



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Seguimiento a la
Concentración de Metales en
los Suelos del Río Sonora**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero de Minas y Metalurgista

P R E S E N T A

Rodrigo Gómez Moreno

ASESOR DE INFORME

Dr. José Enrique Santos Jallath



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL**
(Titulación con trabajo escrito)



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado SEGUIMIENTO A LA CONCENTRACION DE METALES EN LOS SUELOS DEL RIO SONORA que presenté para obtener el título de INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

RODRIGO GOMEZ MORENO
Número de cuenta: 316160779

Dedicatoria

A la mujer de la que me enamoré en la primera cita: mi mamá

Gracias por acompañarme en mis sueños, por apoyarme y por no dejarme caer cuando quería tirar la toalla. Gracias por tu calidez, tu amor incondicional, la paciencia con la que me escuchas y la convicción con la que siempre luchas. Este trabajo es solo el comienzo de muchos éxitos y, sin duda, no podría afrontarlos sin haber aprendido de tu fortaleza. Te amo.

Al hombre más valiente que conozco: mi papá

Nunca te lo había dicho, pero eres mi héroe. Si pudiera describirte con una sola palabra, sería resiliencia, porque sabes sobreponerte a la adversidad, incluso en los momentos más difíciles. Desde que tengo memoria, no recuerdo haberte visto quejarte cuando tu familia más te necesitaba y, en silencio, lo has dado todo. No estoy seguro de si algún día me convertiré en padre, pero, si lo hago, tengo el mejor ejemplo al cual seguir. Te amo.

A mi hermano, Lalo

Gracias por las risas y por tu espontaneidad. Sin planearlo, terminamos titulándonos al mismo tiempo. Me da mucho orgullo y felicidad verte triunfar haciendo aquello para lo que siempre supimos que tenías talento. Te quiero.

A mis mejores amigos, Rosa y Emilio

Desde que los conozco, sé lo que significa tener hermanos de otras madres. Gracias por tantos años de amistad, por estar presentes en los momentos difíciles y en los felices, y por apoyarme siempre. Ya forman parte de lo que yo considero mi familia. Los quiero mucho.

A mi pareja, Sharon

Gracias por impulsarme a ser siempre mejor, por confiar en mí, por darme la certeza de tu amor y por brindarme tanta paz y felicidad. Somos un gran equipo y nos esperan cosas mavarillosas en lo individual y lo colectivo. Alguna vez te lo dije: contigo puedo ser yo mismo sin temor a nada. Te amo, pollito.

A mi psicóloga, Pao

Seguramente me dirías que este camino lo he construido yo mismo, y aunque entiendo tu profesionalismo, no puedo permitir que me des todo el crédito por este logro. Este trabajo no solo representa la culminación de un camino muy escabroso; también simboliza tantas cosas por las cuales tengo que agradecerte que no me alcanzaría el espacio para mencionarlas.

Gracias por confiar en mí, por tu humanidad y por guiarme a lo largo de estos años. El hombre que soy hoy, tiene una manota de jaguar de tu parte. Te quiero mucho.

A mi abuelito Jero

Es cierto que no tuve el placer de conocerte, pero estoy seguro de que nos la hubiéramos pasado bomba. No sé a qué se refiere la gente cuando dice que nos parecemos, quizá antes de irte, tenías que dejar una representación fidedigna tuya en este mundo. Te honro y te amo, porque sin ti, no soy.

A la mujer que incluso en sus últimos suspiros, preguntó por sus nietos: mi abuelita Raquel

Mi viejita, el único recuerdo que tengo tuyo, es regañándome y para acabarla de amolar, por algo que no

había hecho yo; quizás desde muy pequeño, pudiste ver lo que podía ser.

No sabes cuanto te extraño. Sé que, dondequiera que estés, don Jero y tú me cuidan y me dan su fortaleza cuando más la he necesitado. Te honro y te amo.

Al ser que me acompañó durante toda mi carrera: mi perrito, Mozart

Gracias por enseñarme que la felicidad de la vida se encuentra en las cosas sencillas: salir a dar un paseo, comer o ver que tu ser querido llegó con bien a casa.

Gracias por acompañarme durante tantas noches de desvelo, ya fuera porque tenía que hacer una tarea, terminar un trabajo, estudiar para un examen, concluir un proyecto o enfrentar una noche más de insomnio. Fuiste mi fiel compañero por nueve años, pero yo fui el tuyo toda tu vida.

Gracias por tu inmenso y más puro amor. No hay un solo día en el que no te extrañe, pero sé que, allá donde estás, me cuidas y me acompañas a donde voy. Te amo, mi perrito.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por brindarme una formación profesional sólida y por enseñarme que la ingeniería no solo exige conocimientos técnicos, sino también responsabilidad, criterio y compromiso con la sociedad. Me llevo de sus aulas las herramientas que hicieron posible este trabajo y una manera de comprender los problemas que acompañará mi ejercicio profesional.}

Al Dr. José Enrique Santos Jallath, mi asesor, por su orientación, disposición y acompañamiento durante la elaboración de este informe. Le agradezco el tiempo dedicado a su revisión, sus observaciones y los conocimientos compartidos, que fueron fundamentales para dar estructura, claridad y sentido a este trabajo.

Al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, por darme la oportunidad de aplicar mi formación profesional en el estudio de un problema ambiental de gran relevancia. Mi experiencia en el Instituto me permitió comprender el valor del trabajo científico y técnico en la generación de información útil para la protección del ambiente y la toma de decisiones.

A quienes participaron en la planeación y realización de la campaña de muestreo en la cuenca del río Sonora, así como en la recepción, preparación y análisis de las muestras. Agradezco al personal de campo y de los laboratorios del INECC por compartir conmigo su experiencia, por su disposición para resolver mis dudas y por enseñarme la importancia de la precisión, la trazabilidad y el trabajo en equipo durante cada etapa del proceso.

También agradezco a todas las personas que, desde distintas responsabilidades, contribuyeron a la generación, organización e interpretación de la información utilizada en este trabajo. Cada recorrido de campo, registro, muestra, análisis y observación hizo posible construir una visión más completa de las condiciones de los suelos estudiados.

Finalmente, agradezco a quienes formaron parte de mi trayectoria universitaria y profesional: profesores, compañeros y colegas con quienes compartí conocimientos, desafíos y aprendizajes. De cada uno conservo alguna enseñanza que me ayudó a llegar hasta este momento.

Este trabajo representa el cierre de una etapa importante de mi vida, pero también el comienzo de una nueva responsabilidad: ejercer mi profesión con ética, sensibilidad ambiental y conciencia sobre el impacto que la ingeniería puede tener en las comunidades y en su entorno.

Resumen

El presente trabajo, tiene como objetivo analizar y dar seguimiento a las concentraciones de diversos metales presentes en muestras de suelo recolectadas en diferentes localidades de la región del Río Sonora, con la finalidad de evaluar su comportamiento y comparar los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad aplicable.

La investigación se desarrolla a partir de información generada durante actividades de análisis ambiental realizadas en el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), considerando datos obtenidos mediante procedimientos analíticos para la determinación de metales en matrices de suelo. El estudio contempla la revisión y organización de resultados históricos, así como su interpretación técnica en función de criterios nacionales e internacionales relacionados con contaminación de suelos.

Como parte del desarrollo del trabajo, se realizó una comparación de las concentraciones detectadas con los valores establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y con referencias internacionales utilizadas como criterio complementario para la evaluación ambiental. Asimismo, se abordó el contexto ambiental asociado al derrame ocurrido en la cuenca del Río Sonora y la importancia del monitoreo de metales potencialmente tóxicos en suelos de la región.

El trabajo busca aportar un análisis técnico sobre el comportamiento y persistencia de metales en suelos, así como destacar la importancia del seguimiento ambiental y de la generación de información analítica para la evaluación de posibles afectaciones ambientales. De igual manera, se pretende fortalecer la aplicación de los conocimientos adquiridos durante la formación profesional en el área de minería, metalurgia y medio ambiente.

Índice

1.	Introducción	10
1.1.	Antecedente	10
1.2.	¿Qué es el INECC?	11
1.3.	Justificación	12
1.4.	Objetivo	16
2.	Sitios de estudio	17
2.1.	San José de Gracia	18
2.2.	Baviácora	18
2.3.	Aconchi	19
2.4.	Bacacochi (Tahuichopa)	20
2.5.	Banámichi	22
2.6.	Arizpe.....	23
2.7.	Huepac.....	25
3.	Plan de muestreo	27
3.1.	Objetivo	27
3.2.	Localización de los sitios de muestreo	27
3.3.	Preservación, conservación y manejo de las muestras	30
3.4.	Control de calidad	31
4.	Análisis de muestras.....	34
4.1.	Equipos para el análisis.....	34
4.2.	Preparación de muestras y digestión.....	37
4.3.	Filtrado	40
4.4.	Análisis de las muestras	41
5.	Resultados y discusión	42
5.1.	Resultados obtenidos	42
5.2.	Discusión e interpretación	44
6.	Propuesta de monitoreo ambiental preventivo	47
6.1.	Atenuación natural	48
6.2.	Aplicación propuesta para el caso del río Sonora	48
6.3.	Caracterización del sitio.....	49
6.3.1.	Condiciones fisicoquímicas del suelo	49
6.3.2.	Caracterización biológica del suelo	50
6.3.3.	Propuesta operativa para la caracterización.....	50
6.3.4.	Contexto hidrogeológico.....	50
6.3.5.	Vegetación y uso del suelo	51
6.4.	Diseño de un plan de monitoreo	54
6.4.1.	Objetivos del monitoreo	54
6.4.2.	Parámetros a monitorear	54

6.4.3.	Sitios y frecuencia de muestreo	55
6.4.4.	Indicadores de éxito de la atenuación natural	56
6.5.	Protección y fortalecimiento de la vegetación existente	57
6.6.	Estrategias de conservación y fortalecimiento	57
6.7.	Educación ambiental comunitaria	58
6.7.1.	Objetivos de la educación ambiental	59
6.7.2.	Público objetivo	59
7.	Conclusiones	61
8.	Referencias	63
Anexo 1: Definiciones para el trabajo de campo y laboratorio		66
Anexo 2: Medición de metales en suelos, lodos y sedimentos mediante espectrometría de masas acoplado inductivamente (ICP-MS)		75
Anexo 3: Medición de metales en suelos, lodos y sedimentos por Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)		84
Anexo 4: Fichas técnicas de las especies seleccionadas para la remoción de metales		88
Anexo fotográfico.....		92

Índice de imágenes

Imagen 1 : Logo del INECC.....	12
Imagen 2 : Referencias de los sitios de muestreo con respecto a la mina Buenavista del cobre.	17
Imagen 3 : Vista satelital de San José de Gracia.....	18
Imagen 4 : Vista satelital de Baviácora.	19
Imagen 5 : Vista satelital de Ancochi.....	20
Imagen 6 : Vista satelital de Tahuichopa.	21
Imagen 7 : Vista satelital de Banámichi.....	22
Imagen 8 : Vista satelital de Arizpe.	24
Imagen 9 : Vista satelital de Huepac.	25
Imagen 10 : Vista satelital de los puntos de muestreo S01 y S02.	27
Imagen 11 : Vista satelital de los puntos de muestreo S03, S04, S05 y S06.	28
Imagen 12 : Vista satelital del punto de muestreo S07.	29
Imagen 13 : Ejemplo de etiqueta para muestra. Fuente: F-PT-07, Muestreo de suelos, INECC (2021a).	31
Imagen 14 : Ejemplo de sello para muestra. Fuente: F-PT-07, Muestreo de suelos, INECC (2021a).	31
Imagen 15 : Ejemplo de hojas de campo utilizadas en el muestreo. F-PT-10, Cadena de custodia, INECC (2021b).	32
Imagen 16 : Ejemplo de hoja de custodia. Fuente: F-PT-10, Cadena de custodia, INECC (2021b).	32
Imagen 17 : Ejemplo del reverso de la hoja de cadena de custodia Fuente: F-PT-10, Cadena de custodia, INECC (2021b).	33
Imagen 18 : Diagrama de flujo del proceso de análisis.	34
Imagen 19 : Balanza analítica ADAM.	35

<i>Imagen 20 : Horno MARS 6.</i>	<i>35</i>
<i>Imagen 21 : Sistema de purificación Milli Q.</i>	<i>36</i>
<i>Imagen 22 : Equipo ICP-MS.</i>	<i>36</i>
<i>Imagen 23 : Equipo ICP-OES.</i>	<i>37</i>
<i>Imagen 24 : Ejemplo de pesado de muestra.</i>	<i>38</i>
<i>Imagen 25 : Tubos liners del horno MARS 6.</i>	<i>38</i>
<i>Imagen 26 : Vista por dentro del horno MARS 6 y su rotor.</i>	<i>39</i>
<i>Imagen 27 : Recomendación de distribuciones de acuerdo con el número de muestras.</i>	<i>39</i>
<i>Imagen 28 : Caja con papel filtro marca Cytiva Whatman.</i>	<i>40</i>
<i>Imagen 29 : Ejemplo de filtrado de las muestras previamente digeridas.</i>	<i>40</i>
<i>Imagen 30 : Ejemplo de análisis de muestras por el equipo ICP-MS.</i>	<i>41</i>
<i>Imagen 31 : Vista de los sitios donde se realizó la toma de muestras.</i>	<i>42</i>
<i>Imagen 32 : Prosopis glandulosa (mezquite).</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 33 : Baccharis sarothroides (mariola).</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 34 : Salix spp. (sauces).</i>	<i>53</i>
<i>Imagen 35 : Opuntia spp. (nopal).</i>	<i>53</i>
<i>Imagen 36 : Primer hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).</i>	<i>92</i>
<i>Imagen 37 : Segunda hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).</i>	<i>93</i>
<i>Imagen 38 : Tercer hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).</i>	<i>94</i>
<i>Imagen 39 : Cuarta hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).</i>	<i>95</i>
<i>Imagen 40 : Quinta hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).</i>	<i>96</i>
<i>Imagen 41 : Sexta hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).</i>	<i>97</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1 : Zonas propuestas a remediar. Fuente: Dictamen diagnóstico ambiental (SEMARNAT, 2023).</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2 : Identificación y georreferencia de los sitios a muestrear Fuente: Dictamen diagnóstico ambiental (SEMARNAT, 2023).</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3 : Parámetros por analizar y número de muestras por sitio. Fuente: Plan de muestreo: 002-22 (p. 4), por E. Gutiérrez Feria, 2022, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4 : Resultados de los análisis. Fuente: Dictamen diagnóstico ambiental (SEMARNAT, 2023).</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 5 : Valores mínimos, máximos y promedio de cada elemento.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 6 : Comparación de los resultados con las concentraciones establecidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.</i>	<i>44</i>

<i>Tabla 7 : Comparación de las concentraciones normativas de metales y metaloides en suelo (SEMARNAT, 2007).</i>	45
<i>Tabla 8 : Comparación de las concentraciones normativas de Canadá con los resultados obtenidos.</i>	45
<i>Tabla 9 : Sitios y frecuencia del muestreo.</i>	56
<i>Tabla 10 : Indicadores de éxito de la propuesta de monitoreo.</i>	56
<i>Tabla 11 : Grupo y herramientas o actividades sugeridas.</i>	60

1. Introducción

1.1. Antecedente

La presencia de metales en los suelos, lodos y sedimentos puede deberse a que estos se encuentren presentes de forma natural, ya sea por la configuración geológica del suelo, la presencia de alguna corriente de agua que los deposita en algún sitio en particular, por la existencia de vetas de algunos minerales o a los residuos que se generan por las actividades del hombre, como ganadería, agricultura, transporte procesos industriales y la minería.

De acuerdo con los reportes, el 6 de agosto de 2014, en la mina Buenavista del Cobre en Sonora, durante la fase de arranque del sistema de lixiviación Tinajas; ocurrió una emergencia ambiental. Alrededor de las 10:00 h, se detectó un goteo en la solución almacenada en el sobre-derrame del represo Poniente, el cual forma parte del sistema de represas Tinaja 1 (SEMARNAT, 2023). De acuerdo con el dictamen diagnóstico ambiental publicado por la SEMARNAT (SEMARNAT, 2023), este incidente fue provocado por un aumento en el nivel del agua debido al exceso de precipitaciones y escorrentías de zonas más elevadas. La presión hidrostática incrementada causó erosión alrededor de un tubo cerrado ubicado en la cortina del represo, cuya función es liberar los excedentes hacia el represo Tinajas 1.

La solución vertida desde el represo Poniente se desplazó hacia el represo Tinajas 1, donde fue contenida hasta que el nivel alcanzó el tubo situado en la cortina, el cual tiene la función de conducir la solución hacia un manifold ubicado aguas abajo de la cortina. Desde este punto, la solución suele ser bombeada hacia otro represo para reincorporarse al sistema de lixiviación. Durante el incidente, el sistema de bombeo estaba en reparación, lo que ocasionó el derrame, ya que el conducto final del sistema hidráulico permanecía abierto y sin válvula de control, permitiendo que la solución se vertiera en el cauce del arroyo La Tinaja (SEMARNAT, 2023).

Como resultado de este evento, se estimó que el volumen derramado fue de 40,000 m³. Esta solución, generada por el proceso de lixiviación, fue clasificada como una solución acidulada de sulfato de cobre. Según el análisis químico realizado en una muestra recolectada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en un laboratorio acreditado, se identificaron cuatro contaminantes normados presentes en la solución: As, Cd, Ni y Pb (CONAGUA 2021); además, seis contaminantes no normados presentes: Al, Cu, Cr, Fe, Mn y Zn. Asimismo, se detectó la ausencia de nueve contaminantes normados: Ba, Be, Cr (VI), Hg, Ag, Se, Tl y V, y un contaminante no normado ausente: Sb.

La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) impuso a la empresa Buenavista del Cobre una multa de \$22.9 millones de pesos y ordenó implementar un plan de remediación (SEMARNAT, 2023). Además, se dispuso la creación de un fideicomiso para llevar a cabo medidas de remediación, reparación y compensación por los daños ocasionados al medio ambiente y a la salud humana a raíz del derrame, conforme al Programa de Remediación. Este fideicomiso también debía gestionar el pago de reclamaciones por daños materiales sufridos por las personas afectadas por el derrame.

El derrame no solo resaltó las deficiencias en la gestión y monitoreo del sistema de lixiviación por parte de la empresa minera, sino que también puso en evidencia la vulnerabilidad de los ecosistemas y las comunidades frente a este tipo de eventos.

En este contexto, el análisis de suelos potencialmente contaminados se convierte en una herramienta esencial para la evaluación de su impacto, pues la identificación y cuantificación precisa de metales potencialmente tóxicos en el suelo son fundamentales no solo para comprender el alcance de la contaminación, sino también para diseñar e implementar estrategias de remediación efectivas. Estos análisis permiten establecer la magnitud de la afectación al ambiente y el nivel de riesgo al que están expuestas las comunidades, siendo cruciales para la toma de decisiones informadas en la gestión de desastres ambientales.

Mi trabajo, enfocado en el análisis de muestras de suelo contaminadas con metales, se inscribe en esta misión de protección ambiental y de salud pública. A través de metodologías analíticas avanzadas, busco determinar la presencia y concentración de metales pesados como el arsénico, plomo y cadmio, entre otros, en suelos afectados por actividades industriales y mineras.

El derrame del Río Sonora sirve como un recordatorio constante de la importancia de mantener una vigilancia activa sobre la calidad del suelo, el agua y el aire en zonas impactadas por actividades industriales. La capacidad de identificar y controlar la contaminación es crucial para evitar que estos desastres se repitan y para proteger a las generaciones futuras de los efectos perjudiciales de la exposición a metales pesados.

1.2. ¿Qué es el INECC?

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (Imagen 1), es un organismo público descentralizado, que está sectorizado en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Su labor principal se centra en la investigación, estudio y monitoreo del medio ambiente, promoviendo políticas públicas enfocadas en la ecología y el cambio climático.

Además, se ocupa de temas como el desarrollo de ciudades sostenibles con bajas emisiones de carbono, la evaluación del impacto ambiental y climático en ecosistemas y cuencas, la modelación de escenarios futuros sobre el cambio climático, y el fortalecimiento de capacidades técnicas y científicas. También realiza evaluaciones sobre políticas nacionales de cambio climático, reportes internacionales y sirve como enlace con organizaciones globales de conocimiento.



Imagen 1: Logo del INECC.

1.3. Justificación

Los municipios y comunidades ubicados río abajo de la mina Buenavista del Cobre fueron afectados por el derrame de la solución ácida del proceso de lixiviación, lo que generó una legítima preocupación entre sus habitantes por la posible contaminación en el agua, aire, suelo y biota local. La liberación de esta solución al río Sonora, creó una necesidad urgente de obtener evidencia científica que respalde estas inquietudes sociales. Esto permitiría abordar las demandas de la población por los daños causados, tanto a su economía local como a la salud humana y ambiental de la región.

En respuesta a este evento, la empresa implementó diversas acciones de atención y remediación a través del Fideicomiso Río Sonora, constituido con una aportación inicial de dos mil millones de pesos. Este instrumento financiero tuvo como objetivo atender los impactos ambientales, sociales y económicos derivados de la contingencia (Gobierno de la República, 2015).

Entre las primeras medidas adoptadas se encontró el suministro emergente de agua potable a las comunidades afectadas mediante la distribución de agua en pipas y la construcción de infraestructura para el abastecimiento de agua. Como parte de estas acciones se instalaron plantas potabilizadoras en diversas localidades de la cuenca del río Sonora, incluyendo Bacanuchi, Banámichi, Aconchi y Ures, con el propósito de garantizar el acceso al agua para consumo humano mientras se evaluaba la calidad de las fuentes de abastecimiento locales (Gobierno de la República, 2015; Díaz-Caravantes et al., 2021).

De manera paralela, se desarrollaron programas de monitoreo de la calidad del agua superficial y subterránea mediante campañas periódicas de muestreo y análisis fisicoquímicos. Estos trabajos permitieron dar seguimiento a la evolución temporal de las concentraciones de metales y otros parámetros de interés ambiental en la cuenca, generando información utilizada para la toma de decisiones y la evaluación de los riesgos asociados al derrame (Gobierno de la República, 2015; Díaz-Caravantes et al., 2024).

Asimismo, se implementaron programas de atención médica para la población potencialmente expuesta y se promovió la construcción de la Clínica de Vigilancia Epidemiológica Ambiental (CVEA) en Ures, Sonora, concebida como una instalación especializada para el seguimiento de posibles efectos a la salud asociados con la exposición a contaminantes derivados del derrame (COFEPRIS, 2016; SEMARNAT, 2023).

El Fideicomiso Río Sonora también contempló la entrega de apoyos económicos e indemnizaciones a productores agrícolas, ganaderos, comerciantes y habitantes de la región que reportaron afectaciones derivadas de la contingencia ambiental. Adicionalmente, se financiaron diversos estudios ambientales, hidrológicos y toxicológicos destinados a evaluar la magnitud del impacto y la efectividad de las medidas implementadas (Gobierno de la República, 2015).

En materia de saneamiento ambiental, el 27 de noviembre del 2014, la empresa presentó un programa de remediación que incluyó diversos componentes: un estudio de caracterización del sitio, análisis históricos, una evaluación del riesgo ambiental y una propuesta de remediación. Además, se incluyó un plan maestro destinado a la zonificación del área afectada el cuál consistía en la excavación, retiro y transporte del suelo contaminado y su confinamiento final (SEMARNAT, 2023).

Así pues, en el mismo año del derrame, Buenavista del Cobre puso a disposición de la SEMARNAT su propuesta de remediación, misma que comprendía una división en 5 zonas, las cuales se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1: Zonas propuestas a remediar. Fuente: Dictamen diagnóstico ambiental (SEMARNAT, 2023).

Zona de estudio	Coordenadas del punto inicial (UTM)	Coordenadas del punto final (UTM)	Descripción general	Justificación
Zona 1	562635 E 3421817 N	566193 E 3398254 N	Tramo comprendido entre el punto del derrame en el represo Tinajas, considerado el kilómetro 30, ubicado en el cauce del río Bacanuchi.	No hay suelo desarrollado en los primeros 17 km, debido a su relieve y topografía. No hay población humana expuesta.
Zona 2	566193 E 3398254 N	574578 E 3318765 N	Tramo comprendido del kilómetro 30 hasta el kilómetro 140, ubicado al Sur de la localidad de Banámichi.	Cubre áreas con población humana expuesta y suelo con actividades agrícolas.
Zona 3	574578 E 3318765 N	581190 E 3284861 N	Tramo comprendido desde el kilómetro 140, hasta el kilómetro 180 localizado al Sur del poblado de Baviácora.	Zona con mayor número de centros de población y de actividad agrícola

Zona 4	581190 E 3284861 N	571807 E 3260917 N	Tramo comprendido desde el kilómetro 180 hasta el kilómetro 224, localidad donde se amplía el cauce del río Sonora tras pasar la sierra de Aconchi y dar lugar al valle de Ures.	Áreas sin desarrollo de suelo, intercaladas con áreas con desarrollo de suelo con centros de población y áreas agrícolas.
Zona 5	571807 E 3260917 N	534188 E 3235487 N	Tramo comprendido desde el kilómetro 224, hasta el kilómetro 288 y que corresponde al punto de descarga del río Sonora en la presa El Molinito.	Valle de Ures que se extiende hasta la desembocadura del Río Sonora en el área de la presa El Molinito. Valle muy amplio con suelos agrícolas y población humana expuesta.

El área que comprendía la remediación era de 28,183 m², donde se llevaría a cabo la remoción de suelos contaminados y su envío a disposición final en un sitio autorizado, esta actividad tuvo una duración aproximada fue de 8 semanas.

El programa de remediación aprobado solo abarcó la Zona 1, que comprende 30 kilómetros del área afectada, y se basa en criterios que la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), adoptó en su momento, considerados como los más permisivos dentro de la normativa vigente. Esto genera una duda razonable sobre la efectividad y funcionalidad real del programa, ya que el área total afectada no fue completamente atendida, y los estándares utilizados podrían no haber sido suficientemente estrictos para garantizar una adecuada remediación del medio ambiente.

Además, se implementaron programas de monitoreo ambiental con una duración mínima de tres años. El objetivo de estos programas fue realizar un monitoreo en cinco zonas, empleando modelos de estimación de riesgo, análisis de toxicidad y evaluación de la exposición en ecosistemas acuáticos y terrestres. El propósito principal era evaluar los posibles efectos del derrame de la solución acidulada de sulfato de cobre (solución ferro-cuprífera ácida) sobre el medio ambiente.

Las actividades del monitoreo consideradas eran (SEMARNAT, 2023):

- Estimación de riesgo ecológico.
- Evaluación de biomarcadores de exposición (p. ej. odonatos).
- Evaluación de los efectos.
- Selección especies vegetales: Especies de flora asociadas a la ribera de los Ríos Bacanuchi y Sonora.
- Recolección de muestras biológicas para las especies.

- Peces, anfibios e invertebrados seleccionados para el monitoreo.

Sin embargo, debido a las numerosas fallas y el incumplimiento de los objetivos establecidos en el programa de remediación, así como a los impactos documentados en el medio ambiente, el agua (Díaz-Caravantes et al., 2021), las actividades económicas y la salud de los habitantes de la región de forma crónica, la comunidad local reclamó la reparación de los daños ocasionados y la restauración de los ecosistemas afectados.

La SEMARNAT cerró administrativamente el Fideicomiso a finales de 2015, considerando que ya había cumplido su objetivo. No obstante, la Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN) emitió una sentencia que ordenó la reapertura del fideicomiso, ya que se argumentó que no cumplió con sus objetivos de indemnización ni remediación. Además, se señala que sólo se ejerció el 61% de los recursos y que la población afectada no fue consultada sobre su uso (Murillo, 2020).

Por esta razón, el Gobierno de México, a través de SEMARNAT, impulsó la elaboración de un Dictamen Diagnóstico Ambiental (SEMARNAT 2023). Este documento utiliza evidencia científica para identificar los impactos ambientales resultantes de la actividad minera en Buenavista del Cobre y el derrame de lixiviados.

En el dictamen participó el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), organismos públicos descentralizados pertenecientes al sector coordinado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (SEMARNAT, 2023). El objetivo del IMTA, fue realizar investigaciones para el manejo, conservación y rehabilitación del agua, por su parte, el INECC realizó un muestreo de suelos, para que, una vez obtenidos los resultados, elaborar la formulación para dicho dictamen diagnóstico ambiental, a través del análisis del impacto ambiental en el suelo, aire, biota y pérdidas económicas ocasionadas por este desastre ambiental.

Particularmente hablando de las conclusiones del análisis en el dictamen con respecto al suelo, se encontró que las concentraciones de metales y metaloides potencialmente tóxicos en la zona no siguen un patrón antropogénico visible, debido a las características naturales del área. No obstante, se identificaron factores de enriquecimiento de ciertos metales que parecen estar relacionados con la liberación geoquímica provocada por un efecto de acidificación. Los suelos al río se clasificaron como moderadamente ácidos, lo que requiere monitoreo constante, ya que una mayor acidificación podría incrementar el riesgo medioambiental al facilitar la movilidad de especies tóxicas, normalmente insolubles.

Además, no se observó un patrón claro de distribución de metales y metaloides en relación con la proximidad al río, ni una homogeneidad en las concentraciones a diferentes profundidades para algunos elementos tóxicos. Por ello, es esencial que las normativas de remediación vigentes consideren tanto la acidez del suelo como su perfil de profundidad, para evaluar los riesgos potenciales a mediano y largo plazo causados por la actividad antropogénica.

Es por ello por lo que, en el dictamen, se sugirió ampliamente seguir realizando un monitoreo del suelo, para ver la evolución de este y proponer una remediación. Es en este punto, donde la intención de este trabajo hace sentido.

1.4. Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo general analizar y evaluar el estado actual de los suelos en las comunidades de Arizpe y Banámichi, en la cuenca del río Sonora, con base al muestreo realizado y la comparación de concentraciones de metales pesados frente a los límites establecidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, así como por estándares internacionales más estrictos, con el fin de fundamentar la pertinencia de implementar una estrategia de prevención ambiental.

Este objetivo se orienta a determinar no solo el grado de riesgo ambiental residual que persiste a una década del derrame de sulfato de cobre acidulado, sino también a justificar la necesidad de acciones preventivas y de monitoreo continuo en sitios donde las concentraciones de contaminantes, si bien pueden encontrarse dentro de los valores permitidos por la normatividad nacional, siguen representando un riesgo potencial para los ecosistemas y para la salud humana.

Para ello, se propone una integración metodológica que combina la caracterización fisicoquímica y biológica de suelos, y con la evaluación de las condiciones ecológicas y sociales locales. Asimismo, el trabajo tiene como meta diseñar un plan de monitoreo ambiental, con énfasis en bioindicadores y parámetros de estabilidad geoquímica, así como proponer medidas complementarias como la protección de la vegetación nativa, la educación ambiental comunitaria y la incorporación de tecnologías de bajo impacto, que en conjunto permitan fortalecer una estrategia de prevención ambiental viable, económica y socialmente aceptada para las comunidades afectadas.

2. Sitios de estudio

En respuesta a una solicitud de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales para obtener información actualizada sobre el municipio de Cananea, Sonora, el Dr. Luis Gerardo Ruíz Suárez, Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental del INECC, encargó a los Laboratorios del INECC llevar a cabo una campaña de medición de metales y metaloides en polvo y suelo (Gutiérrez Feria, 2022).

En febrero del 2022, siguiendo la recomendación de continuar con el monitoreo de suelos, el personal del INECC realizó una comisión a Sonora para elaborar un muestreo en los municipios de San José de Gracia, Baviácora, Aconchi, Bacacochi, Arizpe, Banámichi y Huepac (Imagen 2), para posteriormente analizar las muestras y con base en ello ver la evolución de los metales en estas localidades.

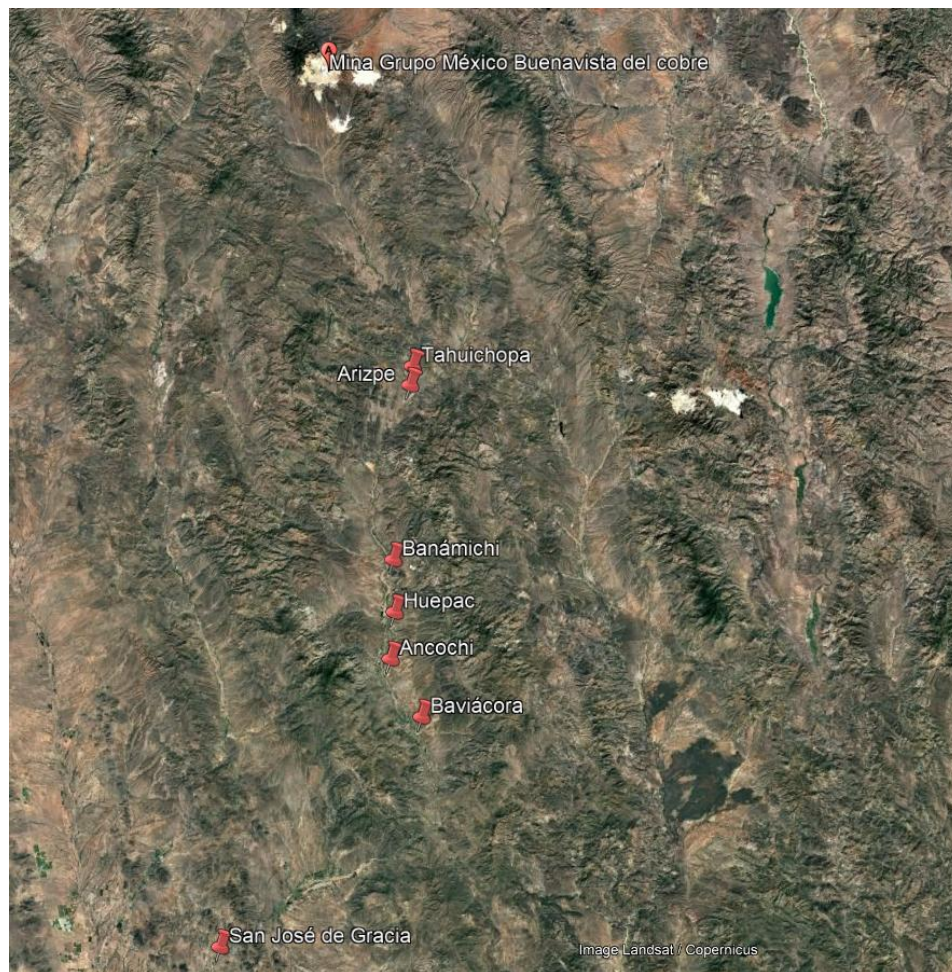


Imagen 2: Referencias de los sitios de muestreo con respecto a la mina Buenavista del cobre.

2.1. San José de Gracia

Se encuentra en el centro-norte del estado de Sonora. Está situado en una zona montañosa de la Sierra Madre Occidental (Imagen 3), sobre la carretera federal Hermosillo-Moctezuma frente a un mirador que da al Río Sonora, a una altitud promedio de 700 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con el municipio de Arizpe, al este con Baviácora y al sur con Ures.

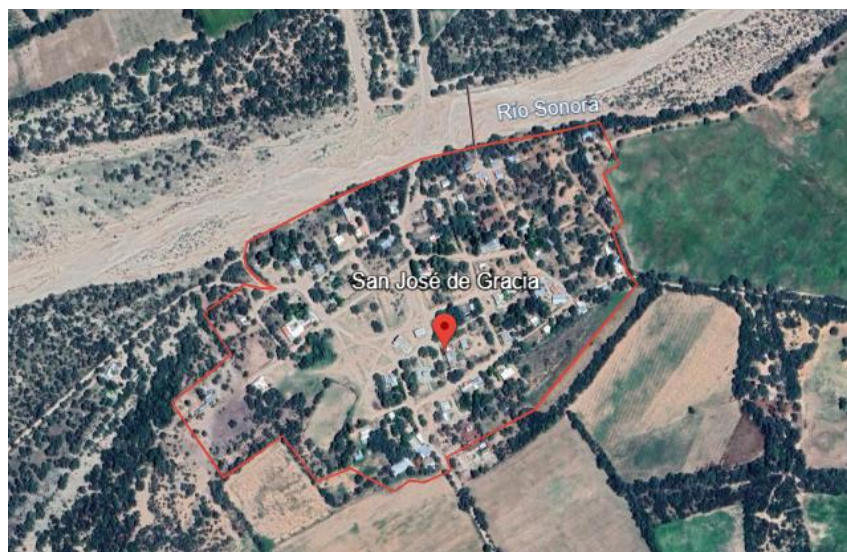


Imagen 3: Vista satelital de San José de Gracia.

San José de Gracia es uno de los municipios con menor densidad poblacional en Sonora, según el censo del INEGI (2020), cuenta con aproximadamente 41 habitantes. La economía se basa en la agricultura, ganadería de subsistencia y pequeñas actividades de comercio local.

Es una región semidesértica con montañas y valles, la vegetación es particularmente de arbustos, no se observa presencia humana y el río Sonora tiene un cauce de unos dos metros de ancho por unos 10 cm de profundidad, sin observarse contaminación alguna (Ríos Baza, 2022).

El flujo vehicular es esporádico y no se observa actividad humana.

2.2. Baviácora

Se localiza en la región central de Sonora (Imagen 4), dentro del valle del río Sonora. Limita con Ures al sur, con Aconchi al norte y con San José de Gracia al oeste. Su altitud es de 410 metros sobre el nivel del mar.



Imagen 4: Vista satelital de Baviacora.

El municipio tiene una población de 3,191 habitantes, según el INEGI (2020). Principalmente agrícola, destacando cultivos como maíz, frijol, trigo y cebollas. La ganadería y el comercio también juegan un papel importante en su economía. Los sembradíos se encuentran entre la población y el río Sonora en una franja de 1 km aproximadamente.

Posee un clima semi desértico con temperaturas que pueden ser extremas en verano. El río Sonora atraviesa el municipio y es una fuente vital de agua.

Las muestras se recolectaron en el cauce del río Sonora, el cual presentaba un ancho inferior a un metro y una profundidad aproximada de 5 cm. En su interior se observó una franja de suelo de entre 20 y 30 cm de ancho.

Durante la inspección del sitio no se identificaron indicios visibles de contaminación ni actividad industrial en las inmediaciones. En el cauce se observaron árboles con alturas cercanas o superiores a 10 m. La zona habitacional está constituida principalmente por viviendas de un nivel y la mayoría de sus calles se encuentran pavimentadas (Ríos Baza, 2022).

2.3. Aconchi

Localizado también en el valle del río Sonora (Imagen 5), Aconchi se encuentra al norte de Baviacora y al sur de Banámichi. La altitud promedio es de 600 metros sobre el nivel del mar.



Imagen 5: Vista satelital de Aconchi.

Según el INEGI (2020), Aconchi cuenta con alrededor de 2,563 habitantes. Su economía se basa en la agricultura (maíz, trigo, frijol), cuyos sembradíos se encuentran entre el pueblo y los márgenes del río Sonora a ambos lados, ganadería de pequeña escala y comercio local.

Tiene un clima semicálido seco, con temperaturas frescas en invierno y muy altas en verano. El municipio está rodeado por colinas y el río Sonora lo cruza, lo cual facilita la agricultura.

Las muestras se recolectaron en el cauce del río Sonora, que en este punto presentaba un ancho máximo aproximado de 2 m y una profundidad cercana a 5 cm. En ambas márgenes se observó una franja de material sedimentario de alrededor de 10 m de ancho (Ríos Baza, 2022).

El sitio de muestreo se localiza cerca de un camino vecinal, por lo que se identificaron huellas correspondientes al tránsito de distintos vehículos. Durante la visita, el agua presentaba una ligera turbidez y una tonalidad oscura. Como característica particular de la localidad, también destaca la presencia de aguas termales.

2.4. Bacacochi (Tahuichopa)

El sitio de muestreo se encuentra en Bacacochi, Arizpe en el vado de Tahuichopa. Se localiza en la cuenca del río Sonora (Imagen 6), dentro de la región serrana central del estado. Su altitud es de aproximadamente 850 metros sobre el nivel del mar.

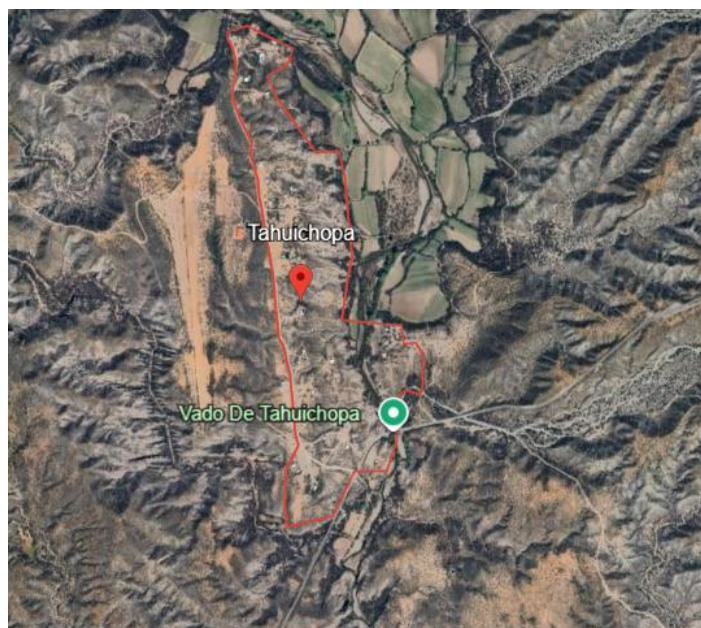


Imagen 6: Vista satelital de Tahuichopa.

Es una localidad muy pequeña con una población de 80 habitantes (INEGI, 2020). Debido a su reducido tamaño, forma parte de las comunidades rurales que dependen de la cabecera municipal (Arizpe) para servicios y actividades administrativas.

La economía de Tahuichopa se centra en la ganadería de pequeña escala y la agricultura temporal, donde se cultivan productos como maíz y frijol. Es común también la práctica de actividades de subsistencia, como el autoconsumo.

Tahuichopa está rodeada por un entorno semiárido serrano, con colinas y cañones que son típicos de la región del río Sonora. El clima es semidesértico, con veranos calurosos e inviernos templados. La vegetación predominante incluye matorrales y especies propias de la región, como mezquites y saguaros.

Antes del vado, el río Sonora presenta una caída de aproximadamente 30 cm. En este punto, el cauce alcanza cerca de 20 m de ancho y una profundidad aproximada de 10 cm. Después del vado, su ancho se reduce hasta alcanzar alrededor de 80 cm.

En los costados del vado se observó una acumulación de material fino con apariencia de limo. El agua presentaba una tonalidad verdosa y, en algunos sectores, se identificaron zonas de estancamiento.

Las muestras de suelo se recolectaron aguas abajo del vado, donde se encontró una superficie con menor evidencia de intervención. El material presentaba una cantidad considerable de piedras de río y una ligera tonalidad rojiza.

El vado se encuentra sobre la carretera federal con dirección a Cananea. En sus inmediaciones existen pequeños ranchos, potreros destinados al pastoreo y presencia de ganado bovino y algunos caballos. Durante la visita se observó un flujo vehicular reducido (Ríos Baza, 2022).

2.5. Banámichi

Se encuentra en la región central del estado de Sonora, también a lo largo del río Sonora (Imagen 7). Está aproximadamente a 158 kilómetros al noreste de Hermosillo y a unos 100 kilómetros al sur de la frontera con Estados Unidos. La ubicación en el valle del río Sonora lo convierte en un sitio con un clima más templado en comparación con otras partes del estado.

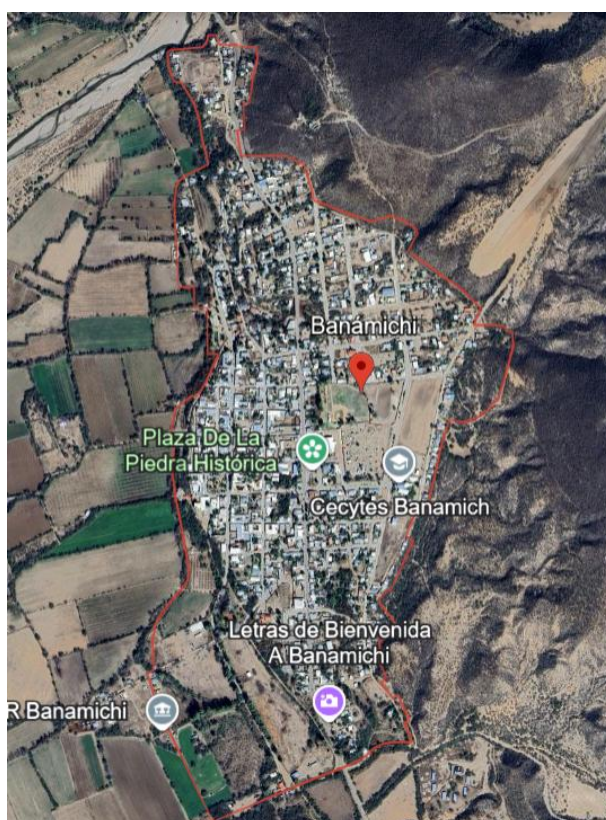


Imagen 7: Vista satelital de Banámichi.

El municipio de Banámichi tiene una población aproximada de 1,825 habitantes según el último censo (INEGI, 2020).

La economía se centra en la agricultura (frijol, maíz, trigo), ganadería y turismo, aprovechando su ubicación en la Ruta del Río Sonora.

Su vegetación se caracteriza por tener zonas semiáridas y del valle del río Sonora. El clima es semidesértico, con inviernos templados y veranos calurosos.

El muestreo se realizó debajo del puente de Banámichi, ubicado sobre la carretera federal con dirección a Cananea, aproximadamente a 500 m de la localidad. Entre la zona urbana y el río Sonora se extiende una franja de terrenos agrícolas con una anchura cercana a 1 km.

Durante la visita, el flujo de agua bajo el puente presentaba un ancho no mayor de 20 cm y una profundidad inferior a 1 cm. En el sitio también se observaron diversos encharcamientos y una ligera turbidez en el agua. La planicie susceptible de inundación se extendía aproximadamente 15 m hacia cada margen del cauce (Ríos Baza, 2022).

En la zona se identificaron huellas de vehículos y residuos de ganado. Por esta razón, las muestras de suelo se recolectaron en puntos donde no se observaron indicios de estas alteraciones.

El flujo vehicular era reducido. La localidad está conformada principalmente por construcciones de uno y dos niveles, y la mayoría de sus calles se encuentran pavimentadas.

2.6. Arizpe

Ubicada en la parte norte-central del estado de Sonora, también en la cuenca del río Sonora (Imagen 8). Está a unos 190 kilómetros al noreste de Hermosillo y a una altitud de aproximadamente 850 metros sobre el nivel del mar. Su ubicación en las estribaciones de la Sierra Madre Occidental.



Imagen 8: Vista satelital de Arizpe.

Arizpe es el municipio con la mayor población entre los tres mencionados, con aproximadamente 2,788 habitantes según el censo de 2020. A pesar de ser pequeño, Arizpe es un centro de importancia histórica en la región. Su economía se basa en la ganadería extensiva, la agricultura de temporal y actividades relacionadas con la minería en zonas cercanas.

Es una región montañosa atravesada por el río Sonora, teniendo un clima semiárido y especies adaptadas a las condiciones semiáridas, como encinos, mezquites, palo verde y diversas cactáceas. En las áreas montañosas de la Sierra Madre, la vegetación es más densa, con especies de árboles como pinos y robles, especialmente en zonas más elevadas.

Arizpe es una de las localidades con mayor población entre los sitios visitados y se encuentra muy próxima al río Sonora. La mayoría de sus calles están pavimentadas, mientras que en la zona central predominan edificaciones antiguas. En la plaza principal también se observaron árboles frutales, particularmente mandarinos.

La distancia entre la plaza y el río es inferior a 50 m. Debido a esta cercanía, se observaron escurrimientos procedentes de las calles y las viviendas hacia las márgenes del cauce. Durante la visita, el río presentaba aproximadamente 1 m de ancho y 2 cm de profundidad, así como agua ligeramente turbia, zonas de anegamiento y presencia de vegetación acuática con apariencia de lirios o algas pequeñas.

La mayoría de las superficies agrícolas se localizan en la margen opuesta del río. Sobre la arena se identificaron huellas de neumáticos, posiblemente asociadas con vehículos utilizados para cruzar el cauce, además de algunos residuos sólidos. La planicie susceptible de inundación presentaba una anchura aproximada de 10 m o más (Ríos Baza, 2022).

Las muestras de suelo se recolectaron en los puntos con menor evidencia de tránsito vehicular y de presencia humana o animal.

2.7. Huepac

Está situado en el centro del valle del río Sonora, entre los municipios de Banámichi y Baviácora (Imagen 9). Su altitud promedio es de 550 metros sobre el nivel del mar.



Imagen 9: Vista satelital de Huepac.

Es un municipio pequeño con una población de 943 habitantes (INEGI, 2020). Su economía se basa en la agricultura, ganadería y, en menor medida, el comercio local. También se promueve el turismo como parte de la Ruta del Río Sonora.

El municipio tiene un clima semi desértico cálido. El paisaje está conformado por colinas suaves, valles y el río Sonora, que proporciona agua para el riego.

Huépac es una localidad pequeña cuya actividad económica incluye el cultivo de hortalizas. El cauce del río Sonora se encuentra aproximadamente a 500 m de la zona urbana.

Al momento de la visita, el cauce se encontraba seco, por lo que únicamente se recolectaron muestras de suelo. No obstante, al excavar se detectó humedad debajo de la superficie. Esta observación indica la presencia de humedad subsuperficial, aunque no permite confirmar por sí misma la existencia de una corriente de agua subterránea.

En la arena del cauce se observaron pequeñas partículas brillantes cuya composición no pudo determinarse mediante inspección visual. La vegetación estaba constituida principalmente por arbustos de tamaño mediano. Durante el recorrido no se identificó un tránsito constante de vehículos ni una presencia frecuente de animales (Ríos Baza, 2022).

3. Plan de muestreo

3.1. Objetivo

Recolectar muestras puntuales de polvo y suelo en diferentes sitios para conocer las concentraciones de metales y metaloides, evaluando así el comportamiento de estas con respecto a muestreos anteriores.

3.2. Localización de los sitios de muestreo

Ríos Baza (2022) reportó que se llevó a cabo un muestreo exploratorio que permitió recolectar muestras de suelo (Tabla 2), con el objetivo de determinar la posible contaminación por metales y su distribución horizontal. Las muestras (Imágenes 10, 11 y 12) fueron de tipo superficial, tomadas a una profundidad de 5 cm desde la superficie, y corresponden a muestras simples (Tabla 3).

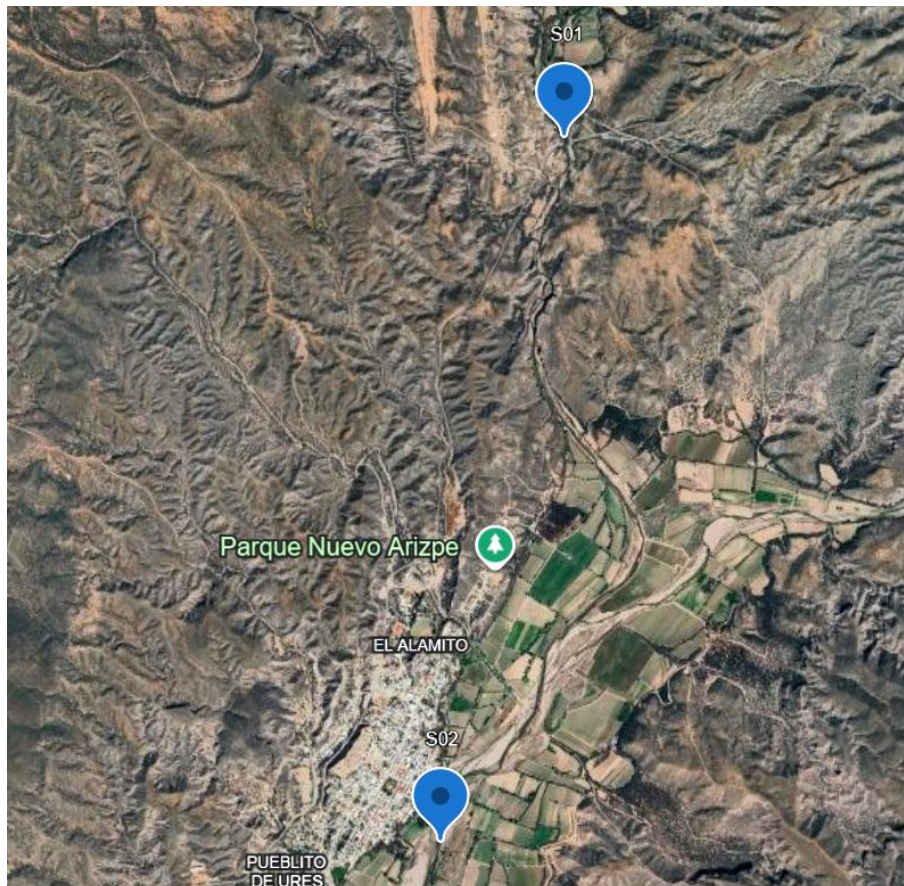


Imagen 10: Vista satelital de los puntos de muestreo S01 y S02.

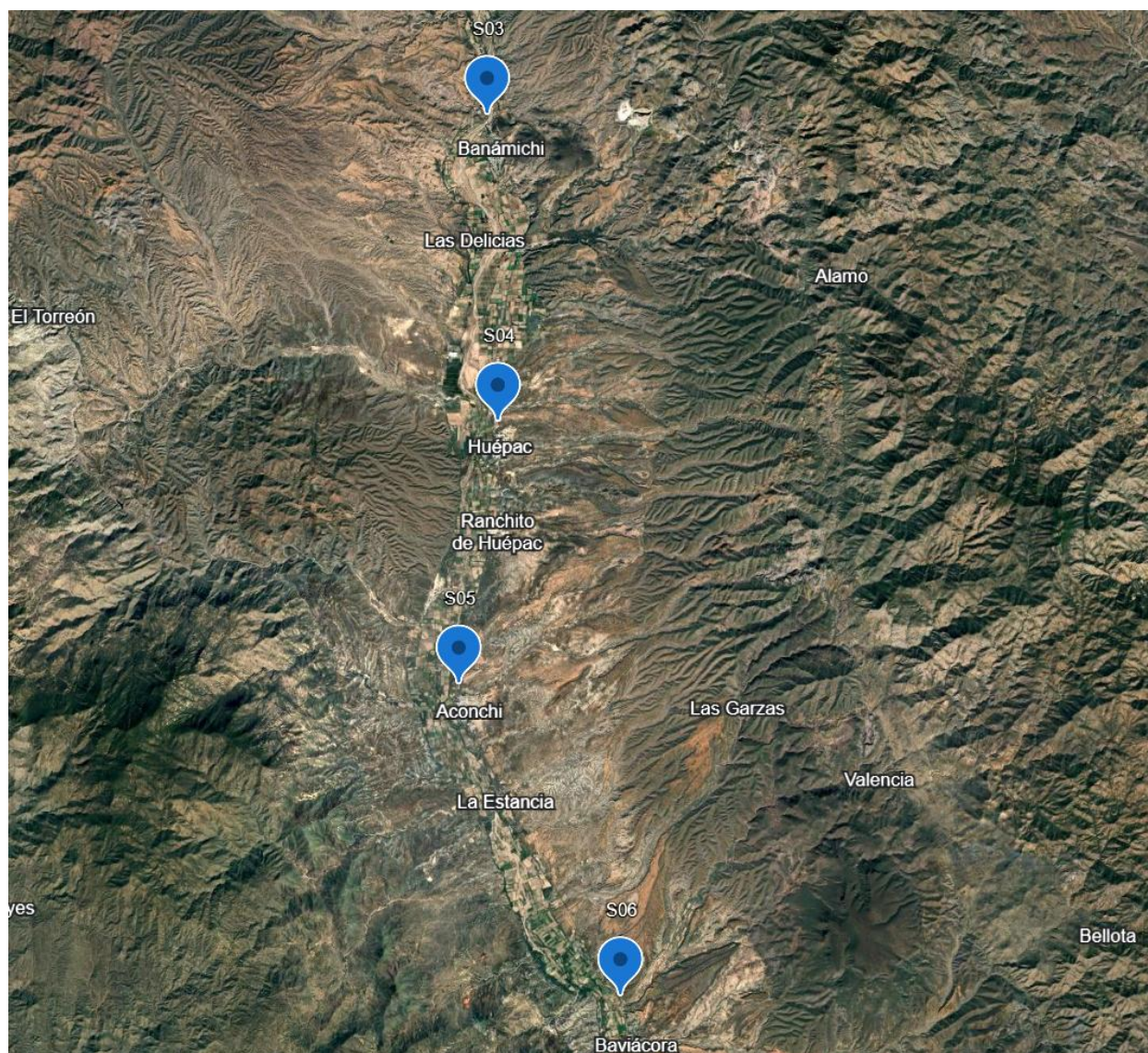


Imagen 11: Vista satelital de los puntos de muestreo S03, S04, S05 y S06.

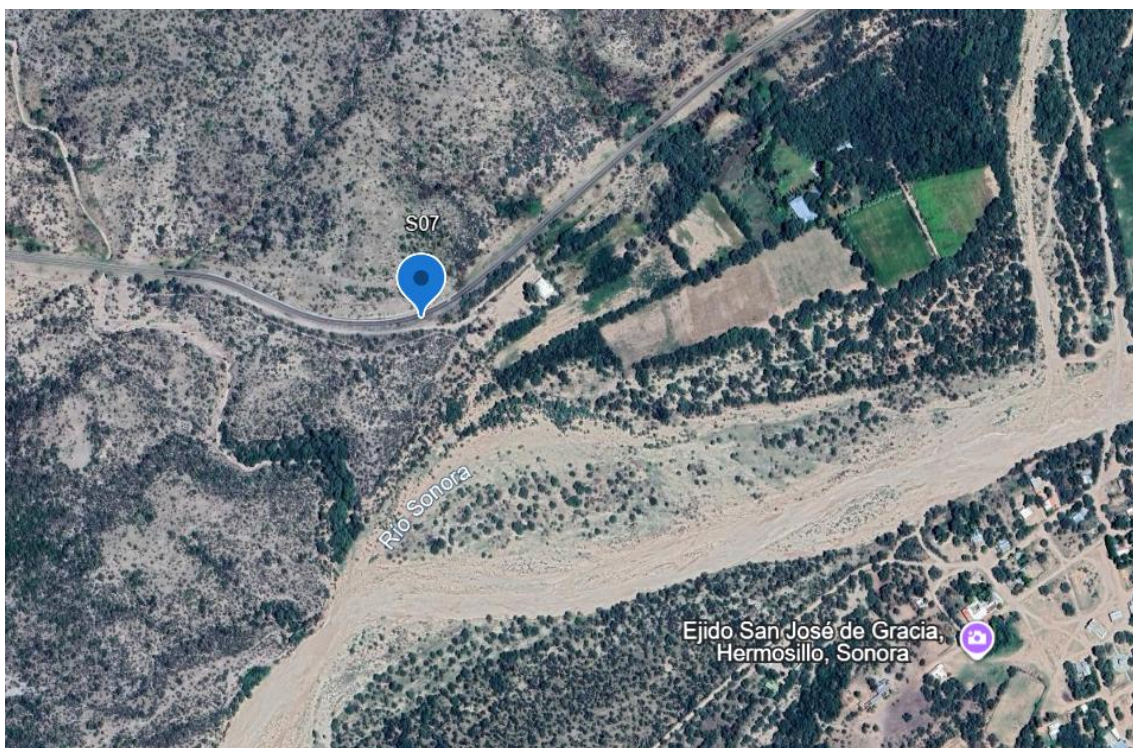


Imagen 12: Vista satelital del punto de muestreo S07.

Tabla 2: Identificación y georreferencia de los sitios a muestrear Fuente: Dictamen diagnóstico ambiental (SEMARNAT, 2023).

Identificación	Ubicación	Georreferencia
S01	Bacacochi (Tahuichopa)	30° 22' 00.03" N 110° 09' 24.31" O
S02	Arizpe	30° 19' 58.56" N 110° 09' 48.98" O
S03	Banámichi	30° 01' 10.21" N 110° 13' 04.32" O
S04	Huepac	29° 55' 05.31" N 110° 12' 49.42" O
S05	Aconchi	29° 49' 52.57" N 110° 13' 43.25" O
S06	Baviácora	29° 43' 41.01" N 110° 10' 01.20" O
S07	San José de Gracia	29° 17' 27.78" N 110° 37' 11.38" O

Tabla 3: Parámetros por analizar y número de muestras por sitio. Fuente: Plan de muestreo: 002-22 (p. 4), por E. Gutiérrez Fera, 2022, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

No.	Nombre del sitio	Matriz	Tipo de muestreo	Análisis	Técnica	No. De muestras
1	Bacacochi	Polvo (500 g)	Superficial	Metales y Metaloides	ICP-OES ICP-MS	2
2	Arizpe	Suelo (500 g)	Superficial	Metales y Metaloides	ICP-OES ICP-MS	2
3	Banámichi	Suelo (500 g)	Superficial	Metales y Metaloides	ICP-OES ICP-MS	2
4	Huepac	Suelo (500 g)	Superficial	Metales y Metaloides	ICP-OES ICP-MS	2
5	Aconchi	Suelo (500 g)	Superficial	Metales y Metaloides	ICP-OES ICP-MS	3
6	Baviácora	Suelo (500 g)	Superficial	Metales y Metaloides	ICP-OES ICP-MS	3
7	San José de Gracia	Suelo (500 g)	Superficial	Metales y Metaloides	ICP-OES ICP-MS	3
Total						17

El muestreo fue planeado y aleatorio, pero de carácter exploratorio por petición del Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental del INECC, así mismo, el número de muestras recabadas no fue establecido con el propósito de obtener una representación estadística de la totalidad de la superficie de los municipios, por lo que, para establecer patrones espaciales con mayor alcance y evaluar la distribución de los metales a escala municipal, sería necesario realizar campañas posteriores con una mayor densidad y cobertura espacial de muestreo.

3.3. Preservación, conservación y manejo de las muestras

De acuerdo con Ríos Baza (2022), la toma de muestras se realizó utilizando guantes de látex limpios, pala y pico de acero inoxidable. Una vez colectados al menos 500 g de suelo, las muestras fueron envasadas en bolsas de plástico con zipper de 25x35 cm, etiquetadas (Imagen 13), de igual forma fueron selladas de manera hermética, garantizando su inviolabilidad hasta su llegada al laboratorio y manteniendo una temperatura menor a 4º C, evitando que estuvieran expuestas a la luz del sol. El etiquetado y el sellado de

las bolsas se realizaron inmediatamente después de recolectar cada una de las muestras, así como su identificación. El sello (Imagen 14), fue colocado de manera que garantizara la integridad de la muestra.

Formulario de etiqueta para muestra. En la parte superior izquierda se encuentra el escudo de México con el texto "ESTADOS UNIDOS MEXICANOS". A su lado, el texto "MEDIO AMBIENTE" en grandes letras y "SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES" en menores. A la derecha, el logo de INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) con el texto "INECC" y "INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO". En el centro, el título "ETIQUETA PARA MUESTRA". Debajo, cuatro líneas de texto con guiones bajos para escribir: "Fecha y hora del muestreo:", "Lugar del muestreo o proyecto:", "Identificación de la muestra:", y "Iniciales de quién toma la muestra:". En la parte inferior derecha, el código "F-PT-LEEL-07-02".

Imagen 13: Ejemplo de etiqueta para muestra. Fuente: F-PT-07, Muestreo de suelos, INECC (2021a).

Formulario de sello para muestra. En la parte superior izquierda se encuentra el escudo de México con el texto "ESTADOS UNIDOS MEXICANOS". A su lado, el texto "MEDIO AMBIENTE" en grandes letras y "SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES" en menores. A la derecha, el logo de INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) con el texto "INECC" y "INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO". En el centro, el título "SELLO PARA MUESTRA". Debajo, una línea de texto con guiones bajos para escribir: "Identificación de la muestra:". En la parte inferior derecha, el código "F-PT-LEEL-07-01".

Imagen 14: Ejemplo de sello para muestra. Fuente: F-PT-07, Muestreo de suelos, INECC (2021a).

3.4. Control de calidad

De acuerdo con el procedimiento documentado, se entregaron las hojas de campo (Imagen 15), cadenas de custodia (Imágenes 16 y 17) y las muestras con las identificaciones y el sello correspondientes.

HOJA DE CAMPO

Proyecto					FOLIO:			
Fecha		Muestreador		Supervisor de Muestreo				

No.	Sitio de Muestreo	Hora	Recipiente	Cantidad de Muestra	Temperatura Ambiente	Color	Olor	Referencia Geográfica

Contenedor: P. Plástico, V. Vidrio O: Otro

Observaciones

Imagen 15: Ejemplo de hojas de campo utilizadas en el muestreo. F-PT-10, Cadena de custodia, INECC (2021b).

F-PTA-10-03 CADENA DE CUSTODIA

Av. Progreso No 3, Col. Del Carmen, Alcaldía, Coyoacán Cd. de México, C. P. 04010
 Viveros de Coyoacán, Edif. 2 y 3. Tel. 54246400 Ext. 13304.

Nombre del Proyecto:				Muestreo realizado por:			
Solicitante:							
Domicilio:							
Tel: EMAIL:							
Fecha de muestreo:							

ANÁLISIS SOLICITADOS									
No.	FECHA/HORA DE MUESTREO	MATRIZ CONTENEDOR	SITIO DE MUESTREO						

Imagen 16: Ejemplo de hoja de custodia. Fuente: F-PT-10, Cadena de custodia, INECC (2021b).

NOMBRE Y FIRMA AUTORIZO	FECHA/HORA	NOMBRE Y FIRMA	FECHA/HORA	NOMBRE Y FIRMA	FECHA/HORA
NOMBRE Y FIRMA	FECHA/HORA	NOMBRE Y FIRMA	FECHA/HORA	NOMBRE Y FIRMA	FECHA/HORA
NOMBRE Y FIRMA	FECHA/HORA	FECHA/HORA	NOMBRE Y FIRMA	FECHA/HORA	NOMBRE Y FIRMA

OBSERVACIONES		USO EXCLUSIVO DEL LABORATORIO
PROYECTO: 		Medio utilizado en la entrega de muestras Paquetería () Cula: _____ Personal () Mensajería () Etiquetas Legibles SI () NO () Intactas SI () NO () Sellos de custodia Legibles SI () NO () Intactos SI () NO () Temperatura de Hielera en la recepción: _____ No aplica: Sellos de custodia
INSTRUCTIVO		
Solicitante: Nombre o Razón Social del cliente o de quien requiere el análisis. Domicilio: Calle, número exterior e interior y colonia del solicitante del análisis. Teléfono, fax y e-mail del solicitante. Muestreo realizado por: Nombre y firma de la persona que realizó el muestreo. Identificación de la muestra: Registrar el número o nombre con el cual se identificó la muestra cuando fue tomada. Clave de identificación interna: Clave asignada para el ingreso y control interno del laboratorio.	Fecha/hora de muestreo: registrar la fecha (dd/mm/aa) y la hora (hh:mm) en la que fue tomada la muestra. Tipo: Indicar por medio de las iniciales si la muestra es S: Simple, C: Compuesta. Matriz: Indicar por medio de las siguientes iniciales: AR: Agua Residual, AP: Agua Potable, A: Agua, S: Suelo, Ac: Aceite, Ld: Lodo, T: Tubo absorbente, LD: Líquido, SL: Sólido, Al: Aire, B: Biológico, F: Filtro, V: vegetal. Contenedor: Señalar por medio de las siguientes iniciales: VT: Vidrio Transparente, VA: Vidrio Ámbar, VI: Vial, E: Estéril, P: Plástico, F: Filtro, O: Otro. Número: Anotar la cantidad de contenedores de acuerdo a su clasificación.	Descripción de la muestra: Detallar de forma breve y clara las características de la muestra (aspecto, estado, color, fases, proceso del cual procede, condiciones, etc.) Análisis solicitados: Escribir el nombre del analito o parámetro a determinar. REVERSO DEL FORMATO Nombre y Firma: Registrar nombre, firma o rúbrica de la persona que entrega y recibe la custodia de la muestra. Observaciones: Espacio destinado a registrar cualquier comentario, señalamiento o indicación respecto al muestreo, procesamiento o análisis.

Imagen 17: Ejemplo del reverso de la hoja de cadena de custodia Fuente: F-PT-10, Cadena de custodia, INECC (2021b).

Equipos por utilizar en cada sitio

- Pico y pala de acero inoxidable.
- Bolígrafos y marcadores.
- Etiquetas y sellos.
- Cinta adhesiva.
- Cinta métrica o flexómetro.
- Hojas de campo.
- Sistema de Posicionamiento Global (GPS).
- Contenedor que asegure la integridad de las muestras durante su transporte.
- Agua desionizada y cepillo.

4. Análisis de muestras

Al recibir las muestras en el laboratorio, se inicia el proceso de preparación para su análisis posterior, el cual como se muestra en la Imagen 18, se divide de manera general en las siguientes etapas: pesado, digestión, filtrado y análisis.

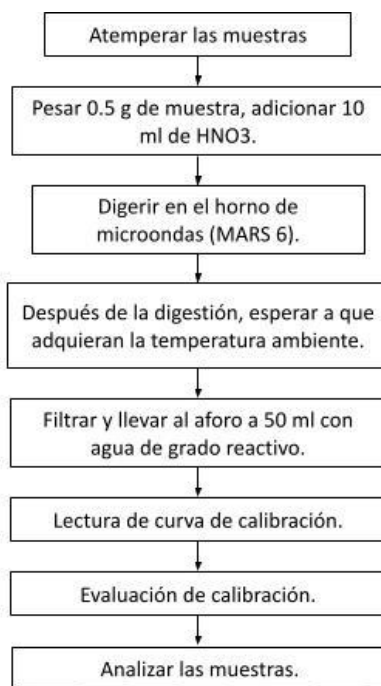


Imagen 18: Diagrama de flujo del proceso de análisis.

A continuación, desde la Imagen 19 hasta la 23, se muestran los equipos que fueron utilizados en el proceso, así como los datos de marca y modelo.

4.1. Equipos para el análisis

- Balanza analítica
Marca: ADAM
Modelo: PW 254



Imagen 19: Balanza analítica ADAM.

- Horno de microondas analítico

Marca: CEM

Modelo: MARS 6



Imagen 20: Horno MARS 6.

- Sistema de purificación de agua
Marca: Millipore
Modelo: Advantage A10 R system y dispensador Q-Pod



Imagen 21: Sistema de purificación Milli Q.

- Espectrómetro de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
Marca: Thermo Scientific
Modelo: iCAP, con auto muestreador y recirculador.



Imagen 22: Equipo ICP-MS.

- Espectrómetro de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)

Marca: Thermo Scientific

Modelo: iCAP 6500 DUO, con auto muestreador y recirculador.

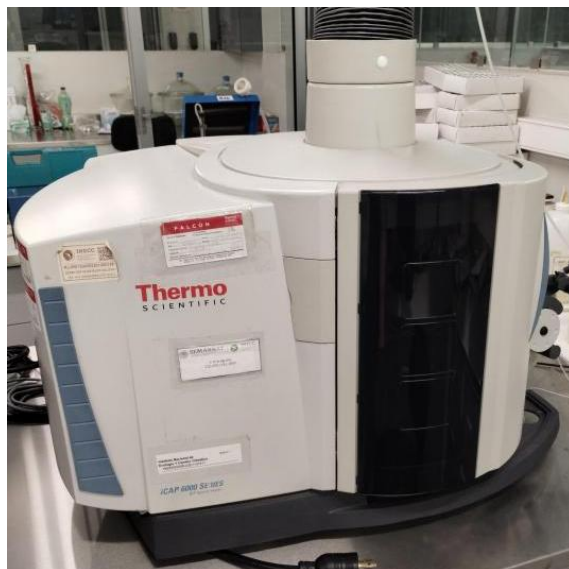


Imagen 23: Equipo ICP-OES.

4.2. Preparación de muestras y digestión

Para iniciar el proceso, es necesario acondicionar las muestras a temperatura ambiente durante 30 minutos, dado que al ingresar al laboratorio deben ser almacenadas en una cámara fría a 4°C.

Transcurrido el tiempo requerido para alcanzar la temperatura ambiente, se procede a pesar aproximadamente 0.5000 g de cada muestra (Imagen 24), las cuales son transferidas a tubos liners, utilizados para hacer la digestión en el horno de microondas (Imagen 25).



Imagen 24: Ejemplo de pesado de muestra.



Imagen 25: Tubos liners del horno MARS 6.

Posteriormente, se añaden 10 mL de ácido nítrico a cada tubo liner, los cuales se colocan en el rotor (Imagen 26), y se distribuyen según la disposición indicada de acuerdo con la cantidad de liners (Imagen 27).



Imagen 26: Vista por dentro del horno MARS 6 y su rotor.

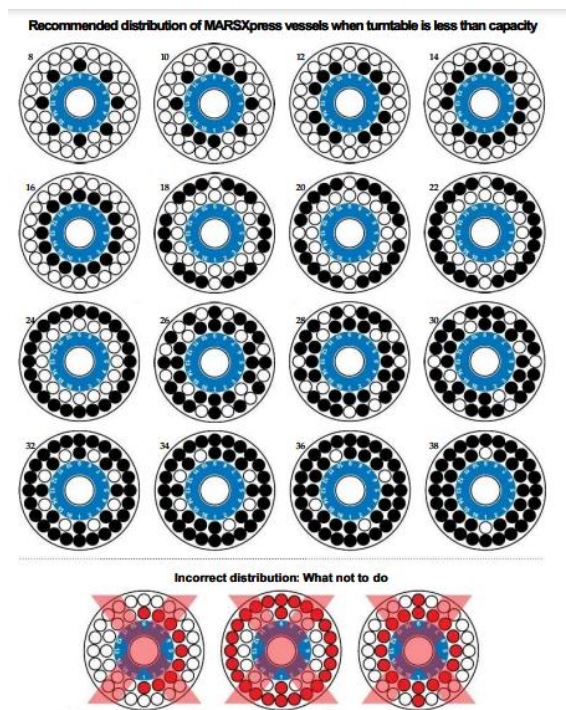


Imagen 27: Recomendación de distribuciones de acuerdo con el número de muestras.

Una vez que los liners han sido dispuestos en el rotor, este se introduce en el horno MARS 6 para llevar a cabo el proceso de digestión, cuyos parámetros son descritos en la Tabla 3 del Anexo 2. Al finalizar dicho proceso, los liners se retiran y se dejan enfriar a temperatura ambiente antes de ser transferidos a una cámara fría para su posterior almacenamiento.

4.3. Filtrado

Para el último proceso de preparación antes del análisis, es necesario filtrar las muestras previamente digeridas utilizando papel filtro libre de cenizas marca Cytiva Whatman 41, diámetro de 125 mm y tamaño de poro de 25 μm (Imagen 28).



Imagen 28: Caja con papel filtro marca Cytiva Whatman.

Cada liner se enjuaga con agua ultrapura del sistema Milli-Q, y el efluente se recoge en matraces aforados de 50 mL clase A, tal como se ilustra en la Imagen 29. Posteriormente el contenido, se trasvasa a tubos de centrifuga de 50 mL y luego a su vez, a tubos de 15 mL para su análisis.

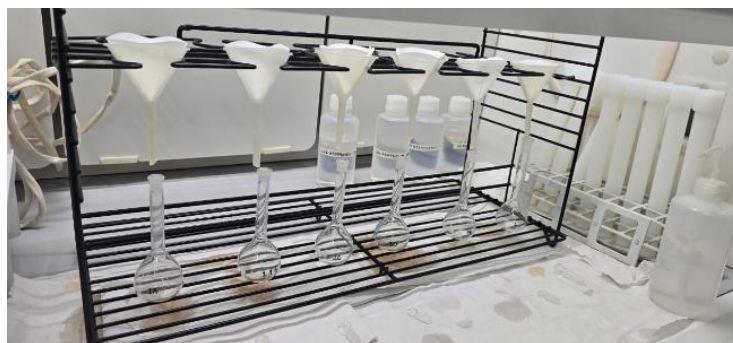


Imagen 29: Ejemplo de filtrado de las muestras previamente digeridas.

4.4. Análisis de las muestras

Finalmente, las muestras filtradas serán analizadas en los equipos ICP-MS (Imagen 30) e ICP-OES. Para más detalles sobre el procedimiento de análisis, consultar los Anexos 2 y 3.



Imagen 30: Ejemplo de análisis de muestras por el equipo ICP-MS.

5. Resultados y discusión

5.1. Resultados obtenidos

En las muestras analizadas se realizó la cuantificación de los elementos de interés con el propósito de determinar su presencia y concentración: Ag, Al, As, etc. Cabe mencionar, que los equipos en los que se analizaron estos metales no arrojaron datos de Ag, Be, Cd, Fe, Li, Mg, Mo, Sb, Se, Sn y Tl, debido a que fueron menores al límite de detección.

Los sitios de muestreo se pueden observar en la Imagen 31, los respectivos resultados en la Tabla 4 y para mayor claridad, en la Tabla 5 se muestran los valores mínimos, máximos y el promedio de cada elemento analizado.

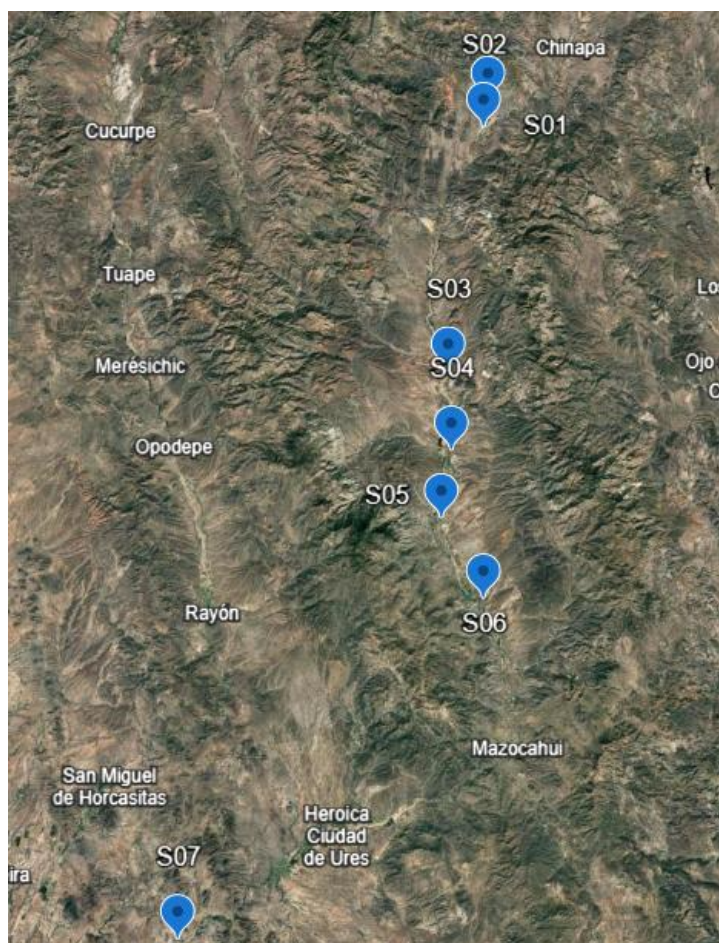


Imagen 31: Vista de los sitios donde se realizó la toma de muestras.

Tabla 4: Resultados de los análisis. Fuente: Dictamen diagnóstico ambiental (SEMARNAT, 2023).

Localidad	Concentraciones en suelo superficial mg/kg base seca												
	Al	As	Ba	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sr	Ti	V	Zn
S01	6,073	4.0	94.3	4.2	2.4	7.2	223.9	6.5	7.0	135.7	<16.0	8.4	23.4
	5,270	6.6	77.0	4.6	2.8	13.9	350.0	5.7	9.0	77.3	<16.0	8.4	18.9
S02	4,704	3.7	49.1	4.6	2.1	12.3	197.8	4.5	7.0	47.9	<16.0	7.2	20.2
	4,268	5.8	49.3	4.2	2.3	9.1	175.6	5.1	6.8	43.5	<16.0	7.4	17.4
S03	5,857	7.6	94.0	3.7	2.8	6.6	183.7	4.7	9.9	80.3	17.2	9.0	24.1
	4,580	4.5	76.1	3.7	2.4	7.6	201.4	3.9	9.5	61.1	<16.0	6.9	17.5
S04	3,099	4.0	56.3	3.0	1.2	4.1	169.2	2.5	8.0	45.9	<16.0	5.3	13.9
	5,135	3.8	74.6	3.3	1.6	4.9	153.5	3.2	8.1	50.1	<16.0	5.7	16.5
S05	1,395	<0.3	<7.9	0.9	1.3	2.7	68.6	1.0	1.5	4.3	31.1	2.4	10.7
	1,641	0.4	12.5	1.7	1.4	2.6	119.7	1.4	4.8	5.3	27.3	2.6	9.9
	4,870	6.6	73.0	4.1	2.9	7.0	195.8	4.6	10.8	61.7	21.3	9.6	24.6
S06	15,419	34.1	267.7	13.5	9.6	50.5	902.4	18.7	50.7	175.8	<16.0	28.9	79.2
	1,420	2.2	30.3	1.5	0.7	3.6	98.5	1.2	5.9	17.8	<16.0	2.6	9.6
	2,618	4.3	41.0	2.7	1.7	4.1	187.5	2.7	9.3	27.5	21.8	5.7	14.3
S07	1,600	1.5	22.3	1.6	1.1	2.8	70.9	1.5	5.6	15.5	<16.0	3.0	7.5
	3,208	2.6	37.1	2.7	1.9	7.2	184.5	2.4	8.7	41.8	<16.0	6.0	12.9
	3,814	0.9	22.1	1.4	0.6	1.7	52.9	1.1	3.3	15.8	<16.0	1.7	7.3

Tabla 5: Valores mínimos, máximos y promedio de cada elemento.

	Al	As	Ba	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sr	Ti	V	Zn
Valor máximo	15,419	34.1	267.7	13.5	9.6	50.5	902.4	18.7	50.7	175.8	31.1	28.9	79.2

Valor mínimo	1,395	0.3	7.9	0.9	0.6	1.7	52.9	1	1.5	4.3	16	1.7	7.3
Promedio	4,410.1	5.5	63.8	3.6	2.3	8.7	208	4.2	9.8	53.4	18.3	7.1	19.3

5.2. Discusión e interpretación

En ese sentido, los resultados de interés de este trabajo son de los sitios S02 Y S03, que corresponden a Arizpe y Banámichi respectivamente debido a su localización dentro de la cuenca del río Sonora y a su cercanía con la zona de estudio asociada a la actividad minera.

De acuerdo con ello, se plantea una comparación de los resultados obtenidos con los límites de concentración por metal, establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y los resultados obtenidos en la Tabla 6.

Tabla 6: Comparación de los resultados con las concentraciones establecidas en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Contaminante	NOM-147- SEMARNAT/SSA1- 2004	Resultados de los análisis			
	Uso agrícola/residencial /comercial (mg/kg)	Arizpe (S02) (mg/kg)		Banámichi (S03) (mg/kg)	
Arsénico (As)	22	3.7	5.8	7.6	4.5
Bario (Ba)	5,400	49.1	49.3	94.0	76.1
Cromo Hexavalente (Cr)	280	2.1	2.3	2.8	2.4
Níquel (Ni)	1,600	4.5	5.1	4.7	3.9
Plomo (Pb)	400	7.0	6.8	9.9	9.5
Vanadio (V)	78	7.2	7.4	9.0	6.9

Nota: El valor de referencia establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 corresponde específicamente a cromo hexavalente [Cr(VI)], mientras que las concentraciones reportadas en el presente trabajo corresponden a cromo total (Cr). Por lo anterior, la comparación entre ambos valores se presenta únicamente con carácter referencial y no implica una determinación de cumplimiento respecto al límite establecido para Cr(VI).

Aunque la norma nacional NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007), fue elaborada con base en valores de referencia de diversos países y busca establecer límites máximos permisibles de metales en suelos para distintos usos (agrícola, residencial, industrial), resulta pertinente complementar este análisis con la Tabla 7 que incorpora los valores guía establecidos por organismos internacionales, como el Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME, por sus siglas en inglés). Esta comparación permite evaluar si, más allá del cumplimiento normativo nacional, los niveles detectados podrían representar un riesgo para la salud humana o el ambiente bajo criterios más estrictos internacionalmente aceptados.

Tabla 7: Comparación de las concentraciones normativas de metales y metaloides en suelo (SEMARNAT, 2007).

Elemento	NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 Residencial / Comercial	Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health
	(mg/kg)	(mg/kg)
Arsénico (As)	22	12
Bario (Ba)	5,400	750
Cadmio (Cd)	37	1.4
Níquel (Ni)	1,600	45
Plomo (Pb)	400	70

De acuerdo con estos límites internacionales, ahora se pondrán en comparación con los resultados obtenidos (Tabla 8).

Tabla 8: Comparación de las concentraciones normativas de Canadá con los resultados obtenidos.

Elemento	Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health	Resultados de los análisis			
	(mg/kg)	Arizpe (S02) (mg/kg)		Banámichi (S03) (mg/kg)	
Arsénico (As)	12	3.7	5.8	7.6	4.5
Bario (Ba)	750	49.1	49.3	94.0	76.1
Níquel (Ni)	45	4.5	5.1	4.7	3.9
Plomo (Pb)	70	7.0	6.8	9.9	9.5

Como se puede observar, las concentraciones se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos tanto en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 como en los valores guía internacionales propuestos por el Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME, 2007). Aunque esta situación no implica la ausencia total de contaminantes, ya que la persistencia de estos metales en el ambiente obedece a su naturaleza no degradable (Mmolawa et al., 2011) y a la capacidad limitada de los suelos locales

(de textura franco-arenosa y bajo contenido de materia orgánica), para inmovilizarlos completamente (Zúñiga-Vázquez et al., 2023).

Los análisis reportan la presencia persistente de metales como arsénico (As), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn) en concentraciones que, aunque inferiores a los umbrales legales, siguen siendo detectables y ambientalmente relevantes (Briseño-Bugarín et al., 2024).

En consecuencia, aunque las concentraciones actuales no representen un riesgo inmediato ni superen los valores de referencia nacionales o internacionales, su presencia residual prolongada puede favorecer procesos de redistribución por erosión, lixiviación o bioacumulación a largo plazo. Esto adquiere especial relevancia en zonas cercanas al río Sonora, donde los suelos agrícolas y las áreas de captación de agua coinciden espacialmente con antiguos sitios de impacto.

Por lo anterior, se considera pertinente hacer un monitoreo de los procesos de atenuación natural, orientado no a corregir una contaminación activa, sino a prevenir la reactivación o movilidad futura de los metales presentes en niveles traza. Este enfoque busca mantener la estabilidad geoquímica del suelo y garantizar que las condiciones ambientales actuales continúen siendo seguras para la población local, especialmente para grupos vulnerables como niños, mujeres embarazadas, personas de la tercera edad y personas con enfermedades crónicas, cuya exposición acumulativa podría ser más significativa (Ali et al., 2013; Pulford & Watson, 2003).

6. Propuesta de monitoreo ambiental preventivo

Como se mencionó anteriormente, aunque las concentraciones de metales en Arizpe y Banámichi se encuentran por debajo de los límites establecidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, la presencia persistente de As, Cu, Pb y Zn continúa siendo ambientalmente relevante, ya que estos elementos no se degradan y su comportamiento geoquímico puede variar ante cambios en el pH, materia orgánica, humedad y los ciclos de inundación. Así mismo, estudios en cuencas mineras del noroeste de México (Zúñiga-Vázquez et al., 2023) indican que estos cambios pueden aumentar su movilidad, por lo que resulta pertinente implementar medidas preventivas que garanticen estabilidad a largo plazo.

De este modo, la aplicación del Principio Precautorio, respaldado por el Acuerdo de Escazú (CEPAL, 2018)—que insta a prevenir daños ambientales incluso ante incertidumbre científica—refuerza la necesidad de adoptar estrategias de prevención no intrusivas como la atenuación natural. Aunque la NOM-147 fue construida con referencia a valores internacionales y considera grupos vulnerables, algunos autores han señalado que no incorpora procesos de acumulación sinérgica ni la evolución temporal de la movilidad de metales (Briseño-Bugarín et al., 2024), por lo que su cumplimiento no excluye la pertinencia de medidas adicionales de estabilidad ambiental.

En este sentido, se propone un plan de monitoreo ambiental preventivo, basado en procesos de atenuación natural, entendida como una técnica pasiva que permite la reducción gradual de la concentración, toxicidad o movilidad de los contaminantes mediante mecanismos físicos, químicos y biológicos propios del ecosistema. La aplicación de esta estrategia requiere como condición fundamental que la fuente de contaminación se encuentre controlada, de manera que no se incorporen nuevos contaminantes al sistema ambiental. De esta forma, resulta indispensable mantener medidas permanentes de prevención, supervisión y vigilancia ambiental que aseguren la estabilidad de las condiciones alcanzadas y eviten la generación de nuevos aportes contaminantes.

Esta propuesta se sustenta en el principio precautorio y en la necesidad de promover enfoques de gestión ambiental sostenibles, de bajo costo, y con mínima intervención en comunidades que ya han sido afectadas social y emocionalmente por el derrame ocurrido.

La propuesta de seguimiento ambiental planteada en este trabajo no parte de atribuir de manera directa la presencia de estos elementos al derrame ocurrido en 2014, ya que los resultados obtenidos no permiten determinar su origen. En la región pueden existir aportes naturales asociados con las características geológicas del área, así como fuentes antropogénicas históricas relacionadas con las actividades mineras desarrolladas en la zona.

En este contexto, la propuesta se orienta a dar seguimiento a las condiciones actuales de los sitios evaluados y a prevenir posibles cambios que pudieran favorecer la movilidad o redistribución de los metales presentes. Estos elementos pueden permanecer en el suelo y su comportamiento puede verse influenciado por factores como el pH, la materia orgánica, la humedad y los ciclos de inundación. Por ello, se considera

pertinente establecer medidas de seguimiento y vigilancia ambiental que permitan identificar oportunamente cambios en las concentraciones o en las condiciones ambientales de los sitios.

6.1. Atenuación natural

La atenuación natural (Natural Attenuation, NA) es un proceso mediante el cual los contaminantes presentes en el ambiente disminuyen su movilidad o permanecen estabilizados a través de procesos naturales del suelo y la vegetación, sin necesidad de intervenciones intensivas (EPA, 1999). Este enfoque ha sido utilizado como alternativa de manejo en sitios afectados por metales, particularmente cuando las concentraciones presentes no representan un riesgo inmediato y las condiciones ambientales favorecen su estabilidad.

En el caso de los suelos de Arizpe y Banámichi, la presencia de As, Cu, Pb y Zn en concentraciones por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la norma permite considerar a la atenuación natural como una estrategia preventiva viable. Su aplicación busca reducir la dispersión de contaminantes mediante la estabilización del suelo, el control de erosión y la conservación de la cobertura vegetal, además de mantener condiciones ambientales seguras para la población y los ecosistemas cercanos al río Sonora.

La atenuación natural monitoreada permite además dar seguimiento a posibles cambios en las condiciones del suelo a través de parámetros básicos como pH, materia orgánica y concentración de metales, con el fin de verificar que los contaminantes permanezcan estables en el tiempo (EPA, 1999).

En adición, las ventajas de este enfoque es que permite mantener la estabilidad ambiental del sitio sin recurrir a procesos de remediación invasivos o de alto costo económico. Asimismo, favorece la conservación de la vegetación local y disminuye el riesgo de erosión y transporte de sedimentos hacia zonas agrícolas o cercanas al cauce del río. Otro aspecto importante es que la atenuación natural puede complementarse con actividades de monitoreo ambiental y participación comunitaria, fortaleciendo la vigilancia preventiva de las condiciones del suelo.

6.2. Aplicación propuesta para el caso del río Sonora

La aplicación de una estrategia de atenuación natural en la cuenca del río Sonora resulta viable debido a las condiciones ambientales presentes en Arizpe y Banámichi. Estudios previos han reportado características del suelo que favorecen la retención de metales, particularmente en zonas con mayor contenido de materia orgánica y cobertura vegetal (SEMARNAT, 2023).

De igual forma, aunque el presente trabajo se centra en el análisis de suelos superficiales, diversos estudios y programas de monitoreo realizados con posterioridad al derrame de 2014 han documentado la presencia de metales como arsénico, cadmio, cobre, cromo y mercurio, en otras matrices ambientales de la cuenca del río Sonora, incluyendo agua superficial, sedimentos, aire y componentes de la biota (CONAGUA, 2021; SEMARNAT, 2023). Si bien el análisis detallado de estos medios se encuentra fuera del alcance de este

estudio, su consideración resulta relevante debido a que evidencian que los metales liberados al ambiente no se restringen únicamente al suelo. En este contexto, la implementación de una estrategia de atenuación natural orientada a la estabilización de As, Cu, Pb y Zn en los suelos podría generar beneficios ambientales complementarios, al contribuir a la reducción de procesos de erosión, transporte de sedimentos y dispersión de partículas, favoreciendo indirectamente la protección de otros componentes ambientales asociados a la cuenca. De esta manera, la propuesta no solo busca mantener condiciones seguras en los suelos de Arizpe y Banámichi, sino también fortalecer la estabilidad ambiental del sistema en su conjunto mediante acciones preventivas de bajo impacto.

Asimismo, especies presentes en la región como *Prosopis glandulosa* (mezquite), *Baccharis sarothroides* (mariola), *Salix* spp. (sauces) y *Opuntia* spp. (nopal) pueden contribuir a la estabilización del suelo y a la disminución de procesos erosivos, reduciendo la posible dispersión de As, Cu, Pb y Zn hacia otras áreas de la cuenca.

6.3. Caracterización del sitio

6.3.1. Condiciones fisicoquímicas del suelo

La región presenta una gran diversidad edafológica debido a su posición dentro de la Sierra Madre Occidental. Estudios de la UNAM (2016) y del INEGI (2014) indican que en Arizpe y Banámichi predominan suelos del tipo regosol, cambisol y fluvisol, con características importantes para la retención de metales:

- **Textura:** La textura es principalmente franco-arenosa a franca, con presencia local de gravas. En zonas agrícolas de Banámichi se ha reportado un mayor contenido de limo y materia orgánica superficial, lo que puede favorecer la retención de algunos metales por procesos de adsorción.
- **pH:** Suelos con valores de pH entre 6.2 y 8.4 han sido reportados, siendo ligeramente alcalinos en áreas no perturbadas. Esta condición es positiva para la inmovilización de metales como plomo (Pb) y cadmio (Cd), los cuales son más móviles en suelos ácidos (Alloway, 2013).
- **Materia orgánica (MO):** Las zonas ribereñas presentan mayor contenido de MO debido a la acumulación de restos vegetales y prácticas agrícolas. La MO ayuda a formar complejos estables con metales, reduciendo su biodisponibilidad (McBride, 1995).
- **Capacidad de intercambio catiónico (CIC):** Aunque no existen mediciones específicas para estos municipios, se espera una CIC media a alta en los suelos agrícolas de valles, lo cual puede limitar la migración de metales pesados

6.3.2. Caracterización biológica del suelo

No se dispone de estudios microbiológicos publicados específicamente para Arizpe y Banámichi, pero investigaciones en suelos de zonas mineras del norte de Sonora han demostrado la presencia de bacterias metalorresistentes que podrían contribuir a procesos de inmovilización o transformación de metales (Aguilera-González et al., 2022).

Se recomienda realizar:

- Análisis de diversidad microbiana mediante secuenciación de ADN ambiental (metagenómica).
- Aislamiento de cepas con potencial para procesos de biosorción o biomineralización, como *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens* o *Shewanella spp.*
- Ensayos de actividad enzimática (como deshidrogenasas y ureasa) como indicadores de salud microbiana y actividad biogeoquímica.

6.3.3. Propuesta operativa para la caracterización

Para la caracterización ambiental del sitio se propone establecer puntos de muestreo sistemáticos en ambas márgenes del río Sonora, priorizando zonas agrícolas, áreas cercanas a viviendas y sitios con antecedentes de deposición de sedimentos.

Los análisis se enfocarían principalmente en parámetros básicos de calidad de suelo, tales como pH, materia orgánica y concentración de As, Cu, Pb y Zn. Asimismo, se recomienda aplicar procedimientos estandarizados de muestreo con base en la NMX-AA-132-SCFI-2016, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 06 de marzo de 2017, así como lineamientos desarrollados por la American Society for Testing and Materials (ASTM), con el propósito de asegurar la representatividad y trazabilidad de las muestras recolectadas.

6.3.4. Contexto hidrogeológico

Los dos municipios se encuentran sobre el acuífero Hermosillo-Costa (clave 2610), y el río Sonora actúa como principal fuente de recarga superficial. La cercanía de los poblados al cauce y el uso frecuente de pozos ribereños para consumo humano y riego, hacen que la evaluación hidrogeológica sea prioritaria, por lo que se sugiere:

- Instalar piezómetros en zonas agrícolas y de uso doméstico para monitorear niveles freáticos y la dirección del flujo subterráneo.

- Medir conductividad hidráulica de los suelos para modelar la movilidad potencial de metales.
- Tomar muestras de agua subterránea y analizar metales disueltos (especialmente As, Cu, Pb y Zn).

La CONAGUA (2017) reportó que la zona tiene una vulnerabilidad media a alta ante contaminación difusa, particularmente en épocas de lluvia o avenidas.

6.3.5. Vegetación y uso del suelo

La vegetación dominante en Arizpe y Banámichi corresponde principalmente a matorral subtropical, vegetación riparia y zonas agrícolas. Especies como *Prosopis glandulosa* (mezquite) (Imagen 32), *Baccharis sarothroides* (mariola) (Imagen 33), *Salix spp.* (sauces) (Imagen 34) y *Opuntia spp.* (nopal) (Imagen 35), pueden contribuir a la estabilización del suelo y a la disminución de procesos erosivos en áreas cercanas al río Sonora.

Debido a su adaptación a las condiciones climáticas de la región, estas especies representan una alternativa viable dentro de una estrategia de atenuación natural orientada a conservar la cobertura vegetal y reducir el transporte de sedimentos potencialmente contaminados.

Recomendaciones:

- Evaluar la presencia y cobertura de estas especies a lo largo del río como barreras biológicas.
- Realizar análisis de concentración de metales en tejidos vegetales para conocer si hay bioacumulación o barreras naturales.
- Implementar monitoreos fenológicos y de regeneración para determinar resiliencia ecológica.

Adicionalmente, se añade una ficha técnica de dichas especies seleccionadas en el Anexo 3.



Imagen 32: Prosopis glandulosa (mezquite).



Imagen 33: Baccharis sarothroides (mariola).



Imagen 34: Salix spp. (sauces).



Imagen 35: Opuntia spp. (nopal).

6.4. Diseño de un plan de monitoreo

El diseño de un plan de monitoreo permite evaluar la estabilidad ambiental de los sitios y verificar que las concentraciones de As, Cu, Pb y Zn permanezcan dentro de condiciones seguras a lo largo del tiempo. Debido a que la propuesta de atenuación natural planteada en este trabajo tiene un carácter preventivo, el monitoreo representa una herramienta fundamental para dar seguimiento a posibles cambios en las condiciones del suelo y fortalecer la confianza de las comunidades en la seguridad ambiental de la zona.

6.4.1. Objetivos del monitoreo

1. Verificar la estabilidad de los contaminantes en el tiempo, tanto en suelos como en aguas superficiales y subterráneas.
2. Detectar cambios físicos o químicos que puedan aumentar la biodisponibilidad de metales.
3. Observar la respuesta biológica del ecosistema, incluyendo vegetación y microbiota.
4. Generar datos periódicos y verificables que permitan evaluar la eficacia de la atenuación natural como estrategia de contención.

6.4.2. Parámetros a monitorear

1. Suelo superficial (0–20 cm):

- pH
- Materia orgánica
- Conductividad eléctrica
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC)
- Metales totales (As, Cu, Pb y Zn)
- Metales biodisponibles (DTPA o Mehlich-3)
- Actividad enzimática (deshidrogenasa, fosfatasa)
- Densidad microbiana total

2. Agua subterránea (pozos ribereños y comunitarios)

- pH
- Conductividad eléctrica
- Coliformes totales y fecales (control sanitario)

- Metales disueltos (especiación química)
 - Elementos traza, particularmente los mencionados en el punto 1
 - Elementos con iones mayores (Ca, Mg, K, Na)
 - Aniones principales, particularmente nitratos (NO_3^-) y sulfatos (SO_4^{2-})

3. Agua superficial (Río Sonora)

- Metales disueltos y suspendidos
 - Elementos traza.
 - Elementos con iones mayores.
- Sólidos totales disueltos (STD)
- Oxígeno disuelto
- Turbidez

4. Vegetación nativa y agrícola:

- Bioacumulación de metales en hojas y raíces
- Cobertura vegetal y estado fenológico
- Análisis foliar en cultivos de consumo humano

6.4.3. Sitios y frecuencia de muestreo

La selección de sitios de monitoreo se fundamenta en la necesidad de representar adecuadamente las condiciones ambientales presentes en los municipios de Arizpe y Banámichi. Para ello, se priorizan zonas cercanas al cauce del río Sonora, parcelas agrícolas y puntos de aprovechamiento de agua utilizados por las comunidades locales, debido a que constituyen áreas con mayor interacción entre los componentes ambientales y las actividades humanas.

El monitoreo se enfoca principalmente en los suelos superficiales, por ser el objeto central del presente trabajo. No obstante, se considera conveniente incluir observaciones complementarias en agua y vegetación, con el propósito de contar con una visión más amplia del comportamiento ambiental de los metales en la cuenca. Cabe señalar que el análisis detallado de estas matrices no forma parte del alcance principal de esta propuesta.

Tabla 9: Sitios y frecuencia del muestreo.

Tipo de muestra	Sitios propuestos	Frecuencia sugerida
Suelo	Zonas cercanas al río y parcelas agrícolas en Arizpe y Banámichi	Semestral
Agua subterránea	Pozos comunitarios seleccionados	Trimestral
Agua superficial	Tramos representativos del río Sonora	Semestral
Vegetación	Zonas ribereñas y áreas agrícolas cercanas al río	Semestral

6.4.4. Indicadores de éxito de la atenuación natural

La evaluación de la estrategia de atenuación natural debe orientarse a verificar la estabilidad ambiental de los sitios monitoreados y la permanencia de condiciones seguras para la población y los ecosistemas. Debido a que la propuesta tiene un carácter preventivo, el éxito no necesariamente se refleja en la eliminación total de los metales presentes, sino en la ausencia de procesos que favorezcan su dispersión o incremento.

Los principales indicadores considerados corresponden a la estabilidad de las concentraciones de As, Cu, Pb y Zn en suelo, el mantenimiento de condiciones adecuadas de pH y materia orgánica, la conservación de la cobertura vegetal y la permanencia de condiciones aceptables de calidad del agua en sitios cercanos a las comunidades. Aunque el presente trabajo se enfoca en los suelos, la inclusión de agua y vegetación como indicadores complementarios permite reconocer posibles beneficios ambientales asociados a la estrategia de atenuación natural.

Tabla 10: Indicadores de éxito de la propuesta de monitoreo.

Indicador	Meta esperada
Concentraciones de As, Cu, Pb y Zn en suelo	Estables o en disminución
pH del suelo	Sin cambios significativos
Materia orgánica	Estable o en incremento
Calidad del agua en sitios de monitoreo	Sin tendencias de deterioro
Cobertura vegetal	Estable y con adecuada regeneración

Evidencia de erosión superficial	Ausente o mínima
----------------------------------	------------------

Para fortalecer el componente social del plan de monitoreo, se plantea la incorporación activa de las comunidades locales mediante la capacitación de habitantes —en particular jóvenes y representantes ejidales— para realizar monitoreos básicos, tomar registros visuales y apoyar en la recolección de muestras. Esta participación se complementa con la divulgación semestral de resultados a través de medios accesibles y la instalación de señalética en puntos de interés ambiental. Además, se propone formalizar alianzas con instituciones académicas como la Universidad de Sonora y el Instituto Tecnológico de Hermosillo, para garantizar el respaldo técnico-científico de los análisis y fomentar la formación de técnicos locales.

Asimismo, se recomienda el uso de herramientas de apoyo como sistemas de información geográfica, registros fotográficos de los sitios monitoreados y bases de datos históricas que permitan documentar la evolución de las condiciones del suelo y de la cobertura vegetal. Estas herramientas facilitan la comparación de resultados a lo largo del tiempo y fortalecen la toma de decisiones relacionadas con la gestión ambiental de la cuenca del río Sonora.

6.5. Protección y fortalecimiento de la vegetación existente

En un esquema de monitoreo preventivo basado en atenuación natural, la vegetación cumple un papel central como bioindicador de estabilidad ecológica, agente fito estabilizador y barrera física ante la dispersión de contaminantes. En las comunidades de Arizpe y Banámichi, ubicadas dentro del corredor ecológico del río Sonora, la vegetación nativa y la cobertura agrícola representan recursos esenciales tanto para la conservación ambiental como para el bienestar económico y alimentario local. La protección y el fortalecimiento de esta vegetación son, por tanto, pilares estratégicos del manejo preventivo del sitio.

6.6. Estrategias de conservación y fortalecimiento

Diversos estudios han documentado la capacidad de ciertas especies vegetales para retener metales pesados en sus raíces, evitando su movilización hacia capas más profundas del suelo o su incorporación a las aguas superficiales (Pulford & Watson, 2003; Ali et al., 2013).

Las siguientes acciones se proponen para proteger y fortalecer la vegetación local en Arizpe y Banámichi, en el contexto de una estrategia de atenuación natural:

1. Identificación y mapeo de especies clave

Se recomienda realizar un inventario florístico de las especies nativas y cultivadas que predominan en las riberas del río Sonora y zonas agrícolas colindantes. Deben priorizarse aquellas con alta

tolerancia a metales, elevada biomasa radicular y funciones estabilizadoras.

2. Revegetación con especies nativas

En áreas degradadas o con pérdida de cobertura vegetal, se sugiere implementar programas de revegetación utilizando especies nativas previamente seleccionadas. Estas deben ser compatibles con el clima semiseco y suelos calcisoles predominantes (INEGI, 2010), así como con las dinámicas de escurrimiento y sedimentación del río.

3. Control del sobrepastoreo y actividades agrícolas intensivas

La presión por sobrepastoreo en las zonas ribereñas, particularmente por ganado caprino y bovino, debe ser regulada mediante cercos vivos, rotación de potreros y acuerdos comunitarios. Del mismo modo, se recomienda promover prácticas agroecológicas que reduzcan la perturbación del suelo y el uso de agroquímicos.

4. Monitoreo de salud vegetal y acumulación de metales

El fortalecimiento de la vegetación incluye su seguimiento. Se deben realizar análisis foliares periódicos en especies representativas para determinar la acumulación de metales mencionados anteriormente, en especial en cultivos comestibles.

5. Educación ambiental y revalorización del entorno natural

La sensibilización de la población sobre la importancia de la vegetación nativa debe formar parte del programa. Esto puede lograrse mediante talleres comunitarios, señalización ecológica y la integración de jóvenes en brigadas de conservación.

El fortalecimiento de la vegetación en la zona no solo contribuye a la contención física y química de los contaminantes, sino que mejora la calidad del hábitat, favorece el equilibrio hídrico y reduce la erosión. En el mediano plazo, también permite restaurar los servicios ecosistémicos esenciales para las comunidades, como la producción de alimentos, la regulación microclimática y la recreación ambiental (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

6.7. Educación ambiental comunitaria

El fortalecimiento de la educación ambiental en las comunidades afectadas es una estrategia esencial para lograr una gestión socioambiental sostenible, especialmente en contextos donde se implementan medidas de atenuación natural. A diferencia de las remediaciones convencionales que operan desde una lógica técnico-industrial, los procesos de restauración basados en funciones ecológicas requieren la participación activa, informada y constante de la población local. En este sentido, la educación ambiental se convierte no solo en un componente de difusión, sino en una herramienta de empoderamiento comunitario.

6.7.1. Objetivos de la educación ambiental

La implementación de un programa de educación ambiental tiene como finalidad generar una base social informada y comprometida con la vigilancia y protección del entorno, especialmente en contextos donde se opta por estrategias de atenuación natural. A través de esta iniciativa, se busca fortalecer la conciencia colectiva sobre los procesos de contaminación por metales y las formas en que los ecosistemas pueden recuperarse mediante mecanismos naturales, sin recurrir a tecnologías invasivas o de alto costo. Además, se pretende fomentar habilidades prácticas en la población local para el monitoreo ambiental básico, promoviendo el aporte en la toma de decisiones relacionadas con el uso del suelo, el agua y la vegetación. De igual manera, se aspira a reducir la percepción de riesgo no fundamentada en evidencia científica, reemplazándola por una comprensión clara de las condiciones reales del entorno y de las acciones necesarias para su protección.

Para cumplir con estos propósitos, el programa educativo se estructurará en torno a cinco ejes temáticos.

1. Comprensión del ciclo de los contaminantes, explicando cómo los metales pesados pueden transportarse, transformarse e inmovilizarse en los componentes del suelo, el agua y la biota.
2. Restauración ecológica basada en la naturaleza, destacando el papel de la vegetación nativa y de los procesos ecológicos como aliados en la contención de contaminantes.
3. Cultura del agua y gestión local del recurso hídrico, promoviendo el conocimiento sobre la gestión responsable de los recursos hídricos locales, el cuidado de pozos y manantiales, y la prevención de la sobreexplotación.
4. Monitoreo ambiental comunitario, mediante el cual se capacitará a la población para realizar muestreos básicos, interpretar resultados y registrar datos ambientales con herramientas accesibles.
5. Salud ambiental y prevención, haciendo énfasis en la prevención de riesgos sanitarios derivados del contacto con suelos y aguas potencialmente contaminadas, especialmente en niños, niñas y adultos mayores.

6.7.2. Público objetivo

La estrategia educativa se orientará a diferentes grupos poblacionales, con metodologías adaptadas, mostrado en la Tabla 10.

Tabla 11: Grupo y herramientas o actividades sugeridas.

GRUPO POBLACIONAL	HERRAMIENTAS Y ACTIVIDADES SUGERIDAS
NIÑOS DE PRIMARIA	Juegos didácticos, cuentos ambientales, mapas ilustrados.
JÓVENES DE SECUNDARIA	Talleres de muestreo, infografías, proyectos escolares.
PRODUCTORES AGRÍCOLAS	Jornadas de campo, fichas prácticas, cartillas de especies nativas.
MUJERES CUIDADORAS DEL HOGAR	Charlas en centros comunitarios, monitoreo de agua doméstica.
AUTORIDADES LOCALES	Mesas de diálogo, talleres de legislación ambiental y comunicación.

7. Conclusiones

El análisis de la información disponible para las comunidades de Arizpe y Banámichi permitió determinar que las concentraciones de metales registradas en los suelos evaluados se encuentran, en términos generales, por debajo de los valores de referencia nacionales e internacionales utilizados en este estudio. No obstante, la presencia de estos elementos en los sitios evaluados evidencia su permanencia en el suelo y, considerando que pueden existir fuentes naturales y antropogénicas históricas en la región, no es posible atribuir exclusivamente su presencia al derrame ocurrido en 2014 con base en los resultados obtenidos. Por ello, los resultados deben interpretarse como una caracterización de las condiciones actuales de los sitios evaluados y como información de referencia para dar continuidad al seguimiento y vigilancia ambiental, particularmente para detectar posibles cambios en las concentraciones o en las condiciones que pudieran favorecer la movilidad de los metales.

Bajo este contexto, el análisis realizado respalda la pertinencia de considerar una estrategia de monitoreo ambiental preventivo basado en procesos de atenuación natural, no como una medida correctiva derivada del incumplimiento normativo, sino como una acción preventiva destinada a favorecer la estabilidad ambiental de los sitios evaluados. La conservación de la cobertura vegetal y la protección de especies nativas como *Prosopis glandulosa*, *Baccharis sarothroides*, *Salix spp.* y *Opuntia spp.* representan elementos importantes dentro de esta propuesta, debido a su contribución en la reducción de procesos erosivos y en la conservación de las condiciones del suelo.

Asimismo, se concluye que esta estrategia requiere de una continuidad que permita verificar la estabilidad de las condiciones observadas en el tiempo. Sin embargo, el éxito de esta propuesta no depende únicamente del seguimiento técnico de los parámetros ambientales. Resulta igualmente indispensable la aportación de la empresa responsable de la operación minera, mediante el mantenimiento permanente de medidas que garanticen el control de la fuente de contaminación y eviten nuevos aportes de contaminantes al ambiente. De manera complementaria, las autoridades ambientales deben mantener labores de supervisión, vigilancia y seguimiento que aseguren el cumplimiento de las obligaciones ambientales correspondientes y la eficacia de las acciones implementadas.

Aunque el presente trabajo se enfoca principalmente en el análisis de suelos, la revisión bibliográfica realizada permitió identificar que diversos estudios y programas de monitoreo posteriores al derrame han reportado la presencia de metales en otras matrices ambientales de la cuenca. Si bien el análisis detallado de estos medios queda fuera del alcance de esta investigación, su consideración permite reconocer que las acciones orientadas a la estabilización de los suelos podrían generar beneficios ambientales complementarios al contribuir a disminuir procesos de erosión, transporte de sedimentos y dispersión de contaminantes dentro del sistema ambiental.

Finalmente, la principal contribución de este trabajo consiste en integrar información técnica, ambiental y social para sustentar una propuesta preventiva aplicable a las condiciones de Arizpe y Banámichi. La atenuación natural, cuando se implementa bajo condiciones de control de la fuente de contaminación,

acompañada de monitoreo continuo, participación comunitaria, supervisión gubernamental y compromiso por parte de la empresa responsable, representa una alternativa de bajo impacto que puede contribuir al mantenimiento de la calidad ambiental de la cuenca del río Sonora y al fortalecimiento de las acciones de gestión ambiental de largo plazo.

8. Referencias

- Aguilera-González, C. G., Reyes-Saldaña, A., & Martínez-Ruiz, E. (2022). Evaluación de comunidades microbianas tolerantes a metales pesados en suelos contaminados por actividades mineras. *Revista Mexicana de Biotecnología*, 7(1), 45–58.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals: Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881.
- Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Springer.
- Briseño-Bugarín, J. G., et al. (2024). Lead (Pb) pollution in soil: A systematic review and meta-analysis of contamination grade and health risk in Mexico. *Environments*, 11(3), 43.
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2007). Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health. CCME.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2018). Acuerdo regional sobre el acceso a la información, la participación pública y el acceso a la justicia en asuntos ambientales en América Latina y el Caribe (Acuerdo de Escazú). Naciones Unidas.
- Comisión Nacional del Agua. (2017). Diagnóstico del acuífero Hermosillo-Costa, clave 2610. CONAGUA.
- Comités de Cuenca Río Sonora. (2023, 27 de julio). No hubo remediación por derrame tóxico en el río Sonora: La verdad sale a la luz, y con ello, la obligación de Grupo México de reparar el daño.
- CONABIO. (2019). Educación ambiental para la conservación de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Cortés, G., & Vázquez, M. (2021). Educación ambiental comunitaria: Aprendizajes desde la gestión local. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, 17(1), 33–49.
- Díaz-Caravantes, R. E., Durazo-Gálvez, F. M., Moreno-Vázquez, J. L., Duarte-Tagles, H., & Pineda-Pablos, N. (2021). Las plantas potabilizadoras en el río Sonora: una revisión de la recuperación del desastre. *Región y Sociedad*, 33, e1416.
- Díaz-Caravantes, R. E., Durazo-Gálvez, F. M., Reyes-Castro, P. A., & Duarte-Tagles, H. F. (2024). Calidad del agua en el río Sonora: resumen y análisis de los datos del Fideicomiso Río Sonora, 2014-2019. *Revista de Salud Ambiental*, 24(2), 189-205.
- Environmental Protection Agency. (1999). Use of monitored natural attenuation at Superfund, RCRA corrective action, and underground storage tank sites. U.S. Environmental Protection Agency.
- Environmental Protection Agency. (2007). Monitored natural attenuation of inorganic contaminants in ground water (EPA/600/R-07/140). U.S. Environmental Protection Agency.
- Gobierno de la República. (2015). Río Sonora: balance anual agosto 2015. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Gómez Moreno, R. (2025a). *PT-LEEL-01. Medición de metales en suelos, lodos y sedimentos por espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)* [Procedimiento técnico, revisión 5.0]. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

- Gómez Moreno, R. (2025b). *PT-LEEL-11. Medición de metales en suelos, lodos y sedimentos mediante espectrometría de masas acoplado inductivamente* [Procedimiento técnico, revisión 1.0]. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Gómez Moreno, R. (2025c). *PT-LEEL-04. Muestreo de suelos, lodos y sedimentos para análisis de metales* [Procedimiento técnico, revisión 5.0]. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Gutiérrez Fera, E. (2022). *Plan de muestreo: 002-22* [Documento interno no publicado]. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Gutiérrez-Ruvalcaba, M., Meza-Figueroa, D., & Romero, F. (2020). Evaluación de la calidad del suelo y agua en la cuenca del río Sonora posterior al derrame de 2014. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(4), 877–892.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2021a). *F-PT-07. Muestreo de suelos* [Formato interno].
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2021b). *F-PTA-10. Cadena de custodia* [Formato interno].
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010a). Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Arizpe, Sonora (clave geoestadística 26006). INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010b). Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Banámichi, Sonora (clave geoestadística 26013). INEGI.
- Interstate Technology & Regulatory Council. (2008). Technical and regulatory guidance for evaluating natural attenuation of metals and radionuclides. ITRC.
- Mazurek, R., Kowalska, J., Michał Gąsiorek, Paweł Zadrozny, Agnieszka Józefowska, Zaleski, T., Wojciech Kępka, Maryla Tymczuk, & Kalina Orłowska. (2016). Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park Forest soils (SE Poland) by indices of pollution. *Chemosphere*, 168, 839–850.
- McBride, M. B. (1995). Toxic metals in sewage sludge-amended soils: A review. *Journal of Environmental Quality*, 24(1), 5–18.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press.
- Mmolawa, K., Likuku, A., & Gaboutloeloe, G. (2011). Assessment of heavy metal pollution in soils along major roadside areas in Botswana. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5(3), 186–196.
- Murillo, E. (2020, March 30). Ordena SCJN no cerrar fideicomiso creado de Grupo México. *La Jornada*.
- Poder. (2020). Informe comunitario sobre la presencia de metales en agua, suelo y sedimentos en la cuenca del río Sonora. Proyecto de Derechos Económicos, Sociales y Culturales A.C.
- Pulford, I. D., & Watson, C. (2003). Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees: A review. *Environment International*, 29(4), 529–540.
- Ríos Baza, V. H. (2022). *Informe de muestreo 002/2022: Campaña corta de caracterización de metales y metaloides en el municipio de Cananea, Sonora* [Informe de campo no publicado]. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

- Secretaría de Economía. (2006). NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, & Comisión Nacional del Agua. (2021). Resultados de los análisis del monitoreo de calidad del agua superficial y subterránea en los ríos Bacanuchi y Sonora, agosto de 2021.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2006). Guía para la caracterización de sitios contaminados. SEMARNAT.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). Dictamen diagnóstico ambiental sobre la cuenca del río Sonora. SEMARNAT.
- Secretaría de Salud. (2024). NOM-147-SSA1-2024. Límites permisibles de metales pesados en suelos. Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT y CONAGUA (2021). Resultados de los Análisis del Monitoreo de Calidad del Agua Superficial y Subterránea en los Ríos Bacanuchi y Sonora agosto de 2021. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2016). Estudio sobre percepción de riesgo ambiental en comunidades del río Sonora. Instituto de Investigaciones Sociales, UNAM.
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2016). Informe técnico sobre la caracterización de suelos en la cuenca del río Sonora. Instituto de Geología, UNAM.
- Zúñiga-Vázquez, M., et al. (2023). Environmental assessment of arsenic and lead in soils from northern Mexico mining areas. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(9), 4321–4338.

Anexo 1: Definiciones para el trabajo de campo y laboratorio

- Área de estudio

Superficie donde se encuentra(n) la(s) zona(s) que está(n) dentro de la influencia de la contaminación.

- Blanco de método

Muestras matriz sin presencia de analito.

Muestra de una matriz similar al lote de muestras asociadas (cuando está disponible), que se encuentra libre de los analitos de interés y la cual se procesa simultáneamente con y bajo las mismas condiciones que las muestras, a través de todas las etapas del método utilizado e incorporando todos los reactivos usados en el procesamiento de las muestras.

- Blanco de reactivos

Los reactivos utilizados durante el proceso analítico (incluyendo disolventes utilizados para extracción o disolución) se analizan para determinar si contribuyen a la señal de la medida.

- Cadena de custodia

Documento donde los responsables registran la información sobre la obtención de muestras, su transporte y entrega de éstas al laboratorio para la realización de pruebas o de mediciones analíticas, según corresponda.

- Calibración

Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

Nota 1: Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

Nota 2: Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medida, a menudo llamado incorrectamente “auto calibración”, ni con una verificación de la calibración.

Nota 3: Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

- Condición de funcionamiento de referencia

Condición de referencia

Condición de funcionamiento prescrita para evaluar las prestaciones de un instrumento o sistema de medida o para comparar resultados de medida.

Nota 1: Las condiciones de referencia especifican intervalos de valores del mensurando y de las magnitudes de influencia.

Nota 2: En la IEC 60050-300, nº 311-06-02, el término “condición de referencia” designa una condición de funcionamiento en la cual la incertidumbre instrumental especificada es la menor posible.

- Condición de reproducibilidad de una medición

Condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares.

Nota 1: Los diferentes sistemas de medición pueden utilizar diferentes procedimientos de medida.

Nota 2: En la práctica, conviene que toda especificación relativa a las condiciones incluya las condiciones que varían y las que no.

- Curva de calibración

Expresión de la relación entre una indicación y el valor medido correspondiente.

Nota: Una curva de calibración expresa una relación biunívoca, que no proporciona un resultado de medida, ya que no contiene información alguna sobre la incertidumbre de medida.

- Desviación estándar relativa

Una estimación de la desviación estándar de una población obtenida a partir de una muestra (estadística) de n resultados dividida por la media de esa muestra.

- Envase

Recipiente destinado a contener y conservar la integridad física y química de las muestras de suelo colectadas.

- Error sistemático de medida

Error sistemático: Componente del error de medida que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible.

Nota 1: El valor de referencia para un error sistemático es un valor verdadero, un valor medido de un patrón cuya incertidumbre de medida es despreciable, o un valor convencional de una magnitud.

Nota 2: El error sistemático y sus causas pueden ser conocidas o no. Para compensar un error sistemático conocido puede aplicarse una corrección.

Nota 3: El error sistemático es igual a la diferencia entre el error de medida y el error aleatorio.

- Especificidad o selectividad

El grado en el que un método puede ser utilizado para determinar analitos particulares en mezclas o matrices, sin interferencias de otros componentes de comportamiento similar.

- Estándares de medición

Se usa para describir un estándar químico o físico utilizado para propósitos de calibración o validación, tales como: compuestos químicos de pureza conocida y sus soluciones correspondientes de concentración conocida; filtros de UV; pesas; etc. Los Materiales de Referencia Certificados son una importante categoría de estándares de medición.

- Exactitud de medida

Exactitud: Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando.

Nota 1: El concepto “exactitud de medida” no es una magnitud y no se expresa numéricamente. Se dice que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de medida.

Nota 2: El término “exactitud de medida” no debe utilizarse en lugar de “veracidad de medida”. Al igual que el término “precisión de medida” tampoco debe utilizarse en lugar de “exactitud de medida”, ya que esta última incluye ambos conceptos.

Nota 3: La exactitud de medida se interpreta a veces como la proximidad entre los valores medidos atribuidos al mensurando.

- Horizontes

Capas distinguibles del suelo que se observan a diferentes profundidades, producidas por los procesos físicos y/o químicos y/o biológicos a los que está sujeto.

- Incertidumbre de medida

Incertidumbre: Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.

Nota 1: La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos. Estas componentes incluyen aquellas asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, tal como la incertidumbre dada su definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar, se tratan como componentes de incertidumbre.

Nota 2: El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación típica, en cuyo caso se denomina incertidumbre típica de medida (o un múltiplo de ella), o la semiamplitud de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada.

Nota 3: En general, la incertidumbre de medida incluye numerosos componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

Nota 4: En general, para una información dada, se sobreentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

- Instrumento de medida

Dispositivo utilizado para realizar mediciones, solo o asociado a uno o varios dispositivos suplementarios.

Nota 1: Un instrumento de medida que puede utilizarse individualmente es un sistema de medida.

Nota 2: Un instrumento de medida puede ser un instrumento indicador o una medida materializada.

- Libreta de campo

Cuaderno en el cual se registran los datos y las actividades relacionadas con la toma de muestras.

- Límite de detección

Valor medido, obtenido mediante un procedimiento de medida dado, con una probabilidad β de declarar erróneamente la ausencia de un constituyente en un material, dada una probabilidad α de declarar erróneamente su presencia.

Nota 1: La IUPAC recomienda por defecto los valores de α y β iguales a 0.05.

Nota 2: En inglés, algunas veces se usa la abreviatura LOD.

Nota 3: No debe utilizarse el término “sensibilidad” en lugar de “límite de detección”.

- Material de referencia (MR)

Material suficientemente homogéneo y estable con respecto a propiedades especificadas, establecido como apto para su uso previsto en una medición o en un examen de propiedades cualitativas.

Nota 1: El examen de una propiedad cualitativa comprende la asignación de un valor a dicha propiedad y de una incertidumbre asociada. Esta incertidumbre no es una incertidumbre de medida.

Nota 2: Los materiales de referencia con o sin valores asignados pueden servir para controlar la precisión de la medida. Mientras que únicamente los materiales con valores asignados pueden utilizarse para la calibración o control de la veracidad de medida.

Nota 3: Los materiales de referencia comprenden materiales que representan tanto magnitudes como propiedades cualitativas.

- Material de referencia certificado (MRC)

Material de referencia acompañado por la documentación emitida por un organismo autorizado, que proporciona uno o varios valores de propiedades especificadas, con incertidumbres y trazabilidades asociadas, empleando procedimientos válidos.

- Medición

Medida: Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.

Nota 1: Las mediciones no son de aplicación a las propiedades cualitativas.

Nota 2: Una medición supone una comparación de magnitudes o el conteo de entidades.

Nota 3: Una medición supone una descripción de la magnitud compatible con el uso previsto de un resultado de medida, un procedimiento de medida y un sistema de medida calibrado conforme a un procedimiento de medida especificado, incluyendo las condiciones de medida.

- Mensurando

Magnitud que se desea medir.

Nota 1: La especificación de un mensurando requiere el conocimiento de la naturaleza de la magnitud y la descripción del estado del fenómeno, cuerpo o sustancia cuya magnitud es una propiedad, incluyendo las componentes pertinentes y las entidades químicas involucradas.

Nota 2: En la segunda edición del VIM y en IEC 60050-300:2001, el mensurando está definido como “magnitud particular sujeta a medición”.

Nota 3: La medición, incluyendo el sistema de medida y las condiciones bajo las cuales se realiza ésta, podría alterar el fenómeno, cuerpo o sustancia, de tal forma que la magnitud bajo medición difiriera del mensurando. En este caso, sería necesario efectuar la corrección apropiada.

Nota 4: En química la “sustancia a analizar”, el analito, o el nombre de la sustancia o compuesto, se emplean algunas veces en el lugar de “mensurando”. Esta práctica es errónea debido a que esos términos no se refieren a magnitudes.

- Método de medida

Descripción genérica de la secuencia lógica de operaciones utilizadas en una medición.

Nota: Los métodos de medida pueden clasificarse de varias maneras como:

- Método de sustitución,
- Método diferencial,
- Método de cero,
- Método directo,
- Método indirecto.

- Muestras de control de calidad

Las muestras de control de calidad son muestras típicas que son lo suficientemente estables y homogéneas, y están disponibles en cantidad suficiente, para permitir su análisis repetido a lo largo del tiempo.

- Muestra simple

Material colectado en un punto de muestreo.

- Muestra compuesta

La que resulta de mezclar un número de muestras simples. La cantidad de cada una de las muestras simples debe ser en la misma proporción.

- Patrón de medida

Patrón: Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia.

- Patrón de medida de referencia

Patrón de referencia: Patrón designado para la calibración de otros patrones de magnitudes de la misma naturaleza en una organización o lugar dado.

- Patrón nacional de medida

Patrón nacional: Patrón reconocido por una autoridad nacional para servir, en un estado o economía, como base para la asignación de valores a otros patrones de magnitudes de la misma naturaleza.

- Patrón primario de medida

Patrón primario: Patrón establecido mediante un procedimiento de medida primario o creado como un objeto, elegido por convenio.

- Perfil de suelo

Sección vertical del terreno que permite identificar los horizontes en el suelo a partir de la superficie, los cuales forman una serie de estratos con propiedades diferentes.

- Plan de muestreo

Documento que contiene la información y programación relacionada con cada una de las etapas que conforman el muestreo y señala los criterios para la toma de muestras.

- Precisión de medida

Precisión: Proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.

Nota 1: Es habitual que la precisión de una medida se exprese numéricamente mediante medidas de dispersión tales como la desviación típica, la varianza o el coeficiente de variación, bajo las condiciones especificadas.

Nota 2: Las “condiciones especificadas” pueden ser condiciones de repetibilidad, condiciones de precisión intermedia, o condiciones de reproducibilidad (véase la norma ISO 5725-1:1994).

Nota 3: La precisión se utiliza para definir la repetibilidad de medida, la precisión intermedia y la reproducibilidad.

Nota 4: Con frecuencia, “precisión de medida” se utiliza, erróneamente, en lugar de “exactitud de medida”.

- Prueba inicial de desempeño (PID)

Se debe realizar al iniciar la implementación de un método y sirve para verificar el desempeño de un laboratorio. La PID debe realizarse para cada método y para cada analista e instrumento. Cuando se emplee más de un procedimiento de preparación de muestra, debe realizarse la PID para cada uno de éstos. Para con ello, tomar en cuenta la variabilidad que cada uno introduce en el resultado. La PID debe ser repetida en el caso de un cambio de analista, de instrumento y evidentemente, si se lleva a cabo una modificación en el método. Cualquier cambio, por pequeño que sea, debe disparar acciones tendientes a evaluar y corregir precisión, exactitud y sensibilidad del procedimiento.

- Pozo

Perforación o excavación en el suelo para la identificación de su perfil y la toma de muestras del suelo.

- Punto de muestreo

Lugar específico donde se toma una o varias muestras, ya sean superficiales o verticales.

- Repetibilidad de medida

Repetibilidad: Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad.

- Reproducibilidad de medida

Reproducibilidad: Precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de reproducibilidad.

- Resultado de medida

Resultado de una medición: Conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

Nota 1: Un resultado de medida contiene generalmente información relevante sobre el conjunto de valores de una magnitud. Algunos de ellos representan el mensurando mejor que otros. Esto puede representarse como una función de densidad de probabilidad (FDP).

Nota 2: El resultado de una medición se expresa generalmente como un valor medido único y una incertidumbre de medida. Si la incertidumbre de medida se considera despreciable para un determinado fin, el resultado de medida puede expresarse como un único valor medido de la magnitud. En muchos campos ésta es la forma habitual de expresar el resultado de medida.

Nota 3: En la bibliografía tradicional y en la edición precedente del VIM, el término resultado de medida estaba definido como un valor atribuido al mensurando y podía entenderse como indicación, resultado no corregido o resultado corregido, según el contexto.

- Sensibilidad de un sistema de medida

Sensibilidad: Cociente entre la variación de una indicación de un sistema de medida y la variación correspondiente del valor de la magnitud medida.

Nota 1: La sensibilidad puede depender del valor de la magnitud medida.

Nota 2: La variación del valor de la magnitud medida debe ser grande en comparación con la resolución.

- Sesgo de medida

Sesgo: Valor estimado de un error sistemático.

- Suelo

Material no consolidado, de origen natural, compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que incluye aquél alterado por actividades antropogénicas.

- Suelo expuesto

Suelo que no está cubierto por concreto, asfalto o materiales similares no naturales.

- Textura del suelo

Es la proporción relativa de los diferentes tamaños de partículas minerales (grava, arena, limo, arcilla) en un suelo.

- Trazabilidad metrológica a una unidad de medida

Trazabilidad metrológica a una unidad: Trazabilidad metrológica en la que la referencia es la definición de una unidad de medida mediante su realización práctica.

Nota 1: La expresión “trazabilidad al SI” significa trazabilidad metrológica a una unidad de medida del Sistema Internacional de Unidades.

Validación

Verificación de que los requisitos especificados son adecuados para un uso previsto.

Anexo 2: Medición de metales en suelos, lodos y sedimentos mediante espectrometría de masas acoplado inductivamente (ICP-MS)

EQUIPOS Y MATERIALES

Balanza analítica marca ADAM, modelo PW 254.

Equipo de precisión utilizado en laboratorios para medir pequeñas cantidades de masa con exactitud de hasta 0.0001 g (0.1 mg). Estas balanzas están diseñadas con una cámara de pesaje cerrada para evitar las interferencias de corrientes de aire o cambios ambientales, lo que asegura mediciones estables y precisas.

Es ideal para aplicaciones que requieren mediciones exactas, como el análisis de muestras en química, farmacéutica, biología y control de calidad.

Horno de microondas analítico marca CEM, modelo MARS 6.

Es un equipo avanzado utilizado en laboratorios para la digestión de muestras, lo que permite preparar muestras sólidas o líquidas para análisis químicos, como ICP-MS o ICP-OES. Utiliza energía de microondas para calentar de manera rápida y uniforme las muestras en recipientes de alta presión, facilitando la disolución de materiales resistentes en ácidos.

Es ampliamente utilizado en análisis ambiental, agroquímico, farmacéutico y de alimentos, donde se requiere la preparación de muestras difíciles de disolver antes de su análisis.

Sistema de purificación de agua marca Millipore, modelo Advantage A10 R system y dispensador Q-Pod.

Está diseñado para producir agua ultrapura de alta calidad, utilizada principalmente en laboratorios para aplicaciones científicas y analíticas que requieren agua libre de impurezas, como la preparación de reactivos, soluciones o análisis sensibles.

Es esencial en biología molecular, análisis químico y otras áreas donde la pureza del agua es crítica para obtener resultados precisos y reproducibles.

Espectrómetro de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) marca Thermo Scientific, modelo iCAP con automuestreador y recirculador.

El ICP-MS es un equipo analítico de alta precisión utilizado para detectar y cuantificar trazas de elementos en muestras con una sensibilidad extremadamente alta, capaz de llegar a concentraciones en el rango de partes por billón (ppb) o partes por trillón (ppt).

Se utiliza comúnmente en análisis de calidad de agua, monitoreo de contaminación ambiental, estudios de salud, geología y control de calidad en la industria farmacéutica y alimentaria.

Materiales

- Matraces volumétricos de 50 mL.
- Micropipetas de volumen variable.
- Papel filtro grado 41 o equivalente libre de cenizas para análisis de metales.
- Embudos de filtración.
- Navecillas de plástico.
- Espátula de plástico o material inoxidable

REACTIVOS, DISOLUCIONES Y MATERIALES DE REFERENCIA.

Para el caso de las disoluciones estándar, estas se pueden preparar a partir de sales que contengan a los metales de interés, o bien se puede usar una disolución comercial, siempre y cuando sea trazable a patrones nacionales o internacionales.

Reactivos

- Agua libre de interferencias para los analitos de interés, estando en concentraciones menores al límite de detección del método.
- Ácido nítrico (HNO_3) concentrado para análisis de metales traza.
- Gas argón grado ultrapuro (99.999%).

Disoluciones

- Disolución estándar multielemental de 1,000 ppb. En un matraz volumétrico de 50 mL agregar con micropipeta 0.5 mL de la disolución estándar de paladio y platino de 100 mg /L. Enseguida agregar 1 mL de ácido nítrico y aforar con agua grado reactivo.
- Disolución estándar de verificación de la calibración. En un matraz volumétrico de 50 mL agregar con micropipeta 1 mL de la disolución intermedia multielemental de 1,000 ppb. Enseguida agregar 0.5 mL de ácido nítrico. Llevar al aforo con agua grado reactivo.
- Disolución de estándar interno de 20 µg/L.

Materiales de referencia

- Disolución estándar multielemental con los siguientes analitos Ag, Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Se, Sb, Ti, Tl, V, Zn.
- Disolución estándar de verificación de la calibración. En un matraz volumétrico de 50 mL, agregar con micropipeta una alícuota de la disolución estándar multielemental. Enseguida agregar 1 mL de ácido nítrico y aforar con agua reactivo.
- Disolución de estándar interno para ICP-MS con los siguientes elementos Bi, Rh, Ho, Sc, In, Tb, ⁶Li, Y, Lu de 10 µg/mL.

Control de calidad

Previo al análisis, se requiere tener o preparar una disolución de ajuste del ICP-MS, la cual contiene elementos que representen las regiones de interés de las masas. Dicha disolución se analiza y sirve para comprobar que la resolución y la calibración de masas del instrumento cumplen con las especificaciones y que el equipo se encuentra en condiciones para ser usado. Se debe consultar el manual del instrumento y/o las especificaciones del fabricante para conocer los elementos y concentraciones que deben ser empleadas.

Durante el análisis debe realizarse la lectura de la disolución estándar de verificación de la calibración cada 10 muestras y al final del lote analítico.

Si la verificación está fuera de los criterios de aceptación, los estándares deben prepararse nuevamente y recalibrar el instrumento. Si se hubiesen analizado muestras, estas deben ser reanalizadas.

Por su parte, los controles de calidad deben ser analizados y cumplir con los criterios de aceptación establecidos con las pruebas iniciales de desempeño y son los siguientes:

Blanco de reactivos sin digerir, blanco de reactivos digerido, blanco de método digerido, muestra control y muestra duplicada.

Calibración

1. Los isótopos empleados para llevar a cabo dicha calibración y análisis se describen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Isótopos empleados.

Elemento de interés	Masa del isótopo
Ag – plata	107, 109
As – arsénico	75
Be – berilio	9
Cd – cadmio	114, 112, 111, 110, 113, 116, 106
Co – cobalto	59
Cr – cromo	52, 53, 50, 54
Cu – cobre	63, 65
Mn – manganeso	55
Mo – molibdeno	98, 95, 96, 92, 97, 94
Ni – níquel	58, 60, 62, 61, 64
Sb – antimonio	121, 123
Ti – titanio	48
V – vanadio	51, 50

2. Las disoluciones estándar de calibración deben ser preparadas a partir de la disolución intermedia, cada que se trabaja, dependiendo de la estabilidad de los elementos.
3. La curva de calibración se prepara de acuerdo con la validación del método.
4. La curva de calibración debe analizarse cada que se use el equipo para el análisis de lotes analíticos.
5. La curva de calibración debe tener como mínimo 5 puntos de concentración más el blanco de reactivos.

6. El intervalo de trabajo de la curva de calibración debe corresponder a los intervalos lineales establecidos en la confirmación del método y el coeficiente de correlación debe cumplir con ≥ 0.995 .
7. Los niveles recomendados para el presente procedimiento se describen en la siguiente tabla:

Tabla 2. Curva de calibración.

CURVA DE CALIBRACIÓN	
Identificación	Concentración ($\mu\text{g/L}$)
Blanco	0
Disolución de calibración 1	5
Disolución de calibración 2	10
Disolución de calibración 3	20
Disolución de calibración 4	40

Procedimiento

Digestión de la muestra

1. Sacar las muestras de refrigeración y atemperar en campana de extracción.
2. Encender y verificar la balanza analítica de acuerdo con su respectivo instructivo.
3. Presionar el auto-cero en la balanza.
4. Colocar la navecilla de plástico en la balanza y volver a presionar el auto-cero.
5. Pesar en la navecilla aproximadamente 0.5 g de muestra y registrar el peso en la bitácora correspondiente.
6. Trasvasar de manera cuantitativa (evitando pérdidas de muestra) la muestra de la navecilla al tubo de digestión ayudándose de una espátula.
7. Adicionar 10 mL de ácido nítrico al tubo de digestión.
8. Tapar el tubo de digestión y colocarlo correctamente en el horno de microondas analítico (de acuerdo con su respectivo instructivo). Repetir para cada una de las muestras.

9. Una vez terminado el pesaje de las muestras, apagar y limpiar la balanza.
10. Encender el horno de microondas.
11. Digerir las muestras usando el programa de la siguiente tabla:

Tabla 3. Programa de digestión de suelos, lodos y sedimentos.

PROGRAMA DE DIGESTIÓN DE SUELOS, LODOS Y SEDIMENTOS				
Paso	Temperatura (°C)	Rampa (minutos)	Mantener Temperatura (minutos)	Enfriamiento (minutos)
1	175	5.5	4.5	NA
2	NA	NA	NA	10

12. Una vez terminado el programa de digestión, apagar el horno de microondas.
13. Sacar los tubos de digestión del horno de microondas y colocarlos en una campana de extracción. Esperar hasta que se encuentren a temperatura ambiente.
14. Vентear cada tubo de digestión al abrir ligeramente (dejar venteando por unos 30 segundos) y después destapar con cuidado en la campana de extracción, siempre apuntando los tubos hacia la campana.
15. Colocar en soportes embudos de filtración de plástico, sobre los cuales se pondrán papeles filtro grado 41 o similar libre de cenizas.
16. Filtrar cada muestra digerida a través del papel filtro grado 41 o similar libre de cenizas. Enjuagar tres veces el tubo de digestión con aproximadamente 5 mL agua grado reactivo para asegurar el trasvase total de la muestra.
17. Recibir el filtrado y los enjuagues de cada muestra en un matraz volumétrico de 50 mL identificado inequívocamente.
18. Llevar al aforo con agua reactivo los matraces de 50 mL que contienen las muestras digeridas.
19. Transferir las muestras de cada matraz de 50 mL a recipientes adecuados para su almacenamiento. Mantener en refrigeración hasta su análisis.

1. Es importante enjuagar el sistema entre cada estándar y muestra utilizando una disolución de lavado (disolución de ácido nítrico en agua al 2%). El tiempo de enjuague debe ser suficiente para garantizar que los analitos se limpien del sistema antes del análisis de la muestra posterior.
2. Sacar las muestras, disoluciones estándar y muestras control y dejar atemperar en campana de extracción.
3. Preparar curva de calibración y registrar en la respectiva bitácora.
4. Encender y acondicionar el instrumento y todos los aditamentos de acuerdo con las indicaciones del fabricante.
5. Esperar al menos 30 minutos para que el instrumento se estabilice.
6. Analizar la disolución de ajuste del ICP-MS siguiendo las instrucciones del manual del equipo y/o especificaciones del fabricante.
7. El estándar interno se incorpora al sistema con una tercera línea de la bomba peristáltica y se mezcla con la línea de toma de muestra mediante una T. De tal forma que se mantenga una concentración de 20 µg/L durante el análisis.
8. Calibrar el instrumento.
9. Analizar las muestras siguiendo la siguiente secuencia:
 - 9.1. Blanco de reactivos.
 - 9.2. Curva de calibración.
 - 9.3. Blanco de reactivos sin digerir.
 - 9.4. Blanco de reactivos digerido.
 - 9.5. Blanco de matriz digerida.
 - 9.6. Muestra control.
 - 9.7. Blanco de matriz digerida adicionada.
 - 9.8. Lote de muestras.
 - 9.9. Blanco de reactivos.
 - 9.10. Verificación de la calibración.
 - 9.11. Blanco de reactivos.
10. Se debe realizar la verificación de la calibración, lo cual se hará con el estándar de verificación de la calibración, que se analizará cada diez muestras y al final de la secuencia.

11. En caso de que una muestra tenga una concentración por encima del intervalo de la curva de calibración, se debe analizar una dilución de la muestra, tratando que la concentración de la muestra diluida se encuentre a la mitad de la curva de calibración.
12. Al finalizar el análisis, limpiar el sistema de introducción de muestra con la disolución de lavado por al menos cinco minutos. Después dejar pasar aire por otros cinco minutos.
13. Apagar el equipo y todos los aditamentos.
14. Registrar el uso del equipo y el análisis en la respectiva bitácora.
15. Limpiar los aditamentos o consumibles que así lo requieran de acuerdo con el manual o instructivo del equipo, o bien de acuerdo a las indicaciones del fabricante.
16. Imprimir los resultados (incluidas las curvas de calibración) obtenidos y hacer los cálculos correspondientes.

Cálculos

La concentración y la intensidad de la emisión del elemento (cps) se encuentra directamente relacionada y representada por la gráfica de una recta.

El instrumento realiza la interpolación de las intensidades de emisión de las muestras en la gráfica de calibración en forma automática y proporciona el valor de la concentración para la muestra en las unidades de la calibración.

Para realizar el ajuste de los metales analizados con el estándar interno se utiliza la siguiente ecuación:

$$CCM = (CM) * (CSI / CPSI)$$

Donde:

CCM= Cuentas corregidas del metal.

CM= Cuentas del metal que genera el equipo.

CSI= Concentración del estándar interno

CPSI= Cuentas del estándar interno que genera el equipo

Una vez que se tienen las cuentas corregidas del metal, dichos valores se introducen en el formato F-PTA-11-01 para obtener las concentraciones en las unidades de calibración.

Cálculo de concentración para reportar en µg/Kg:

$$Concentración = \frac{(C)(V)(D)}{(W)}$$

Donde:

C = Concentración de la muestra ($\mu\text{g/L}$) obtenida con la curva de calibración.

V = Volumen de aforo en Litros.

D = Factor de dilución

W = Peso de la muestra en gramos.

Anexo 3: Medición de metales en suelos, lodos y sedimentos por Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)

EQUIPOS Y MATERIALES

Espectrómetro de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) marca Thermo Scientific, modelo iCAP 6500 DUO con automuestreador y recirculador.

El ICP-OES (Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente) es un equipo analítico que permite la detección y cuantificación de elementos en muestras mediante la emisión de luz a partir de un plasma de argón. Se utiliza para analizar una amplia gama de elementos simultáneamente con rapidez y precisión.

Tiene la capacidad de análisis rápido, facilidad de uso y costos operativos más bajos en comparación con técnicas más avanzadas como el ICP-MS.

Los siguientes equipos (mencionados previamente en el Anexo 2), también son utilizados en este método de análisis:

- Balanza analítica marca ADAM, modelo PW 254.
- Horno de microondas analítico marca CEM, modelo MARS 6.
- Sistema de purificación de agua marca Millipore, modelo Advantage A10 R system y dispensador Q-Pod.

Materiales

- Matraces volumétricos de 50 mL.
- Micropipetas de volumen variable.
- Papel filtro grado 41 o equivalente libre de cenizas para análisis de metales.
- Embudos de filtración.

- Navecillas de plástico.
- Espátula de plástico o material inoxidable

REACTIVOS, DISOLUCIONES Y MATERIALES DE REFERENCIA.

Para el caso de las disoluciones estándar, estas se pueden preparar a partir de sales que contengan a los metales de interés, o bien se puede usar una disolución comercial, siempre y cuando sea trazable a patrones nacionales o internacionales.

Reactivos

- Agua libre de interferencias para los analitos de interés, estando en concentraciones menores al límite de detección del método.
- Ácido nítrico (HNO_3) concentrado para análisis de metales traza.
- Gas argón grado ultrapuro (99.999%).

Disoluciones

- No aplica.

Materiales de referencia

- Disolución estándar multielemental con los siguientes analitos Ag, Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Se, Sb, Ti, Tl, V, Zn con concentración de 100 mg/mL.
- Disolución estándar de verificación de la calibración. En un matraz volumétrico de 50 mL, agregar con micropipeta una alícuota de la disolución estándar multielemental. Enseguida agregar 1 mL de ácido nítrico y aforar con agua reactivo.

Control de calidad

Durante el análisis debe realizarse la lectura de la disolución estándar de verificación de la calibración cada 10 muestras y al final del lote analítico.

Si la verificación está fuera de los criterios de aceptación, los estándares deben prepararse nuevamente y recalibrar el instrumento. Si se hubiesen analizado muestras, estas deben ser reanalizadas.

Por su parte, los controles de calidad deben ser analizados y cumplir con los criterios de aceptación establecidos con las pruebas iniciales de desempeño y son los siguientes:

Blanco de reactivos sin digerir, blanco de reactivos digerido, blanco de método digerido, muestra control y muestra duplicada.

Calibración

Las disoluciones estándar de calibración deben ser preparadas a partir de la disolución estándar multielemental, cada que se trabaja, dependiendo de la estabilidad de los elementos.

La curva de calibración se prepara de acuerdo con la validación del método.

La curva de calibración debe analizarse cada que se use el equipo para el análisis de lotes analíticos.

La curva de calibración debe tener como mínimo 3 puntos de concentración más el blanco de reactivos.

El intervalo de trabajo de la curva de calibración debe corresponder a los intervalos lineales establecidos en la confirmación del método y el coeficiente de correlación debe cumplir con ≥ 0.995 .

Curva de calibración	
Identificación	Concentración (mg/L)
Blanco	0
Disolución de calibración 1	0.25
Disolución de calibración 2	0.5
Disolución de calibración 3	1
Disolución de calibración 4	2.5

Procedimiento y análisis

El procedimiento y análisis a realizar para este equipo, es el mismo que el del equipo ICPMS; consultar el Anexo II.

Cálculos

La concentración y la intensidad de la emisión del elemento (cps) se encuentra directamente relacionada y representada por la gráfica de una recta.

El instrumento realiza la interpolación de las intensidades de emisión de las muestras en la gráfica de calibración en forma automática y proporciona el valor de la concentración para la muestra en las unidades de la calibración.

Cálculo de concentración en mg/Kg:

$$\text{Concentración} = \frac{(C)(V)(D)}{(W)}$$

Donde:

C = Concentración de la muestra (µg/L) obtenida con la curva de calibración.

V = Volumen de aforo en Litros.

D = Factor de dilución

W = Peso de la muestra en gramos.

Anexo 4: Fichas técnicas de las especies seleccionadas para la remoción de metales

Populus fremontii (Álamo)

- **Nombre común:** Álamo de Fremont
- **Familia:** Salicaceae
- **Forma de vida:** Árbol caducifolio de ribera
- **Altura promedio:** 10–20 m
- **Distribución:** Zonas ribereñas del suroeste de EE.UU. y norte de México
- **Tipo de suelo:** Prefiere suelos franco-arenosos, bien drenados, con humedad media-alta.
- **Tolerancia a contaminantes:** Alta; se ha documentado su capacidad para absorber y estabilizar metales como Cu, Zn y Pb (Pulford & Watson, 2003).
- **Propagación:** Reproducción por estacas, esquejes o semilla
- **Funciones ecológicas:**
 - Estabilización de cauces
 - Sombreamiento de cuerpos de agua
 - Captura de sedimentos

- **Consideraciones para revegetación:** Ideal para zonas con presencia de humedad residual o escurrimiento intermitente. Se recomienda su uso en bordes del río Sonora con sombra parcial.

Salix gooddingii (Sauce)

- **Nombre común:** Sauce de Goodding
- **Familia:** Salicaceae
- **Forma de vida:** Árbol caducifolio de rápido crecimiento
- **Altura promedio:** 5–15 m
- **Distribución:** Ripisilvas del norte de México y suroeste de EE.UU.
- **Tipo de suelo:** Margas húmedas, franco-limosas, ocasionalmente anegadas
- **Tolerancia a contaminantes:** Muy alta; útil para fitoestabilización de metales pesados (Ali et al., 2013)
- **Propagación:** Estacas de tallo, rebrotes
- **Funciones ecológicas:**
 - Filtración natural y depuración de agua
 - Protección contra erosión
 - Hábitat para fauna silvestre

- **Consideraciones para revegetación:** Altamente recomendado para áreas con flujo de agua estacional. Puede plantarse en combinación con álamos para formar corredores riparios mixtos.

Prosopis spp. (Mezquite)

- **Nombre común:** Mezquite
- **Familia:** Fabaceae
- **Forma de vida:** Árbol o arbusto caducifolio
- **Altura promedio:** 4–10 m
- **Distribución:** Regiones semiáridas y desérticas de México
- **Tipo de suelo:** Muy tolerante; puede desarrollarse en suelos pobres, salinos o con baja humedad
- **Tolerancia a contaminantes:** Alta; útil para recuperación de suelos degradados (UNAM, 2016)
- **Propagación:** Por semilla (escarificación previa necesaria)
- **Funciones ecológicas:**
 - Fijación de nitrógeno atmosférico
 - Cobertura contra erosión
 - Sombra y forraje para fauna
- **Consideraciones para revegetación:** Ideal para terrazas agrícolas degradadas y bordes altos del cauce. No requiere riego constante, útil en revegetación pasiva.

Opuntia spp. (Nopal)

- **Nombre común:** Nopal
- **Familia:** Cactaceae
- **Forma de vida:** Planta suculenta arbustiva
- **Altura promedio:** 1–3 m
- **Distribución:** Ampliamente distribuida en zonas áridas de México
- **Tipo de suelo:** Muy adaptable; se desarrolla en suelos pedregosos, arenosos o calcáreos
- **Tolerancia a contaminantes:** Moderada; se han reportado especies con acumulación de metales en sitios mineros (FAO/IAEA, 2001)
- **Propagación:** Cladodios (pencas) o semillas
- **Funciones ecológicas:**
 - Cobertura de suelos expuestos
 - Control de erosión
 - Uso alimenticio y forrajero

Consideraciones para revegetación: Útil en zonas degradadas de bajo relieve o terrazas de secano. Se adapta fácilmente a revegetación sin riego.

Anexo fotográfico

HOJA DE CAMPO

Proyecto	Campaña de caracterización de matrices y metabolitos en Cananea					FOLIO:	
Fecha	06/02/22	Muestreador	UHRB		Supervisor de Muestreo	UHRB	

No.	Sitio de Muestreo	Hora	Recipiente	Cantidad de Muestra	Temperatura Ambiente	Color	Olor	Referencia Geográfica
1	San José de Gracia	15:30	Botella plástica	500g (S)	16°C	característico	característico	*
2	San José de Gracia	15:30	Botella plástica	500g (S)	16°C	característico	característico	*
3	San José de Gracia	15:30	Botella plástica	500g (SP)	16°C	característico	característico	*
4	San José de Gracia	15:30	Frasco P	500ml (A)	16°C	característico	característico	*
5	San José de Gracia	15:30	Botella plástica	100g (B)	16°C	característico	característico	*
6	Ures	16:00	Botella plástica	100g (B)	15°C	característico	característico	*
7	Ures	16:00	Frasco P	500ml (D)	15°C	característico	característico	*
8	Ures	16:00	Botella plástica	100g (D)	15°C	característico	característico	*
9	Ures	16:00	Frasco P	20g (C)	15°C	característico	característico	*
10	Ures	16:00	Botella plástica	100g (B)	15°C	característico	característico	*

Contenedor: P: Plástico, V: Vidrio O: Otro

Observaciones: * la referencia geográfica se anexará al reporte de muestreo

Imagen 36: Primer hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ESTADÍSTICA Y
GEOGRAFÍA

HOJA DE CAMPO

Proyecto	Campaña contra de contaminación de ambientes y metabolismos en Cananea			FOLIO:	
Fecha	06/02/12	Muestreador	VHPS	Supervisor de Muestreo	VHPS

No.	Sitio de Muestreo	Hora	Recipiente	Cantidad de Muestra	Temperatura Ambiente	Color	Olor	Referencia Geográfica
11	Ures	16:00	Bolsa P	100g (Q)	15°C	Característico	Característico	✓
12	Ures	16:00	Bolsa P	100g (Q)	15°C	Característico	Característico	✗
13	Ures	16:00	Bolsa P	100g (Q)	15°C	Característico	Característico	✗
14	Batallas	17:45	Bolsa P	500ml (A)	14°C	Característico	Característico	✗
15	Batallas	17:45	Bolsa P	500g (S)	14°C	Característico	Característico	✗
16	Batallas	17:45	Bolsa P	500g (S)	14°C	Característico	Característico	✗
17	Batallas	17:45	Bolsa P	500g (S)	14°C	Característico	Característico	✗
18	Arandí	18:30	Bolsa P	500ml (A)	13°C	Característico	Característico	✗
19	Arandí	18:30	Bolsa P	500g (S)	13°C	Característico	Característico	✗
20	Arandí	18:30	Bolsa P	500g (S)	13°C	Característico	Característico	✗

Contenedor: P: Plástico, V: Vidrio O: Otro

Observaciones ✗ En el terreno geográfico se anexaron al reporte de muestreo

Imagen 37: Segunda hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).

HOJA DE CAMPO

[illegible]

Imagen 38: Tercer hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).



HOJA DE CAMPO

Proyecto	Campaña de caracterización de suelos y actividades en Cananea			FOLIO:	
Fecha	07/02/22	Muestreador	UHRS	Supervisor de Muestreo	UHRS

No.	Sitio de Muestreo	Hora	Recipiente	Cantidad de Muestra	Temperatura Ambiente	Color	Olor	Referencia Geográfica
22	Bucacaschi	12:50	Bolsa P	500 g (S)	17°C	característico suelo	característico suelo	x
23	Bucacaschi	12:50	Bolsa P	500 g (S)	17°C	característico suelo	característico suelo	x
24	Bucacaschi	12:50	Bolsa P	500 g ml (A)	17°C	característico suelo	característico suelo	x
25	Ancipe	13:35	Bolsa P	200 g (B)	17°C	característico suelo	característico suelo	x
26	Ancipe	13:35	Bolsa P	500 g (S)	17°C	característico suelo	característico suelo	x
27	Ancipe	13:35	Bolsa P	500 g (S)	17°C	característico suelo	característico suelo	x
28	Ancipe	13:35	Frasco P	x 500 ml (B)	17°C	característico suelo	característico suelo	x
29	Banamichi	14:46	Frasco P	500 ml (A)	18°C	característico suelo	característico suelo	x
30	Banamichi	14:46	Frasco P	500 g (S)	18°C	característico suelo	característico suelo	x
31	Banamichi	14:46	Bolsa P	500 g (S)	18°C	característico suelo	característico suelo	x

Contenedor: P: Plástico, V: Vidrio O: Otro

Observaciones	x la referencia geográfica se anexa al reporte del muestreo

Imagen 39: Cuarta hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).

HOJA DE CAMPO

Proyecto	Comparativa entre la caracterización de metales y metaloides en comarcas				FOLIO:	
Fecha	07/02/22	Muestreador	UHR	Supervisor de Muestreo	UHR	

[illegible]

Contenedor: P: Plástico, V: Vidrio O: Otro

Observaciones $\times$ la referencia geográfica de manera al reporte final

Imagen 40: Quinta hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).



HOJA DE CAMPO

Proyecto	Campaña corta de caracterización de suelos y metales pesados en Cananea			FOLIO:	
Fecha	08/02/22	Muestreador	UHP	Supervisor de Muestreo	UHP

No.	Sitio de Muestreo	Hora	Recipiente	Cantidad de Muestra	Temperatura Ambiente	Color	Olor	Referencia Geográfica
35	Hospital gral. Cananea	8:30	Bolsa (P)	500 g (S)	10°C	característico suelo	característico suelo	x
36	Hospital gral. Cananea	8:30	Bolsa (P)	500 g (S)	10°C	característico suelo	característico suelo	x
37	Hospital gral. Cananea	8:30	Bolsa (P)	500 g (P)	10°C	característico suelo	característico suelo	x
38	Parque DIF	9:00	Bolsa (P)	500 g (P)	10°C	característico suelo	característico suelo	x
39	Hacienda Manteco	9:20	Bolsa (P)	500 g (P)	10°C	característico suelo	característico suelo	x
40	Hacienda Manteco	9:50	Bolsa (P)	500 g (S)	10°C	característico suelo	característico suelo	x
41	Hacienda Manteco	9:50	Bolsa (P)	500 g (S)	10°C	característico suelo	característico suelo	x
42	Hacienda Manteco	9:50	Bolsa (P)	500 g (P)	10°C	característico suelo	característico suelo	x
43	Plaza Jerez	10:30	Bolsa (P)	500 g (P)	11°C	característico suelo	característico suelo	x
44	Plaza Jerez	10:30	Bolsa (P)	500 g (S)	11°C	característico suelo	característico suelo	x

Contenedor: P: Plástico, V: Vidrio, O: Otro

Observaciones	* la referencia geográfica se anexa al reporte de muestreo

Imagen 41: Sexta hoja de campo del muestreo en Cananea. Fuente: F-PTA-10 Cadena de custodia, INECC (2022).