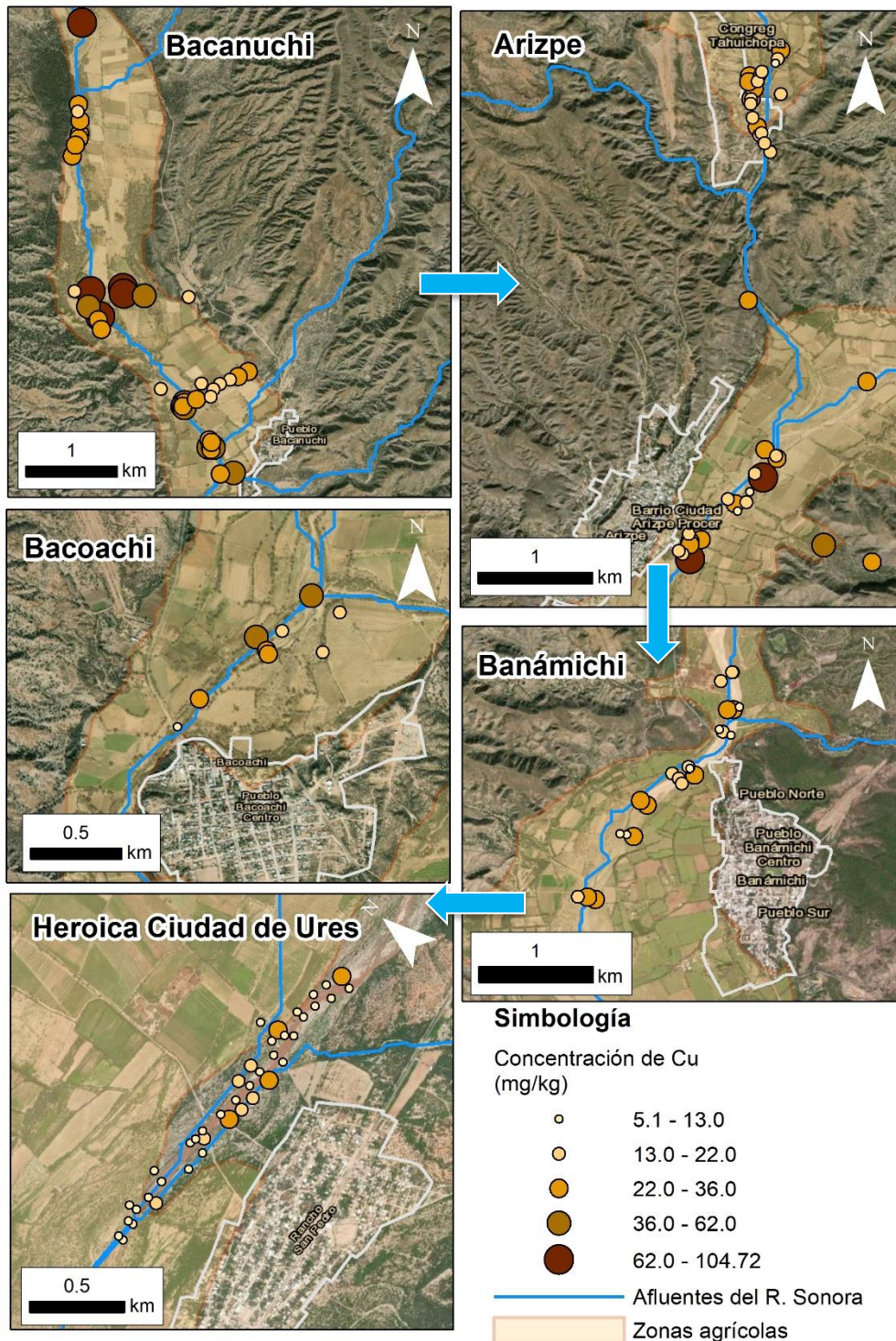


Figura 4.3 Mapa con resultados de concentración de Cobre

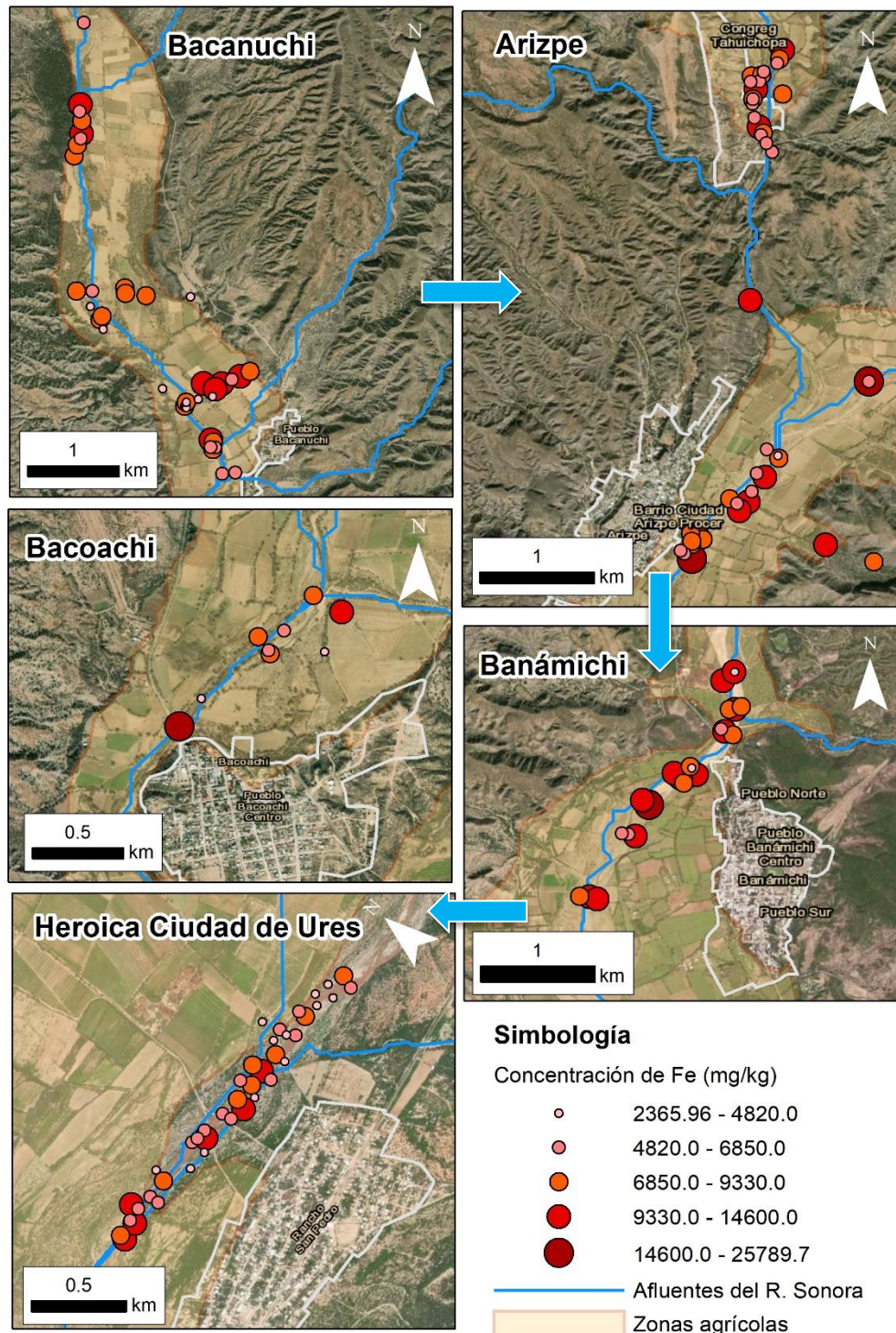


Figura 4.4 Mapa con resultados de concentración de Cobre

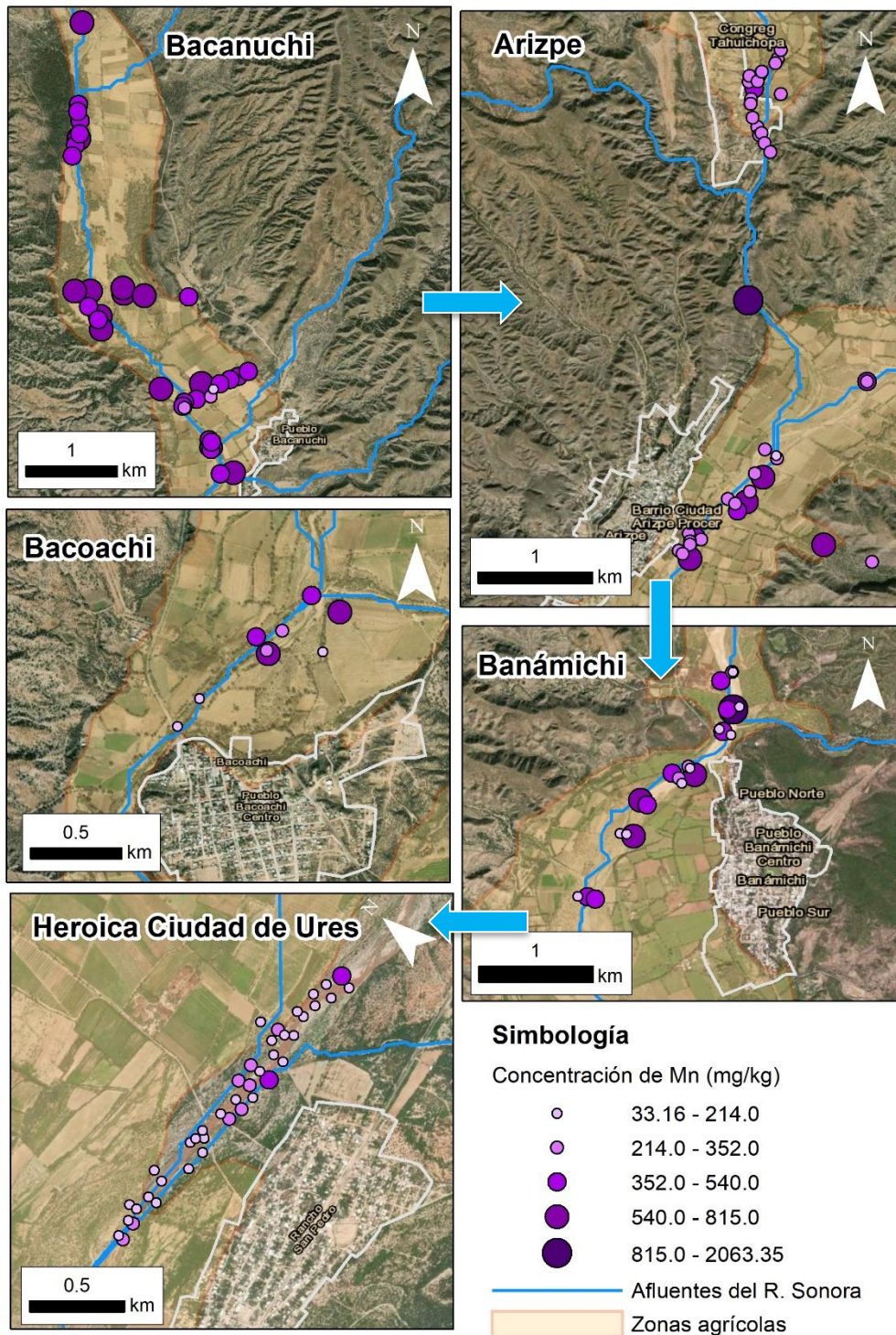


Figura 4.5 Mapa con resultados de concentración de Manganeso

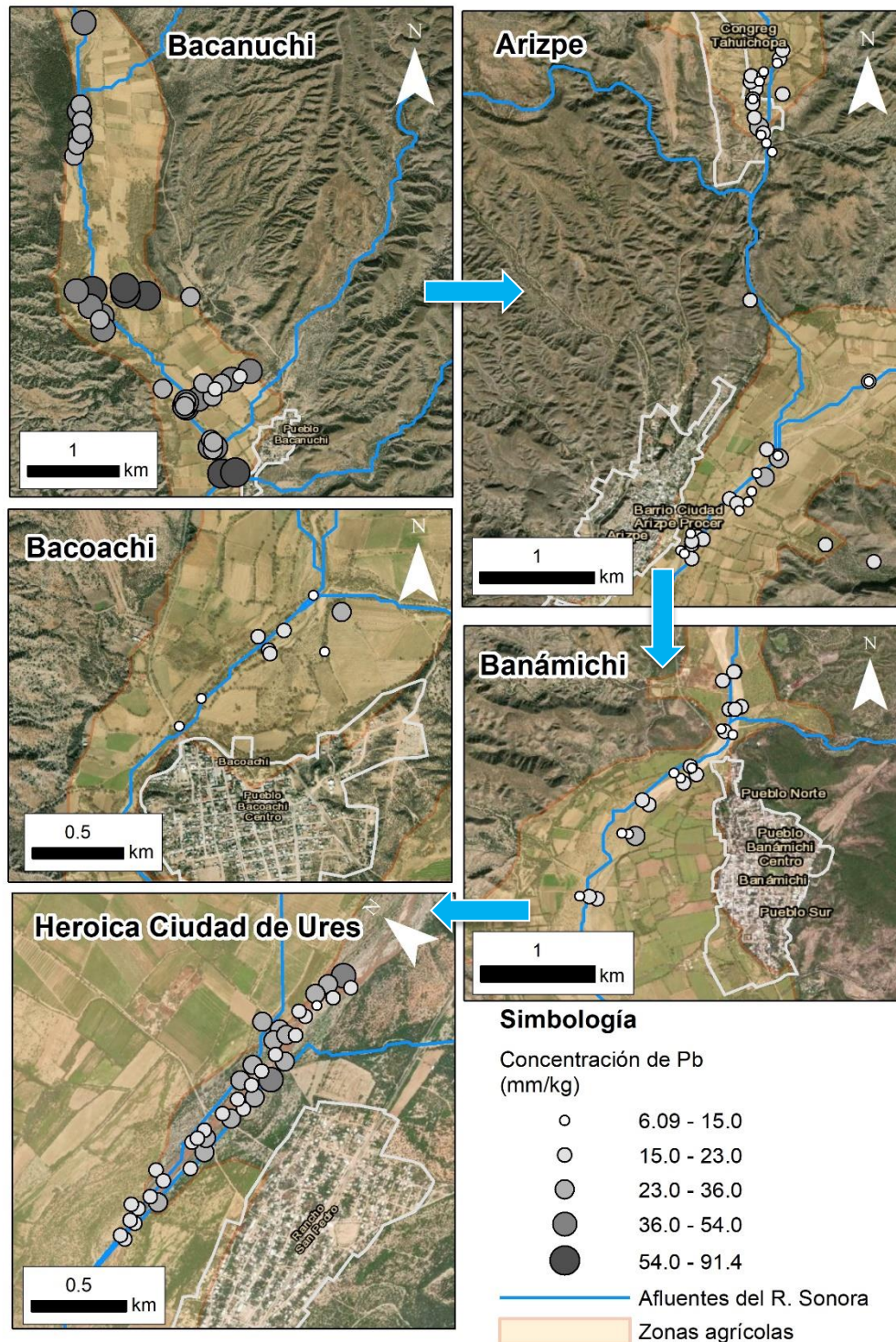


Figura 4.6 Mapa con resultados de concentración de Plomo

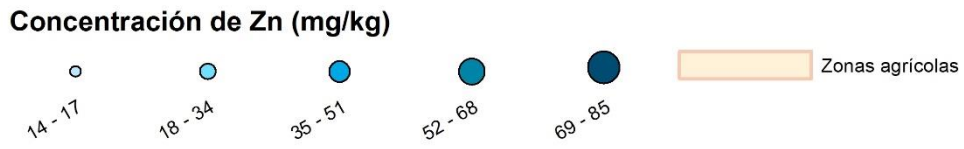
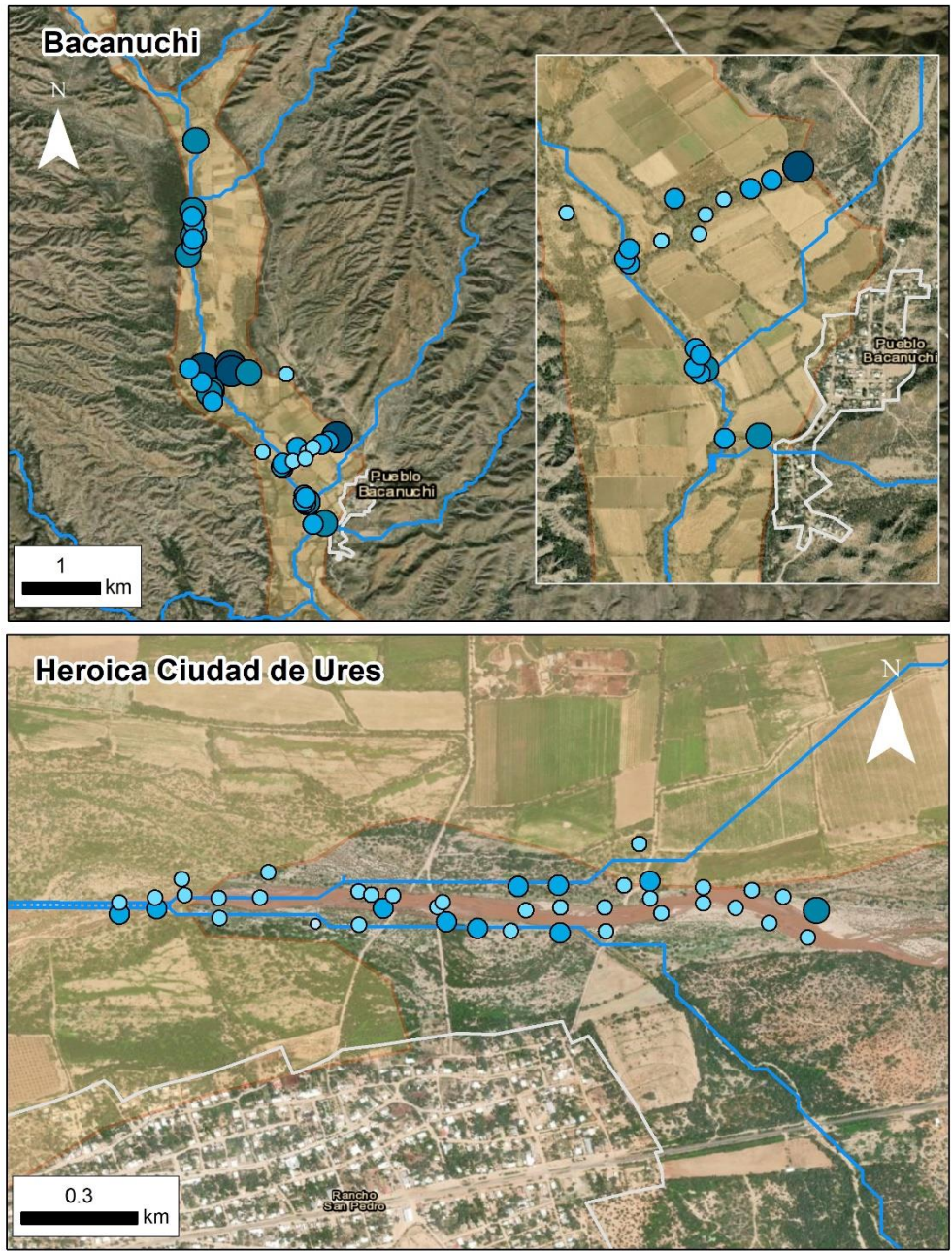


Figura 4.7 Mapa con resultados de concentración de Zinc





En las tablas siguientes se presenta una comparación de las concentraciones observadas contra los valores de fondo, derivados de la Geoquímica de la Cuenca del Río Sonora y emitidos por el Servicio Geológico Mexicano (SGM).

Tabla 4.2 Resultados estadísticos de concentración de Aluminio

Localidad	Aluminio (Al) en %					
	SGM			IMTA (2024)		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
Bacanuchi	2.73	3.64	5.48	0.22	0.44	0.69
Arizpe	2.92	3.72	4.27			
Banámichi	0.63	0.83	1.08			
Heroica Ciudad de Ures	1.97	2.23	2.49	0.14	0.33	0.81
Bacoachi	2.07	2.70	3.79			

Tabla 4.3 Resultados estadísticos de concentración de Arsénico

Localidad	Arsénico (As) en mg/kg					
	SGM			IMTA (2024)		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
Bacanuchi	16.20	23.98	37.60	4.13	8.38	35.40
Arizpe	19.50	25.60	38.10	3.76	10.46	29.22
Banámichi	8.60	12.17	14.60	4.00	12.47	20.97
Heroica Ciudad de Ures	2.16	3.00	3.83	1.99	4.78	7.45
Bacoachi	9.64	12.77	18.62	1.34	3.73	8.93





Tabla 4.4 Resultados estadísticos de concentración de Arsénico

Localidad	Cobre (Cu) en mm/kg					
	SGM			IMTA (2024)		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
Bacanuchi	23.00	31.30	38.00	13.43	35.72	104.72
Arizpe	19.00	21.86	26.00	10.32	24.31	97.36
Banámichi	10.00	13.67	17.00	6.07	18.98	35.95
Heroica Ciudad de Ures	5.46	23.66	41.85	5.10	11.64	29.11
Bacoachi	76.30	88.39	99.10	7.92	24.64	44.76

Tabla 4.5 Resultados estadísticos de concentración de Hierro

Localidad	Hierro (Fe) en %					
	SGM			IMTA (2024)		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
Bacanuchi	2.42	3.44	4.96	0.31	0.71	1.46
Arizpe	2.83	3.45	4.01	0.41	0.81	1.73
Banámichi	1.49	2.19	2.92	0.34	0.90	1.65
Heroica Ciudad de Ures	3.21	3.33	3.44	0.24	0.63	1.29
Bacoachi	5.03	5.57	6.43	0.29	0.78	2.58

Tabla 4.6 Resultados estadísticos de concentración de Hierro

Localidad	Manganeso (Mn) en mg/kg					
	SGM			IMTA		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
Bacanuchi	622.00	744.00	1032.00	211.24	489.31	812.08
Arizpe	533.00	616.29	679.00	178.41	362.12	2063.35
Banámichi	428.00	593.67	796.00	33.16	338.49	815.12
Heroica Ciudad de Ures	427.57	776.44	1125.30	83.67	198.96	493.01
Bacoachi	723.50	838.19	923.34	134.12	324.77	752.81





Tabla 4.7 Resultados estadísticos de concentración de Niquel

Localidad	Niquel (Ni) en mg/kg					
	SGM			IMTA (2024)		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
Bacanuchi	12.00	23.30	35.00	13.72	21.85	33.74
Arizpe	8.00	16.57	22.00	6.00	11.89	18.33
Banámichi	7.00	9.00	11.00	2.84	8.91	14.55
Heroica Ciudad de Ures	9.79	12.03	14.27	10.58	19.88	34.16
Bacoachi	13.16	15.74	18.88	1.90	5.51	12.23

Tabla 4.8 Resultados estadísticos de concentración de Plomo

Localidad	Plomo (Pb) en mg/kg					
	SGM			IMTA (2024)		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
Bacanuchi	9.00	20.70	46.00	20.94	40.27	91.40
Arizpe	3.00	10.57	19.00	6.10	15.85	35.69
Banámichi	22.00	29.33	44.00	7.11	16.63	23.05
Heroica Ciudad de Ures	13.71	15.86	18.01	14.60	22.81	43.48
Bacoachi	43.55	62.44	98.26	9.91	17.10	29.77

Tabla 4.9 Resultados estadísticos de concentración de Zinc

Localidad	Zinc (Zn) en mg/kg					
	SGM			IMTA (2024)		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
Bacanuchi	69.00	92.20	117.00	21.45	47.58	84.93
Arizpe	77.00	86.71	101.00			
Banámichi	41.00	46.67	50.00			
Heroica Ciudad de Ures	59.99	71.04	82.09	14.22	29.83	55.12
Bacoachi	96.13	115.15	148.20			





5. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue cuantificar las concentraciones de Aluminio, Arsénico (As), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) en la cuenca del Río Sonora. Para lograr esto se realizó una campaña en campo donde se colectaron y analizaron 160 muestras de suelo y sedimento en las localidades de Bacanuchi, Bacoachi, Arizpe, Banámichi y la Heroica Ciudad de Ures.

Los resultados de las muestras de suelo indican que aún persiste la contaminación de algunos metales pesados como el Arsénico, Cobre, Manganeso, Níquel y Plomo en altas concentraciones.

- En la parte alta de la cuenca, persisten las concentraciones más altas de arsénico, presentándose un valor mayor con 35.4 mg/kg en Bacanuchi; y con valores mayores a los de fondo para las localidades de Banámichi y Ures.
- Las mayores concentraciones de cobre persisten en la parte norte de la cuenca, con valores mayores a los de fondo para las localidades de Bacanuchi, Arizpe y Banámichi. El valor más alto de cobre fue de 104.72 mg/kg en Bacanuchi.
- El manganeso presenta los niveles más altos en Arizpe (2063.35 mg/kg) y Banámichi, superando los valores de fondo del SGM.
- Se observaron altas concentraciones de Níquel y Plomo en las localidades de Bacanuchi, Banámichi y Ures. Las concentraciones más altas de Níquel se presentaron para la Heroica Ciudad de Ures (34.16 mg/kg) y la concentración más alta de Plomo se registró en Bacanuchi (91.40 mg/kg).

Por otro lado, es importante resaltar que la localidad de Bacoachi (zona de control) registró concentraciones de metales pesados dentro del rango de los valores de fondo.





Lo anterior es un indicativo de que las altas concentraciones registradas en Bacanuchi, Arizpe, Banámichi y Ures no corresponden a valores normales de la geoquímica de la región, sino a una condición de contaminación persistente en la zona.

6. REFERENCIAS

Bird, G., Brewer, P. A., Macklin, M. G., Balteanu, D., Serban, M., Driga, B., & Zaharia, S. (2008). River system recovery following the Novaț-Roșu tailings dam failure, Maramureș County, Romania. *Applied Geochemistry*, 23(12), 3498–3518.

<http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.08.010>

Burgos, P., Madejón, P., Madejón, E., Girón, I., Cabrera, F., & Murillo, J. M. (2013). Natural remediation of an unremediated soil twelve years after a mine accident: Trace element mobility and plant composition. *Journal of Environmental Management*, 114, 36–45.

Journal of Environmental Management, 114, 36–45.

<http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.060>

Coulthard, T. J., & Macklin, M. G. (2003). Modeling long-term contamination in river systems from historical metal mining. *Geology*, 31(5), 451–454. [http://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0451:MLCIRS>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0451:MLCIRS>2.0.CO;2)

[http://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0451:MLCIRS>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0451:MLCIRS>2.0.CO;2)

Gil, F., Capitán-Vallvey, L. F., De Santiago, E., Ballesta, J., Pla, A., Hernández, A. F., ... Villanueva, E. (2006). Heavy metal concentrations in the general population of Andalusia, South of Spain. A comparison with the population within the area of influence of Aznalcóllar mine spill (SW Spain). *Science of the Total Environment*, 372(1), 49–57.

<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.08.004>

Kraus, U., & Wiegand, J. (2006). Long-term effects of the Aznalcóllar mine spill-heavy metal content and mobility in soils and sediments of the Guadiana river valley (SW Spain). *Science of the Total*





Environment, 367(2-3), 855–871.

<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.12.027>

Levit, S. M., & Bozeman, M. (2010). A Literature Review of Effects of Cadmium on Fish. *Nature*, (November), 16.

Miller, J. R. (1997). The role of fluvial geomorphic processes in the dispersal of heavy metals from mine sites. *JOURNAL OF GEOCHEMICAL EXPLORATION ELSEVIER Journal of Geochemical Exploration*, 58, 101-118. [http://doi.org/10.1016/S0375-6742\(96\)00073-8](http://doi.org/10.1016/S0375-6742(96)00073-8)

Riba, I., Conradi, M., Forja, J. M., & DelValls, T. A. (2004). Sediment quality in the Guadalquivir estuary: Lethal effects associated with the Aznalcóllar mining spill. *Marine Pollution Bulletin*, 48(1-2), 144-152. [http://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00391-6](http://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00391-6)

Sabater, S. (2000). Diatom communities as indicators of environmental stress in the Guadiamar River, S-W Spain, following a major mine tailing spill. *Journal of Applied Phycology*, 12(2), 113-124.

Santos, A., Alonso, E., Callejón, M., & Jiménez, J. C. (2002). Distribution OF Zn , Cd , Pb AND Cu Metals in Groundwater of the Guadimar River Basin. *Water, Air, and Soil Pollution*, 134(April 1998), 275-286.

Solà, C., Burgos, M., Plazuelo, Á., Toja, J., Plans, M., & Prat, N. (2004). Heavy metal bioaccumulation and macroinvertebrate community changes in a Mediterranean stream affected by acid mine drainage and an accidental spill (Guadiamar River, SW Spain). *Science of the Total Environment*, 333(1-3), 109-126. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.011>

UNAM, & ITSON. (2016). Diagnóstico Ambiental en la Cuenca del Río Sonora Afectada por el Derrame del Represo “Tinajas” de la mina Buenavista del Cobre, Cananea, Sonora.

