

## Calidad del agua en el río Sonora: resumen y análisis de los datos del Fideicomiso Río Sonora, 2014-2019

### Qualidade da água no Rio Sonora: Resumo e análise de dados do Rio Sonora Trust, 2014-2019

### Water quality in the Sonora River: Summary and analysis of data from the Río Sonora Trust, 2014-2019

Rolando E. Díaz-Caravantes<sup>1</sup>, Francisco M. Durazo-Gálvez<sup>2</sup>, Pablo A. Reyes Castro<sup>1</sup>, Héctor F. Duarte Tagles<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Estudios en Salud y Sociedad. El Colegio de Sonora.

<sup>2</sup>Departamento de Geología. Universidad de Sonora.

<sup>3</sup>Departamento de Medicina y Ciencias de la Salud. Universidad de Sonora.

**Cita:** Díaz-Caravantes RE, Durazo-Gálvez FM, Reyes Castro PA, Duarte Tagles HF. Calidad del agua en el río Sonora: resumen y análisis de los datos del Fideicomiso Río Sonora, 2014-2019. Rev Salud ambient. 2024; 24(2):189-205.

**Recibido:** 1 de septiembre de 2023. **Aceptado:** 2 de septiembre de 2024. **Publicado:** 15 de diciembre de 2024.

**Autor para correspondencia:** Rolando E. Díaz-Caravantes.

Correo e: rdiaz@colson.edu.mx

**Financiación:** La investigación no tuvo financiación de algún proyecto de investigación.

**Declaración de conflicto de intereses:** Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que hayan influido en la realización y preparación de este trabajo.

**Declaraciones de autoría:** Todos los autores contribuyeron al diseño del estudio y la redacción del artículo. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final.

#### Resumen

**Objetivo:** Examinar la base de datos de monitoreo de calidad del agua del Fideicomiso Río Sonora durante el período 2014-2019. **Metodología:** En primer lugar, los valores reportados en el monitoreo se confrontaron con los límites máximos permitidos en la norma oficial vigente, la guía de la OMS y los lineamientos para la protección de vida acuática; después, se resumieron los casos fuera del límite por sitio y mes para tener una perspectiva espacio-temporal de la base de datos. **Resultados:** Se encontraron ausencias de meses sin muestreo alguno, inclusive en los períodos más críticos posteriores al derrame; aun así, se confirmó la presencia extraordinaria de valores por fuera del límite permitido en el período más cercano al derrame y la permanencia de ciertos parámetros en los años subsecuentes a la contingencia. **Limitaciones:** Por tratarse de un primer acercamiento a la base de datos ya completa, no se analizaron las agrupaciones de parámetros por fuera del límite que se presentaron en ciertos meses y sitios, sin profundizar en todos los riesgos toxicológicos posibles. **Valor:** Alto mérito empírico para el estudio de los impactos de los desastres de origen minero. **Conclusiones:** El análisis de la base de datos del fideicomiso permite tener una perspectiva global del impacto en la calidad del agua del derrame del río Sonora y, asimismo, deja ver las fallas en la atención al desastre en cuanto al monitoreo.

**Palabras clave:** calidad del agua; monitoreo; derrame; río Sonora; normativa.

#### Resumo

**Objetivo:** Examinar o banco de dados de monitoramento da qualidade da água do Sonora River Trust durante o período 2014-2019. **Metodologia:** Primeiramente, os valores informados no monitoramento foram comparados com os limites máximos permitidos da norma oficial vigente, do guia da OMS e das diretrizes para proteção da vida aquática; em seguida, os casos fora do limite foram resumidos por local e mês para se ter uma perspectiva espaço-temporal do banco de dados. **Resultados:** Foram constatadas ausências graves de meses sem qualquer amostragem, mesmo nos períodos mais críticos após o derramamento; ainda assim, confirmou-se a presença extraordinária de valores fora do limite no período mais próximo do derrame e a permanência de determinados parâmetros nos anos subseqüentes à contingência. **Limitações:** Por se tratar de uma primeira abordagem a um banco

de dados já completo, não foram analisados os agrupamentos de parâmetros fora do limite ocorridos em determinados meses e locais, sem se aprofundar em todos os possíveis riscos toxicológicos. Valor: Alto mérito empírico para o estudo dos impactos dos desastres de origem mineira. Conclusões: A análise da base de dados confiável permite uma perspectiva global do impacto na qualidade da água do derramamento do Rio Sonora e, da mesma forma, revela as falhas na resposta a desastres, em termos de monitoramento.

**Palavras-chave:** qualidade da água; monitoramento; derramamento; rio Sonora; regulamentação.

### Abstract

Objective: Examine the water quality monitoring database of the Sonora River Trust during the period 2014-2019. Methodology: First, the values reported in the monitoring were compared with the maximum permitted limits of the current official standard, the WHO guide and the guidelines for the protection of aquatic life; then, the out-of-limit cases were summarized by site and month to have a spatiotemporal perspective of the database. Results: Serious absences of months without any sampling were found, even in the most critical periods after the spill; even so, the extraordinary presence of values outside the limit was confirmed in the period closest to the spill and the permanence of certain parameters in the years subsequent to the contingency. Limitations: Because it is a first approach to an already complete database, the groupings of parameters outside the limit that occurred in certain months and places were not analysed, without delving into all the possible toxicological risks. Value: High empirical merit for the study of the impacts of disasters of mining origin. Conclusions: The analysis of the trust database allows a global perspective of the impact on water quality of the Sonora River spill and, likewise, reveals the failures in disaster response, in terms of monitoring.

**Keywords:** water quality; monitoring; spill; Sonora River; regulations.

## INTRODUCCIÓN

El 6 de agosto de 2014, la mina Buenavista del Cobre, subsidiaria de Grupo México, derramó alrededor de 40 000 metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de lixiviado ácido a uno de los arroyos que alimenta al río Bacanuchi, afluente a su vez del río Sonora<sup>1</sup>. El entonces Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) lo declaró como "el peor desastre ambiental de la industria minera del país"<sup>2</sup>. Reportes de dependencias federales indican que el derrame fue causado por la falla de un amarre en un tubo de polietileno en una de las piletas de lixiviados y por la falta de una válvula en la piletas de demasías<sup>1</sup>.

Algunos de los primeros impactos ocasionados por este evento fueron la suspensión de 34 pozos en el área de riesgo, así como el cierre temporal (aproximadamente de un año) de la Presa El Molinito para prevenir que el agua contaminada llegara a la ciudad de Hermosillo, capital de Sonora. Adicionalmente, la salud humana también fue perjudicada. En un reporte publicado en agosto de 2015 se señala que un año después del derrame, fueron detectados 360 casos de enfermedades relacionadas con dicho acontecimiento<sup>3</sup>. Se dijo entonces que la vigilancia de salud continuaría hasta el 2029, 15 años después del derrame, debido a que se esperaba un mayor número de casos detectados durante este período<sup>3</sup>.

Además del daño ya ocurrido, continúa el peligro en esta cuenca, pues como está documentado, el número de los depósitos de residuos de origen minero, conocidos como presas de jales, aumentó de 719 hectáreas en 1974

a 2 273 en 2011<sup>4</sup>. Además, ha iniciado operaciones una nueva presa de jales en la parte superior de la cuenca del río Sonora que ocupará una superficie cercana a las 4 000 hectáreas en los próximos 40 años<sup>5</sup>.

A raíz de este evento, el 15 de septiembre de 2014 se conformó el Fideicomiso Río Sonora (FRS), cuya finalidad fue atender las consecuencias del desastre minero. Esto incluía llevar a cabo un monitoreo de calidad del agua de forma continua en el río Sonora durante los cinco años posteriores al suceso<sup>6</sup>.

El río Sonora tiene sus orígenes en el parteaguas con el río Bavispe en la Sierra Magallanes; su trayectoria es hacia el sur hasta entregar su flujo de agua en la Presa Rodolfo Félix Valdés, conocida como "El Molinito". La cuenca del río Sonora tiene una superficie total de 30 913 km<sup>2</sup>. Son siete los municipios rurales (con menos de 15 000 habitantes) afectados por el derrame del río Sonora: Arizpe, Banámichi, Huépac, San Felipe de Jesús, Aconchi, Baviácora y Ures; con una población total, en el año 2020, de 20 227 habitantes<sup>7</sup>.

En cuanto a la vida acuática en el río, se ha determinado la existencia de al menos ocho órdenes, 34 familias y 30 géneros de insectos acuáticos; además de una ictiofauna mayormente representada por las especies *Agosia chrysogaster*, *Catostomus wigginsi* y *Poeciliopsis occidentalis*<sup>8</sup>, especies endémicas que actualmente se encuentran listadas como amenazadas y bajo régimen de protección según la NOM-059-SEMARNAT-2010<sup>9</sup>.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Para este análisis se tomó la base de datos del monitoreo de la calidad de agua que aparece en el portal electrónico del Fideicomiso Río Sonora (FRS)<sup>10</sup>, y en el que se reportan y ubican 33 sitios de muestreo de agua subterránea<sup>11</sup> y 38 sitios de muestreo de agua superficial<sup>12</sup>. El FRS consideró en su análisis un total de 19 parámetros de calidad muestreados: 15 del tipo

químico (aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, fierro, manganeso, mercurio, níquel, plomo, zinc, sulfatos y pH), y cuatro parámetros de tipo físico (turbiedad, sólidos disueltos totales, conductividad electrolítica y temperatura).

En la tabla 1 se observa el número de muestreos por mes.

Tabla 1. Número de veces muestreado por mes: 2014-19

Muestreo	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Subterráneo	2014								13	30	4	1	1
	2015	N	N	N	N	N	N	5	4	1	1	1	1
	2016	1	1	1	1	1	3	5	4	1	1	2	1
	2017	1	1	1	2	1	5	4	5	1	1	2	N
	2018	1	1	2	1	3	5	4	5	2	1	1	N
	2019	N	N	N	N	N	N	N	N				
Superficial	2014								22	30	4	3	2
	2015	2	2	3	2	2	9	7	4	2	3	3	2
	2016	2	2	2	3	2	3	6	9	3	2	5	4
	2017	2	2	2	2	4	5	4	5	2	2	2	N
	2018	2	2	2	2	2	4	4	4	3	2	2	2
	2019	2	2	2	2	2	4	5	1				

N= No muestreado ningún parámetro en ese mes. Fuente: con base en FRS<sup>10</sup>.

Aunque el FRS se propuso monitorear la calidad de agua durante cinco años, en el caso del agua subterránea solamente se realizó por cuatro años, hasta noviembre de 2018 y no hasta agosto de 2019 como fue establecido por las autoridades federales. En el caso de agua superficial, sí se cumplió con el período. Asimismo, en el monitoreo del agua subterránea encontramos vacíos de información significativos, pues de enero a junio de 2015 y en diciembre de 2017 no se muestreó. Según se observa, en los dos primeros meses después de ocurrido el derrame (agosto y septiembre de 2014) fue cuando más se realizaron muestreos tanto de agua superficial como subterránea. La cantidad bajó a una o dos veces por mes en la mayoría de los meses y años siguientes.

Como se observa en la tabla 2, el monitoreo de agua subterránea comprendió un total de 53 392 registros de los 19 parámetros. Del total de registros, 28 325 (aproximadamente 53 %) corresponden a datos con algún valor numérico especificado; 23 111 (43 %) contenían la leyenda "ND" y 1 956 (4 %) la leyenda "NE". La nomenclatura "ND" significa No detectable, lo cual indica que el valor de la muestra es menor al que el instrumento de medición puede detectar, por lo tanto, se encuentra por debajo del parámetro permitido. "NE"

significa un análisis No Efectuado; se desconoce por qué estos análisis no se realizaron<sup>13</sup>.

De los 19 parámetros observados, la mayor parte se contrastaron con los límites permitidos en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, la cual era la vigente durante el período estudiado<sup>14</sup>, excepto el arsénico, el antimonio y el níquel, para los cuales se consideraron las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS)<sup>15</sup>. Esto obedece principalmente a que, para el antimonio y el níquel, no hay un parámetro aplicable en la norma oficial mexicana; mientras que, en el caso del arsénico se optó por seguir la guía de la OMS porque establece una mayor calidad de agua que la norma oficial mexicana: 0,025 mg/L en la NOM y 0,01 mg/L en la guía de la OMS. Solamente se consideró que los parámetros de conductividad electrolítica y temperatura no aplican (NA) algún tipo de límite por no tener punto de comparación, ni con la norma oficial mexicana ni con la guía de la OMS.

Por otra parte, el monitoreo de agua superficial comprendió un total de 88 788 registros de los 19 parámetros. Del total de registros, 59 430 (aproximadamente 67 %) corresponden a datos con algún valor numérico; 24 881 (28 %) contenía la leyenda "ND" y 4 477 (5 %) la leyenda "NE".

Tabla 2. Registros de agua subterránea: agosto de 2014-noviembre de 2018

Parámetro	Límite	Unidad	Total de registros	Registros "ND"	Registros "NE"	Registros con valor numérico	Registros dentro de límite	Registros fuera de límite
Aluminio (Al)	0,2	mg/L	3 068	980	104	1 984	1 855	129
Antimonio (Sb)*	0,02	mg/L	3 043	2 323	104	616	593	23
Arsénico (As)*	0,01	mg/L	3 043	1 963	104	976	752	224
Bario (Ba)	0,7	mg/L	3 071	62	104	2 905	2 905	0
Cadmio (Cd)	0,005	mg/L	3 071	2 385	104	582	580	2
Cobre (Cu)	2	mg/L	3 071	1 726	104	1 241	1 241	0
Conductividad electrolítica	NA	mg/L	2 221	0	104	2 117	NA	NA
Cromo (Cr)	0,05	mg/L	3 071	2 170	104	797	796	1
Fierro (Fe)	0,3	mg/L	3 071	427	104	2 540	2 269	271
Manganeso (Mn)	0,15	mg/L	3 059	1 344	93	1 622	1 535	87
Mercurio (Hg)	0,001	mg/L	3 071	2 060	102	909	894	15
Níquel (Ni)*	0,07	mg/L	3 071	2 305	103	663	663	0
Potencial de Hidrógeno (pH)	6.5-8.5	UpH	2 221	0	104	2 117	2 082	35
Plomo (Pb)	0,01	mg/L	3 040	2 361	103	576	570	6
Sólidos disueltos totales (SDT)	1 000	mg/L	2 221	1 985	104	132	132	0
Sulfatos (SO)	400	mg/L	2 347	14	104	2 229	2 051	178
Temperatura	NA	°C	2 216	0	99	2 117	NA	NA
Turbiedad (Tur)	5	UTN	2 348	569	104	1 675	1 596	79
Zinc (Zn)	5	mg/L	3 068	437	104	2 527	2 527	0
Total			53 392	23 111	1956	28 325	23 041	1 050

Nota: NA= No Aplica. Fuente: Con base en FRS<sup>10</sup>.

En México, la "Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales"<sup>17</sup> establece los Lineamientos de Calidad del Agua (LCA). Por esta razón, los valores de agua superficial compuesta total se contrastaron con dichos lineamientos. Cabe aclarar que algunos de estos parámetros son iguales a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89<sup>16</sup>, publicados en 1989, hace 34 años. Los LCA, según los artículos 222 al 224, indican el grado de calidad que deberá presentar el agua que sea vertida al destino inmediato posterior a su "explotación, uso o aprovechamiento", ya sea por una persona, física o moral, para poder exceptuar del pago de derechos de agua nacionales con las cuotas señaladas en el artículo 223-B<sup>17</sup>. En la tabla 4, de los parámetros de LCA especifican cuatro usos, uno de ellos es "Protección a la vida acuática: Agua dulce, incluye humedales"; el conjunto de parámetros para este uso será el examinado en este estudio. Con base en los resultados de la tabla 3, al igual que para el agua subterránea, se seleccionaron los parámetros que

presentaron al menos un caso fuera del límite permitido de los LCA, es decir, fueron considerados 13 de los 19 parámetros y fueron descartados seis parámetros que no tenían especificado un criterio en los LCA.

Estos datos se compilaron y resumieron en una tabla para el agua subterránea y otra para el agua superficial con los resultados observados. En las tablas de resultados 4 y 5, se observan los meses que tuvieron por lo menos algún caso fuera del límite permitido. Gracias a este resumen, los resultados se pueden observar desde una perspectiva espacio-temporal según cuándo y dónde ocurrió el muestreo.

Aunque esta forma de agregación puede perder el detalle de si un elemento se presentó fuera del límite más de una vez en un solo mes, consideramos que es la mejor forma de resumir la información contenida en la base de datos del FRS.

Tabla 3. Registros de agua superficial: agosto de 2014-agosto de 2019

Parámetro	Límite	Unidad	Total de Registros	Registros "ND"	Registros "NE"	Registros con valor numérico	Registros dentro del límite	Registros fuera del límite
Aluminio (Al)	0,05	mg/L	5 173	39	235	4 899	553	4 346
Antimonio (Sb)	0,09	mg/L	5 123	3 667	235	1 221	1 219	2
Arsénico (As)	0,2	mg/L	5 174	2 977	235	1 962	1 901	61
Bario (Ba)	0,01	mg/L	5 174	20	235	4 919	8	4 911
Cadmio (Cd)	0,004	mg/L	5 173	3 605	235	1 333	978	355
Cobre (Cu)	0,05	mg/L	5 173	1 915	235	3 023	2 059	964
Conductividad electrolítica	NA	µS/cm	3 507	7	236	3 264	NA	NA
Cromo (Cr)	0,05	mg/L	5 172	2 409	235	2 528	2 194	334
Hierro (Fe)	1	mg/L	5 174	6	236	4 932	3 181	1 751
Manganeso (Mn)	NA	mg/L	5 174	122	235	4 817	NA	NA
Mercurio (Hg)	0,001	mg/L	5 174	2 156	245	2 773	2 389	384
Níquel (Ni)	0,6	mg/L	5 140	2 808	235	2 097	2 068	29
Potencial de Hidrógeno (pH)	6,5-8,5	UpH	3 514	0	235	3 279	2 980	299
Plomo (Pb)	0,03	mg/L	5 173	3 226	235	1 712	978	734
Sólidos disueltos totales (SDT)	NA	mg/L	3 714	1 277	235	2 202	NA	NA
Sulfatos (SO)	NA	mg/L	3 715	9	235	3 471	NA	NA
Temperatura	NA	°C	3 512	0	235	3 277	NA	NA
Turbiedad (Tur)	NA	UTN	3 729	22	235	3 472	NA	NA
Zinc (Zn)	0,02	mg/L	5 100	616	235	4 249	2 095	2 154
Total			88 788	24 881	4 477	59 430	22 603	16 324

Nota: Aunque fue solicitado al gobierno federal el dato sobre el Límite de Detección (LD) de los instrumentos de recolección de las muestras, este respondió que lo desconocía porque la información fue recogida por un laboratorio privado (Laboratorio ABC). Sin embargo, en su respuesta aseguraron que "los valores fueron menores al límite mínimo establecido" (13). Por esta razón, en este estudio se consideró dentro del límite permitido.

NA= No Aplica. Fuente: Con base en FRS<sup>10</sup>.

## RESULTADOS

### 1. AGUA SUBTERRÁNEA

En la tabla 4 se presentan los resultados del monitoreo de calidad de agua subterránea según los parámetros fuera del límite permitido durante un determinado mes por cada sitio de muestreo. En la tabla se puede identificar, según el color, el número de parámetros fuera del valor permitido. Las filas fueron ordenadas de norte a sur (de arriba a abajo) para tener una visión geográfica de los parámetros, y a su vez, las columnas del mes-año se ordenaron del parámetro más antiguo al más reciente (de izquierda a derecha) para identificar la dimensión temporal.

La información de la Tabla 4 puede orientar futuras investigaciones; sin pretender agotar todos los datos,

podemos destacar los patrones identificables en este acercamiento. En cuanto a la dimensión temporal, es decir, las columnas de meses, lo primero que llama la atención es la inconsistencia en muestrear por lo menos una vez al mes. De los cinco años (60 meses) que debió permanecer el monitoreo, hubo 15 meses que no se llevó a cabo: los ocho meses que faltaron, de diciembre de 2018 a julio de 2019, más otros siete meses, de enero a junio de 2015 y diciembre de 2017. De todos estos, lo más crítico es la ausencia de datos durante el primer semestre de 2015, cuando todavía ni se cumplía el año del derrame. No hay claridad sobre por qué ocurrió esta omisión, pues los sitios de muestreos eran los pozos de las localidades, en los cuales se dispone de agua durante todo el año. Aún más, en el período inmediato al derrame, de agosto a diciembre de 2014, hay una ausencia grave en los meses de agosto y noviembre, pues en 42 % y 39 % de los sitios, respectivamente, no se realizó ningún muestreo.



Tabla 4 (continuación). Parámetros de agua subterránea fuera del límite según sitio de muestreo

Año/Mes	2017												2018										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Bacanuchi																							
Tahuichopa						d2		b3										a2					a4
Arizpe pozo 3																		a2			a2		
Arizpe pozo 2																		a2			a10		
Bamori				a4			a4							a2				a2			a2		
Sinoquipe		a2					a1											a2			a1		
Banamichi					a10	b9							a2	a2		a2		a2		b10			a2
Las Delicias								a4												a1			
Huepac							a7							a2				a7					
Ranchito de Huepac						d9								a2		a1							
San Felipe		a4	b10				a2							a2									
Pozo Aconchi														a2									
La Estancia						a7	a1							a2			a2						
San Pablo						b10								a2		a10			a6	c1	a2		
San Jose de Baviacora							a2							a2					a9	a2			
Baviacora 3				a6																			
Baviacora 2	a2					a4												b1					
Baviacora 1					a4			b6						a2					a9	a1			
La Capilla				a6				a9								a9	b6			a2			
La Labor	a6	a6	a6			a6	a6	a6	a6	a6	a6	a6	a6	a6	a6	a6	a6	b13	b7	a6	a6	b7	
El Molinote					b10	c2	c3		b5	a4						a9							
La Aurora 2	a9			a6	a4		a9	b6									a9		a9	a2		a9	
La Aurora 1				a6			a9	a7									a9		a9				
Mazocahui	a9			a6			a9	c10	a9							a9	a9	d1	a9				
Puerta del Sol	a10	b10	a4	a4	a4	d2	b10	b10		b10	a4		b10		a4	b10	a4	d2	d2	e2	d6	b10	b10
San Pedro de Ures	a4	a4					a4																
Ures								a7															
Santiago de Ures							a9	a9											a1				
Guadalupe de Ures				a9			a9	a9									a9				a9		
San Rafael de Ures	a9	a9	a9	a9	a9	a9	a9	a9	a9		a9		a9	a9	d5	a9	b6	a9	a9	c7	b6	a9	
San Jose de Gracia		a2		a9		a7	b6	b15							a2			c9	a9	b6			
Topahue							a4	b11	a9											a2		a9	
El Molinito		a2	a2	a2	a2	a2	a2	a2	a2				a2	a2	a2	a2	a2	a2	a2	a2	a2	a2	a2



Tabla 4 (continuación). Parámetros de agua subterránea fuera del límite según sitio de muestreo

1 elemento		2 elementos		3 elementos		4 elementos		5 elementos		6 elementos	
a1	Al	b1	Al Tur	c1	Al Mn Tur	d1	Al Fe SO Tur	e1	Al Fe Mn SO Tur	f1	Al Sb As Fe Hg Tur
a2	As	b2	Al SO	c2	Al Fe Tur	d2	Al Fe Mn Tur	e2	Al Fe Mn Pb Tur	f2	Al Sb As Fe Hg SO
a3	Cd	b3	Al Fe	c3	Al Fe SO	d3	Al Fe Mn Pb	e3	Al As Fe Pb Tur		No Muestreado
a4	Fe	b4	As Tur	c4	Al Fe Hg	d4	Al Fe Mn Hg	e4	Al As Fe Mn Hg	NE	No Especificado
a5	Hg	b5	So Tur	c5	Al As Fe	d5	Al As SO Tur	e5	Al Sb As Fe Tur		Dentro del límite
a6	Mn	b6	As SO	c6	Al Sb Fe	d6	Al As Fe Tur	e6	Al Sb As Fe Hg		
a7	pH	b7	As Mn	c7	As SO Tur	d7	Al As Fe Hg	e7	Al Sb As Fe Mn		
a8	Sb	b8	As Fe	c8	As Fe Tur	d8	Al Sb As Fe	e8	Sb As Cd Fe Hg		
a9	SO	b9	Fe pH	c9	Fe SO Tur	d9	As Cr Fe Tur				
a10	Tur	b10	Fe Tur	c10	Fe Pb SO						
a11	Pb	b11	Fe SO	c11	Fe Hg Pb						
		b12	Fe Hg	c12	Sb As SO						
		b13	Mn SO								
		b14	Sb As								
		b15	SO pH								

Aun con estas inconsistencias, los datos del monitoreo del FRS permiten asegurar que el período de agosto a diciembre de 2014 fue el más elevado en cuanto al número de meses con valores por fuera del límite permitido en por lo menos tres cuartas partes de los sitios. Durante estos meses fue cuando se presentó el mayor número de parámetros fuera del límite en su conjunto, pues hubo presencia de hasta cinco o seis de ellos a la vez. Estos datos despejan cualquier duda sobre la existencia o no de la contaminación en el río Sonora por el derrame tóxico de origen minero del 6 de agosto de 2014, pues es evidente que los parámetros fuera del límite se dispararon cuantitativamente.

También es importante mencionar que, en los años subsiguientes al primer año del derrame continuó la presencia de parámetros fuera del límite permitido en todos los sitios, en por lo menos una tercera parte del total de los meses.

En cuanto a la dimensión espacial, es decir, las filas de la tabla 4 con los sitios de muestreo, encontramos que en todos los sitios hubo meses no muestreados. Sin considerar los ocho meses que faltaron para completar los cinco años de monitoreo (de diciembre de 2018 a julio de 2019), debería haber un total de 52 meses muestreados (desde agosto de 2014 a noviembre de 2018). No obstante, es clara la inconsistencia del monitoreo, pues en el conjunto de todos los sitios, en 23 % de los meses no hubo muestreo, mientras que en casos como Sinoquipe, Las Delicias y San Pedro de Ures arriba de 40 % de los meses no hubo.

Como vemos en la tabla 4, en todos los sitios hay varios meses con, por lo menos, un parámetro fuera del límite permitido. Sin considerar los meses en que no hubo resultados de la muestra, en una tercera parte de los meses muestreados hay presencia de valores fuera del límite. En 12 localidades fue mayor a una tercera parte, de las cuales resaltan La Labor, Puerta del Sol, San Rafael de Ures y El Molinito (Molino de Camou) por arriba de 80 %.

De los parámetros, destaca en particular el arsénico (As), ya que de manera consistente se presentó como elemento único fuera de norma en todos los años de muestreo a lo largo de la cuenca, aunque de manera constante a través de los años en el sitio El Molinito. El arsénico también se presentó en combinación con antimonio (Sb) por arriba de norma en 2014 (clasificado por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer-IARC como carcinógeno, confirmado el primero y el segundo como posible carcinógeno en humanos). Posteriormente, el As volvió a presentarse por arriba del nivel máximo permitido ahora en conjunto con los sulfatos en los años siguientes en diferentes localidades. De hecho, el parámetro sulfato se presentó por sí solo fuera de la norma también de forma consistente todos los años monitoreados. De especial preocupación fue la detección de mercurio (Hg) en concentraciones mayores a lo permitido en la norma en varias localidades, dado que a esa dosis (6 µg/L de agua) puede provocar daño en el sistema nervioso central, con mayor riesgo para los niños que consumen proporcionalmente mayor cantidad de agua en tiempo de calor. Aunque según los registros la detección de Hg por arriba de la norma mexicana ocurrió solamente en 2014, es importante tomar en



cuenta que el límite máximo recomendado por la OMS es seis veces menor ( $1 \mu\text{g/L}$ ). Otros metales de importancia en salud ambiental que se observaron con alta frecuencia en ese año fueron el plomo (Pb) y el manganeso (Mn); el segundo registrándose de manera continua en la localidad La Labor. La exposición al manganeso se ha relacionado con efectos neurocognitivos y neuromotores en los primeros años de vida<sup>18</sup>.

## 2. AGUA SUPERFICIAL

En la tabla 5 se presentan los resultados del monitoreo de calidad de agua superficial para la protección de la vida acuática según los valores fuera del límite permitido durante un determinado mes por cada sitio de muestreo.

Acercas de la tabla 5, podemos destacar los siguientes patrones identificables: en cuanto a la dimensión temporal, es decir, las columnas que hacen referencia a los meses, resalta, al igual que en la tabla 4, la inconsistencia en muestrear por lo menos una vez al mes; de los cinco años que debió permanecer el monitoreo, en una tercera parte de los meses no hubo muestreo alguno, destacando de manera particular el mes de diciembre de 2017, sin ningún muestreo.

Descartando los meses no muestreados, llama la atención que en los meses de agosto es cuando más valores en conjunto estuvieron por fuera del límite permitido de calidad del agua, aunque ninguno fue como agosto de 2014, pues en el 90 % de los sitios muestreados se presentaron siete parámetros o más. Septiembre de 2014 fue un caso extraordinario respecto a los otros años, pues también casi en el 90 % de los sitios se presentaron de manera conjunta siete parámetros o más por fuera del lineamiento. Así como se observa en el agua subterránea (tabla 4), estos datos confirman la existencia de la contaminación en el río Sonora debido al derrame tóxico de origen minero del 6 de agosto de 2014.

En cuanto a la dimensión espacial, es decir, las filas con los sitios de muestreo, encontramos que en todos los sitios hubo meses no muestreados. Dentro de estos destacan, con la mitad o más de meses no muestreados, el Arroyo Jaralito, Banámichi, Huépac, Ranchito de Huépac, San Felipe, San José de Baviácora, Las Delicias, San Pedro de Ures, Ures, Santiago de Ures y Topahue; de dichas poblaciones, sobresalen las últimas cinco, con más del 70 % de meses no muestreados. En estos mismos cinco sitios, más de la mitad de los meses sí muestreados resultaron con presencia de siete o más parámetros por fuera del lineamiento.

El parámetro presente en todas las combinaciones de todos los meses es el bario (Ba), lo cual puede ser explicado por el parámetro asignado en el Lineamiento

de Calidad de Agua. El otro elemento con mayor presencia es el aluminio (Al), con un caso similar al bario. Dado que el bario, el aluminio o ambos están presentes en todos los meses, se tiene por lo menos un elemento fuera del lineamiento en cada mes. El Ba está clasificado por la EPA como no cancerígeno (grupo D), pero ingerido como carbonato ( $\text{Ba}_2\text{CO}_3$ ) a concentraciones mayores a  $2 \text{ mg/L}$  podría provocar hipokalemia, que tendría efectos en tejido muscular y cardíaco.

## DISCUSIÓN

En 2022, la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua contaba con 2 050 sitios de muestreo, los cuales monitoreaban principalmente tres parámetros: la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST), los cuales se monitorean para determinar los niveles de contaminación por aguas residuales de tipo domésticas e industriales y agrícolas<sup>19</sup>.

Estas mediciones de calidad del agua para el caso del río Sonora resultan exiguas ante la contingencia ambiental ocurrida en 2014, ocasionada por un derrame de  $40\,000 \text{ m}^3$  de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) producto de la actividad de los lixiviados de la minera Buenavista del Cobre, subsidiaria de Grupo México.

Como respuesta a este evento, el gobierno federal planteó el monitoreo de la calidad del agua del río Sonora con 19 parámetros. De esta base de datos podemos destacar los siguientes puntos.

En primer lugar, se puede identificar la falta de consistencia en la captura de datos del monitoreo implementado desde que ocurrió el derrame. En el caso del agua subterránea el monitoreo solamente se realizó por cuatro años y no los cinco anunciados. Asimismo, de enero a junio de 2015 y en diciembre de 2017 no se muestreó; además, por un período de dos meses, de julio a agosto de 2015, no se observan valores numéricos para buena parte de los metales estudiados, sino solamente la abreviatura "NE". En cuanto al agua superficial, hay un buen número de estos casos en 2015.

En segundo lugar, la base de datos permite ver nítidamente que el período de agosto a diciembre de 2014 fue el más peligroso, en donde se presentaron valores fuera del límite permitido en la gran mayoría de los sitios. Esta información, confirma y no deja lugar a dudas, del impacto en la calidad del agua del río Sonora debido al derrame tóxico de origen minero.

En tercer lugar, mediante este primer abordaje de los datos en su conjunto se confirma la permanencia

Tabla 5. Parámetros de agua superficial fuera del límite para la protección de la vida acuática según sitio de muestreo

Año/Mes	2014				
	8	9	10	11	12
Arroyo Jaralito			c2	a1	c2
Bacanuchi - El Molino	g8	i5	d6	b1	c2
Bacanuchi - La Trampa	g7	i5	c2	b1	c2
Tahuichopa	h5	i5	d4	a1	a1
Arizpe	i4	h3	d4	b4	b3
Bamori	i4	i5	c4	b1	b1
Sinoquipe	i7	h3	d7	b1	a1
Tajo Banamichi	g3	d4			
Banamichi	j2	i2	d7	a1	
Las Delicias	i4	h3	d7		
Huepac	j2	j3	e4		
Ranchito de Huepac	j2	i5	d6	b1	b1
San Felipe	h5	i5	e4	b1	
Aconchi	k1	i5	d6	b1	b1
La Estancia	j2	i5	e4	b1	a1
San Jose de Baviacora	i4	i4	e4	b1	c2
Baviacora	h3	h3	e4	b1	b1
La Capilla Rio	d11	h3	e4	b1	b1
El Molinote	i4	h3	e4	b1	b1
La Labor	j3	j3	e4	b1	c2
La Aurora	j3	h3	e4	b1	c2
Mazocahui	j3	h3	e4	b1	b1
Puerta del Sol	i4	i4	d6	b1	b1
San Pedro de Ures	j3	h3	g3		
Ures	i4	i4	f7		
Santiago de Ures	i4	i4	g3	b1	
Guadalupe de Ures	j3	i4	f7	b1	b1
San Rafael de Ures	h5	j3	e4	b1	b1
El Gavilan	i4	i5	d6	b1	b1
San Jose de Gracia	i4	i4	f8	b1	b1
Topahue	i4	i4	e9		
Boquilla Orégano	e4	f8	e4	b1	b1
El Oregano	i4	i4	f8	c2	a1
MET-SON-1					
MET-SON-2					
Molinito Vaso 1	d4	g3	c4	b1	b1
Molinito Vaso 2	g3	e4	c4	b1	b1
Molinito Obra de Toma	e4	e4	e4	b1	b1

Tabla 5 (continuación). Parámetros de agua superficial fuera del límite para la protección de la vida acuática según sitio de muestreo

Año/Mes	2015											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Arroyo Jaralito	a1	d13	b1	b1	b1	c1	d1	f7	a1	b1	c1	
Bacanuchi - El Molino	a1	c10	b1	a1	a1	a1	e9	c1	b3	a1	a1	
Bacanuchi - La Trampa	a1	d13	a1	c2	a1	c1	d1	d1	b1	b1	f4	
Tahuichopa	a1	d13	b1	b1	b1	b2	c2	d6	e4	b1	b1	a1
Arizpe	b1	g6	b1	b1	b1	c1	d6	f9	d6	a1	b1	b5
Bamori	b1	g6	c1	b1	c1	c1	d6	c1	e1	b1	c1	d3
Sinoquipe	b1	g6	b1	c2	b2	NE	g3	f6	d5	b1	c1	d14
Tajo Banamichi	b1	d13	b1	b1	c2	b1	d6	b1	b2	a1	a1	b1
Banamichi	NE	g6	d5	NE	NE	NE	e1	e1	d6			
Las Delicias	NE	h4	NE	NE	NE	NE	e1	NE	NE			
Huepac	NE	g6	c2	b1	c3	b1	d6	b1	d1	b1	a1	b1
Ranchito de Huepac	NE	h4	c1	NE	NE	NE	e1	e5	b1	b1	c1	c1
San Felipe	c1	f7	b1	NE	NE	NE	d6	g5	c2	b1	c1	d8
Aconchi	b1	f7	c2	b1	b1	b3	d6	e2	b1	b1	b1	b3
La Estancia	b1	f7	b1	b1	a1	b1	e2	e1	b1	b1	b1	c8
San Jose de Baviacora	b1	f7	b1	NE	NE	NE	e2	d6	NE	b1	c1	c1
Baviácora	b1	f7	c2	b1	b1	b1	f3	d6	e1	c5	b1	b1
La Capilla Rio	b1	i4	c2	b1	b1	c2	e2	NE	c1	c1	b1	d4
El Molinote	b1	i4	c2	c2	b1	a1	e2	d6	c1	c1	b1	b1
La Labor	b1	i4	b1	b1	b1	b1	e2	f1	d5	c5	b1	c1
La Aurora	b1	i4	c2	b1	b1	b1	g5	e1	d6	b1	c1	d12
Mazocahui	b1	i4	b1	b1	b1	c2	f7	f4	d6	b1	c1	d1
Puerta del Sol	b1	h6	b1	NE	NE	NE	f7	f6	g2	d6	e1	d5
San Pedro de Ures	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	e9	g3			
Ures	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	e9	g5			
Santiago de Ures	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	f9	f7			
Guadalupe de Ures	b1	d13	b1	NE	NE	NE	NE	f9	d6	d6	b1	c1
San Rafael de Ures	b1	d13	c2	b1	c4	c1	b1	h2	b1	d6	b1	b1
El Gavilan	b1	d13	b1	b1	b1	c1	c2	i5	b1	d1	c1	c1
San Jose de Gracia	b1	d13	b1	NE	NE	e1	NE	e9	d5	e1	e1	c1
Topahue	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	d6	NE			
Boquilla Orégano	b1	e11	b1	b1	b3	d1	c2	c2	d1	c1	c1	c4
El Oregano	b1	d13	c2	c2	b1	e1	d1	f9	b1	c1	c1	c1
MET-SON-1	b1	g6	b1	c2	b1	c1	c2	e9	d6	b1	c1	c4
MET-SON-2	NE	d13	c2	NE	NE	NE	NE	c2	d6	a1		
Molinito Vaso 1	c2	d13	a1	b1	a1	c7	c2	c2	d11	c1	c1	b1
Molinito Vaso 2	b1	d13	c2	c2	a1	e5	b1	c2	c2	c1	c1	c4
Molinito Obra de Toma	b1	d13	a1	c4	b3	d1	e8	c2	c2	d1	c1	c6

Tabla 5 (continuación). Parámetros de agua superficial fuera del límite para la protección de la vida acuática según sitio de muestreo

Año/Mes	2016											
Sitio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Arroyo Jaralito	c1	a1	b1	d1	c2							
Bacanuchi - El Molino	b1	a1	a1	b2	b3	b1	c2	e7	c2	b1	c2	b1
Bacanuchi - La Trampa	b2	a1	b6	c1	c2	b1	d11	f5	d11	b1	g5	
Tahuichopa	b2	c2	b2	d1	b1	b1	c2	h6	g2	c2	a1	b1
Arizpe	a1	b1	b1	b1				h6	g2	b1		
Bamori	c3	b1	c1	c1	b1		d11	h6	f7	b1		b1
Sinoquipe	c1	b1	c1	e7				g6	f7	c2	b1	b1
Tajo Banamichi	c1	a1	b1	b1	b1	d6	d11	d2	c2	b1	b1	b1
Banamichi								f7	f7			
Las Delicias								g6	h3			
Huepac	b2	a1	d3	c5	b1	b1	d11	h3	f7			
Ranchito de Huepac	c1	c1	d3	c2			d11	h3	g3	b1		
San Felipe	c1	c1	a1				d11	h3	f7			
Aconchi	b1	a1	b1	b1	b6	c4	c2	g3	f7	b1	d9	a1
La Estancia	c3	a1	d3	b1	b1		e9	j2	g3	b1	b1	a1
San Jose de Baviacora	a1	b2	b1				g5	i4	g3	b1		
Baviacora	b1	b1	b1	b1	a1	b1	e9	h3	h3	b1	b1	b1
La Capilla Rio	b2	a1	c2	b1	b1	d6	e9	i4	f7	b1	b1	b1
El Molinote	c1	a1	b1	b1	b1	c2	e9	h3	i4	b1	b1	b1
La Labor	c1	c1	d6	c1	b1	d4	f7	i4	f7	b1	b1	b1
La Aurora	c1	c1	b1	d1	b1	d6	i6	h6	g3	b1	c2	b1
Mazocahui	c1	b2	c1	c1	b1	c2	e9	h6	f7	b1	b1	b1
Puerta del Sol	b1	c2					e3	g2	d6	b1	c5	d6
San Pedro de Ures							d6	h1	b1			
Ures								i3				
Santiago de Ures								i3				
Guadalupe de Ures	b1	b1	c5					j1	b1	b1	b1	b1
San Rafael de Ures	b1	b1	b1	c1	h5	c2	b1	i3	b1	b1	b1	b1
El Gavilan	b1	c1	d1	c1	a1	c6	b1	i3	c2	b1	b1	b1
San Jose de Gracia	b1	c1	c1					j1	c2	c2		
Topahue								i3				
Boquilla Orégano	c2	b1	b1	d6	d6	g1	d6	e1	c2	c2	c5	c5
El Oregano	b1	c1	c1	b2				j1	c2	d1	c1	b1
MET-SON-1	c1	d9	c1	c1	b1	c2	c5	f7	c2	b1	b1	c1
MET-SON-2									d6			
Molinito Vaso 1	b1	c2	b1	d6	c5	c2	c2	d1	b1	b1	b1	e9
Molinito Vaso 2	b1	b1	b1	b1	c5	c2	c2	c1	b1	b1	b1	c5
Molinito Obra de Toma	b1	d6	b1	c5	c2	c2	b1	e5	b1	b1	d6	b1

Tabla 5 (continuación). Parámetros de agua superficial fuera del límite para la protección de la vida acuática según sitio de muestreo

Año/Mes	2017											
Sitio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Arroyo Jaralito												
Bacanuchi - El Molino	b1	c11	b1	c2	c2	c2	d6	b1	a1	d6	b3	
Bacanuchi - La Trampa	b1	c11	b1	b3	d6	b1	d6	b1	a1	d6	c2	
Tahuichopa	c1	b1	b1	b1	b1	b1	g6	g4	b1	c2	b1	
Arizpe	c1						g6	e9				
Bamori	b1	c1	b1				h6	g5				
Sinoquipe	c2	b1	c1				g6	g2				
Tajo Banamichi	a1	a1	b1	b1	c2	c1	b1	b1	c2	c2	c2	
Banamichi	e1						i4	f7				
Las Delicias	d6						i4	h6				
Huepac							h6	i3				
Ranchito de Huepac	b1						h6	g6				
San Felipe							h6	f7				
Aconchi	b1	c2	a1	e4	b1		g6	g6	c2	b1	b1	
La Estancia	b1	b1	b1	b1			h6	h6	c2			
San Jose de Baviacora	d6	c2	b1				h6	f7				
Baviacora	b1	b1	b1	b1	b1	d5	h6	f7	d6	b1	b1	
La Capilla Rio	c2	b1	b1	b1	a1	b1	j3	f7	d6	b1	b1	
El Molinote	b1	b1	b1	b1	b1	b1	j3	f7	d6	b1	b1	
La Labor	b1	b1	b1	c1	b1	b1	j3	f7	d6	b1	b1	
La Aurora	c5	b1	b1	b1	b1	b1	j3	g5	d6	b1	d6	
Mazocahui	f9	b1	b1	c1	b1	b1	j3	g5	d6	c5	b1	
Puerta del Sol	e9	e9					i4	f7	d6			
San Pedro de Ures	e9						j3	f7				
Ures	e9						i4	f7				
Santiago de Ures							g5	f7				
Guadalupe de Ures	b1	e9	b1	b1	b3	i4	i4	h6	b1	d6	d6	
San Rafael de Ures	b1	c2	b1	b1	c2	c2	i4	g5	c2	d6	b1	
El Gavilan	b1	b1	b1	b1	c2	b1	i4	i3	b1	e4	b1	
San Jose de Gracia	c1	b1	c2				i4	g5	b1		b1	
Topahue							j3	f7				
Boquilla Orégano	d6	c5	c2	d6	e1	d6	d6	e6	d6	d6	d6	
El Oregano	c1	c9	b2	a1			i4	g3	b1	b1		
MET-SON-1	c1	b1	b1	b1	b1	c2	f7	h6	b1	b1	b1	
MET-SON-2							d6					
Molinito Vaso 1	d6	c5	b1	d6	d6	d6	d6	f10	c2	d6	d6	
Molinito Vaso 2	c5	c5	c5	d6	d6	d6	d6	e6	b1	c5	d6	
Molinito Obra de Toma	c5	c5	c2	d6	e4	e1	d6	e6	b1	c5	d6	

Tabla 5 (continuación). Parámetros de agua superficial fuera del límite para la protección de la vida acuática según sitio de muestreo

Año/Mes	2018											
Sitio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Arroyo Jaralito			b1	e9				e9	b1	b1	b1	a1
Bacanuchi - El Molino	c2	b3	d1	d11	b3	c2	b1	c2	c2	d6	b1	b1
Bacanuchi - La Trampa	c2	b3	c2	c2	c9	d9	g5	d6	d6	d6	b1	b1
Tahuichopa	c2	b1	c2	b1	c2	c2	d6	e1	e1	a1	b1	b1
Arizpe							d6	h6	f7	b1	a1	
Bamori							e9	j3	f7	e4	b1	b1
Sinoquipe							f7	i5	f7	c5	b1	b1
Tajo Banamichi	c2	c2	c2	b1	c2	b1	c2	b1	d6	b1	a1	c2
Banamichi							f7	g6	f7	d6		
Las Delicias								h1	g5			
Huepac								h3	g5	f7		
Ranchito de Huepac								j1	f7	f7		
San Felipe							h6	i1	f7	f7		
Aconchi	b1	c2	b1				i8	j1	d6	f7	b1	c9
La Estancia								j1	e1	f7	c2	c2
San Jose de Baviacora							g5	h6	f7	f7	d6	
Baviacora	b1	b1	b1	c2	b1	b1	f7	h5	b1	f7	b1	c2
La Capilla Rio	b1	b1	b1	b1	b1	d6	e2	h3	b1	e2	c5	c2
El Molinote	b1	b1	b1	b1	b1	b1	g2	g5	g5	e2	c6	b1
La Labor	b1	c2	c2	b1	b1	d6	f7	i4	g5	e2	e6	b1
La Aurora	b1	c2	c2	c5	c2		g5	i4	g5	e2	b1	c2
Mazocahui	b1	b1	b1	c2	b1		h6	j3	g5	e2	c6	c2
Puerta del Sol	c5	b1					d6	j1	e1	d6	c2	c2
San Pedro de Ures								j3	f1	d6		
Ures								i4	f7	d6		
Santiago de Ures								i4	f7	d6		
Guadalupe de Ures	b1	c2	c4	c5				j3	f7	b1	c6	c2
San Rafael de Ures	b1	b1	b1	b1	b1	c2	d6	j3	e2	c3	b1	c2
El Gavilan	b1	b1	b1	b1	b1	c2	d6	j3	f5	e2	c2	d10
San Jose de Gracia	b1	b1	b1					j3	g5	e2	c2	c2
Topahue								k1	f7	e2		
Boquilla Orégano	d6	d6	d6	d6	d6	e1	e1	d6	d6	d7	c5	e10
El Oregano	b1	b1	b1	b1				j3	g5	e2	c2	b1
MET-SON-1	c2	b1	c2	b1	c2	c2	d6	i3	f7	b1	a1	b1
MET-SON-2								d6	b1	a1	a1	
Molinito Vaso 1	d6	d6	d6	d6	d6	d6	f2	e1	d6	c5	d6	e1
Molinito Vaso 2	d6	d6	d6	d6	d6	d6	d6	e1	d6	d6	d6	e1
Molinito Obra de Toma	d6	d6	d6	d6	d6	d6	d6	e4	d6	b1	d6	c5

Tabla 5 (continuación). Parámetros de agua superficial fuera del límite para la protección de la vida acuática según sitio de muestreo

Año/Mes	2019							
Sitio	1	2	3	4	5	6	7	8
Arroyo Jaralito	c1	b1	c1	b1				b1
Bacanuchi - El Molino	c2	b1	c2	b1	b1	c2	b1	b1
Bacanuchi - La Trampa	d11	b1	c2	c2	b1	d1	c2	b1
Tahuichopa	b1	b1	c2	b1	c2	e9	b1	d6
Arizpe	c1	b1	a1	b1			d6	e9
Bamori	c1	b1	c2	c1	b1		f7	f6
Sinoquipe	c1	c1	c2	b1	b1		j3	e1
Tajo Banamichi	c2	a1	b1	c2	c2	c2	b1	a1
Banamichi		b1	b1				d6	e1
Las Delicias							c2	e1
Huepac								j3
Ranchito de Huepac								j3
San Felipe								j3
Aconchi	c2	c4	b1	d6	b1		i4	j3
La Estancia	c1						i8	j3
San Jose de Baviacora								g2
Baviacora	b1	b1	b1	c2	b1	b1	c5	e9
La Capilla Rio	b1	b1	c2	b1	b1	b1	d6	d6
El Molinote	b1	b1	b1	b1	b1	c2	f7	h6
La Labor	b1	d6	f7	b1	b1	b1	d6	h6
La Aurora	c2	c2	f7	b1	c2	c2	d6	h6
Mazocahui	c5	c1	f7	c2	b1	b1	d6	j3
Puerta del Sol	b1	c1	f7				d6	h6
San Pedro de Ures			h6				d6	j3
Ures			h6				d6	j3
Santiago de Ures			h6					j3
Guadalupe de Ures	c2	c2	h6				f7	j3
San Rafael de Ures	c2	b1	e2	b1	d11	c2	f7	h6
El Gavilan	b1	b1	e2	b1	b1	c2	f7	h6
San Jose de Gracia	c2	c1	e2	b1			f7	h6
Topahue			e2	h6				
Boquilla Orégano	c1	c2	c2	d6	d5	e1	e1	d6
El Oregano	b1	c1	e2	c2	b1		f7	h6
MET-SON-1	c2	c1	c2	b1	c2	c2	d6	d6
MET-SON-2								
Molinito Vaso 1	e1	c1	e1	d6	d6	e1	e1	d5
Molinito Vaso 2	e1	d1	d6	d6	e1	e1	e1	e1
Molinito Obra de Toma	e1	e1	d6	d6	e1	d6	d6	d1



Tabla 5 (continuación). Parámetros de agua superficial fuera del límite para la protección de la vida acuática según sitio de muestreo

1 y 2 elementos		3 y 4 elementos		5 y 6 elementos		7 y 8 elementos		9, 10 y 11 elementos	
ID	Elementos	ID	Elementos	ID	Elementos	ID	Elementos	ID	Elementos
a1	Ba	c1	Al Ba pH	e1	Al Ba Fe Zn pH	g1	Al Ba Cr Fe Hg Zn pH	i1	Al Ba Cu Cr Fe Hg Pb Zn pH
b1	Al Ba	c2	Al Ba Zn	e2	Al Ba Fe Pb Zn	g2	Al Ba Cu Fe Pb Zn pH	i2	Al Ba Cu Cr Fe Hg Ni Pb Zn
b2	Ba pH	c3	Al Ba Pb	e3	Al Ba Fe Ni Zn	g3	Al Ba Cu Fe Hg Pb Zn	i3	Al Ba Cd Cu Cr Fe Pb Zn pH
b3	Ba Zn	c4	Al Ba Hg	e4	Al Ba Fe Hg Zn	g4	Al Ba Cu Cr Fe Zn pH	i4	Al Ba Cd Cu Cr Fe Hg Pb Zn
b4	Ba Pb	c5	Al Ba Fe	e5	Al Ba Cr Zn pH	g5	Al Ba Cu Cr Fe Pb Zn	i5	Al As Ba Cu Cr Fe Hg Pb Zn
b5	Ba Hg	c6	Al Ba Cr	e6	Al Ba Cr Fe Zn	g6	Al Ba Cd Cu Fe Pb Zn	i6	Al As Ba Cd Cr Fe Hg Pb Zn
	Ba Cr	c7	Ba Zn pH	e7	Al Ba Cu Zn pH	g7	Al Ba Cd Cu Fe Hg Zn	i7	Al As Ba Cd Cu Fe Hg Pb Zn
		c8	Ba Hg pH	e8	Al Ba Cu Pb Zn	g8	Al As Ba Cd Cu Fe Zn	i8	Al As Ba Cd Cu Cr Fe Pb Zn
		c9	Ba Cr Zn	e9	Al Ba Cu Fe Zn	h1	Al Ba Cu Cr Fe Pb Zn pH	j1	Al Ba Cd Cu Cr Fe Hg Pb Zn pH
		c10	Ba Cd Zn	e10	Al Ba Cd Hg pH	h2	Al Ba Cu Cr Fe Hg Zn pH	j2	Al Ba Cd Cu Cr Fe Hg Ni Pb Zn
		c11	Sb Ba Zn	e11	Al Ba Cd Cu Zn	h3	Al Ba Cu Cr Fe Hg Pb Zn	j3	Al As Ba Cd Cu Cr Fe Hg Pb Zn
		d1	Al Ba Zn pH	f1	Al Ba Fe Pb Zn pH	h4	Al Ba Cd Cu Fe Pb Zn pH	k1	Al As Ba Cd Cu Cr Fe Hg Ni Pb Zn
		d2	Al Ba Pb Zn	f2	Al Ba Fe Hg Zn pH	h5	Al Ba Cd Cu Fe Hg Pb Zn		No Muestreado
		d3	Al Ba Hg pH	f3	Al Ba Fe Hg Pb Zn	h6	Al Ba Cd Cu Cr Fe Pb Zn	NE	No Especificado
		d4	Al Ba Hg Zn	f4	Al Ba Cr Fe Zn pH				Dentro del límite
		d5	Al Ba Fe pH	f5	Al Ba Cr Fe Pb Zn				
		d6	Al Ba Fe Zn	f6	Al Ba Cu Fe Zn pH				
		d7	Al Ba Fe Hg	f7	Al Ba Cu Fe Pb Zn				
		d8	Al Ba Cr pH	f8	Al Ba Cu Fe Hg Zn				
		d9	Al Ba Cr Zn	f9	Al Ba Cu Cr Fe Zn				
		d10	Al Ba Cr Fe	f10	Al Ba Cd Cr Fe Zn				
		d11	Al Ba Cu Zn						
		d12	Al Ba Cu pH						
		d13	Al Ba Cd Zn						

de ciertos parámetros fuera del límite permitido en una parte significativa de los sitios. Esto sucede en el caso específico del agua superficial, principalmente entre los meses de julio y septiembre, que es cuando mayor sedimentación arrastra el río debido al aumento de precipitaciones.

Sin duda, más conclusiones podrían derivar a partir de los datos, siendo difícil agotarlas en este primer análisis. Sin embargo, consideramos de particular importancia la presentación y este primer resumen de los datos del monitoreo FRS, para que de este deriven estudios posteriores que clarifiquen cada vez más las dimensiones del impacto del derrame tóxico en el río Sonora.

## BIBLIOGRAFÍA

- SEMARNAT. Derrame de sulfato de cobre en el Río Bacanuchi (afluente del Río Sonora) [Internet]. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2014 [citado 29 de mayo de 2023]. Disponible en: [www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/338899/21DPPresentacion\\_conferencia\\_derrame.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/338899/21DPPresentacion_conferencia_derrame.pdf).
- Enciso A. Semarnat: desastre ambiental en Sonora, el peor de la minería en el país. La Jornada [Internet]. 26 de agosto de 2014.
- SEGOB. Balance de las acciones del Gobierno de la República en el Río Sonora. Secretaría de Gobernación; 2015.
- CONAGUA. Programa Detallado de Acciones de Gestión Integral para la Restauración Ecológica del Río Sonora. Comisión Nacional del Agua; 2013.
- Orozco R, Muhech V. Anteproyecto del nuevo depósito para jales "Buenavista del Cobre" en Cananea, Sonora. En Cancún, Quintana Roo: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.; 2012. p. 6.
- Gobierno de la República. Remediación Ambiental Río Sonora. Enero. [Internet]. 2015 [citado 30 de enero de 2020]. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/338777/06rio\\_sonora\\_28\\_enero.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/338777/06rio_sonora_28_enero.pdf).
- INEGI. Censo general de población y vivienda 2020 [Internet]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía; 2021 [citado 8 de enero de 2021]. Disponible en: [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx).
- Chávez-Toledo C, Macías-Duarte A, Guitierrez Ruacho OG, Mercado-Ramírez MG, Bustamante-Icedo AK, Duarte-Tagles H. Análisis estacional de factores ambientales y su influencia sobre la ictiofauna del río Bacanuchi. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2013;29(1).
- DOF. NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. *Diario Oficial de la federación*; 2010.
- SEMARNAT. Fideicomiso Río Sonora [Internet]. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales; 2020 [citado 8 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/fideicomiso-rio-sonora>.
- Díaz-Caravantes RE, Durazo-Gálvez FM, Vázquez JLM, Tagles HD, Pablos NP. Las plantas potabilizadoras en el río Sonora: una revisión de la recuperación del desastre. *Región Soc*. 7 de abril de 2021;33:e1416-e1416.
- Díaz Caravantes RE, Duarte Tagles H, Pallanez Murrieta M, Moreno Vázquez JL, Mejía Santellanes JA, Durazo Gálvez FM. Análisis de los criterios para proteger la vida acuática: El río Sonora después del derrame minero de 2014. *Aqua-LAC*. 2018;10(1):75-87.
- Infomex. Solicitud de información a CONAGUA por medio de la plataforma INFOMEX con número de folio 1610100193816. *Plataforma Nacional de Transparencia Gobierno Federal*; 2016.
- DOF. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*. 22 de noviembre de 2000.
- WHO. Guidelines for Drinking-water Quality. 4.a ed. Switzerland: World Health Organisation; 2011.
- DOF. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89. *Diario Oficial de la Federación* [Internet]. 1989; Disponible en: [www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989).
- CONAGUA. Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2020 [Internet]. Comisión Nacional del Agua; 2020 [citado 10 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/ley-federal-de-derechos-2020>.
- Henn BC, Ettinger AS, Schwartz J, Téllez-Rojo MM, Lamadrid-Figueroa H, Hernández-Avila M, et al. Early Postnatal Blood Manganese Levels and Children's Neurodevelopment. *Epidemiol Camb Mass*. 2010;21(4):433-9.
- CONAGUA. Red nacional de monitoreo de la calidad del agua [Internet]. Comisión Nacional del Agua; 2022 [citado 5 de diciembre de 2022]. Disponible en: <http://sina.conagua.gob.mx>.