



# **Calidad del agua superficial y potable en Cerro de Pasco y zonas aledañas**

**Informe sobre contaminación del agua • Campaña de julio de 2024**

**Provincia de Pasco, Perú**

Marzo 2026

## Resumen ejecutivo

Cerro de Pasco, una de las ciudades más altas del mundo, ha sido profundamente transformada por siglos de actividades extractivas. A lo largo del siglo XX, la expansión de las operaciones de minería a cielo abierto transformó radicalmente tanto la ciudad como su entorno, dejando como legado una contaminación ambiental generalizada. A pesar de las reiteradas declaraciones de emergencia sanitaria y ambiental, la población continúa enfrentando exposiciones crónicas y enfermedades asociadas, lo que convierte a Cerro de Pasco en un emblema contundente de injusticia ambiental vinculada a la minería.

Este informe presenta los resultados de la más reciente campaña independiente de monitoreo ambiental realizada por Source International en colaboración con el Centro de Cultura Popular Labor Y la Red Interquorum Pasco. En julio de 2024, se recolectaron 9 muestras de agua superficial de las lagunas Quiulacocha y Yanamate, del río Tingo y del río San Juan, así como 2 muestras de agua potable de la ciudad de Cerro de Pasco. Todas las muestras fueron analizadas y evaluadas en relación con la normativa peruana vigente y comparadas con campañas de monitoreo realizadas en 2022 y 2023.

Los análisis confirmaron una **contaminación generalizada de las aguas superficiales**, con 32 superaciones de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para ecosistemas acuáticos, 25 de los ECA de agua para uso agrícola, 22 de los ECA de agua para uso pecuario y 10 respecto a la normativa peruana para efluentes mineros. Las lagunas Quiulacocha y Yanamate fueron los sitios más contaminados, con concentraciones de aluminio, cadmio, hierro, manganeso, plomo, cobre, talio y zinc entre decenas y miles de veces superiores a los límites legales. Las cuencas de los ríos San Juan y Tingo también mostraron múltiples superaciones cerca de fuentes de contaminación conocidas. Aunque las tendencias temporales sugieren una disminución moderada de la contaminación en algunos sitios y para ciertos parámetros desde 2022, las concentraciones siguen siendo altas y preocupantes. **Cadmio, zinc, manganeso y la alta conductividad fueron los problemas más persistentes en todos los sitios y años considerados.**

**La calidad del agua potable es en general aceptable**, con solo una superación menor para hierro – un parámetro no directamente relacionado con la seguridad sanitaria. Este resultado es coherente con los años anteriores e indica que los sistemas municipales de abastecimiento de los distritos de San Juan y Paragsha representan actualmente un riesgo menor que las aguas superficiales.

La persistencia y magnitud de la contaminación por metales pesados en la ciudad de Cerro de Pasco y sus alrededores representan riesgos agudos para la salud humana y los ecosistemas. Cadmio y plomo – clasificados como problemas graves de salud pública por la Organización Mundial de la Salud y como carcinógenos de clase 1 y 2A por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer – permanecen en niveles críticos en las aguas superficiales. Por lo tanto, **Cerro de Pasco sigue siendo una de las zonas mineras más contaminadas del mundo**. Sin una remediación decisiva y medidas de protección más estrictas, esta contaminación continuará amenazando el bienestar de las comunidades locales y la integridad de los ecosistemas aguas abajo.

# Índice

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>4</b>
EL CONTEXTO .....	4
EL INFORME .....	5
REFERENCIA NORMATIVA.....	5
<b>SITIO Y MÉTODOS DE MUESTREO .....</b>	<b>8</b>
SITIO DE MUESTREO .....	8
CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL SITIO Y DEL AGUA.....	9
MUESTREO DE AGUA .....	9
ANÁLISIS QUÍMICOS.....	10
ANÁLISIS DE DATOS .....	10
MUESTREOS ANTERIORES.....	10
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>12</b>
PARÁMETROS GENERALES DEL AGUA .....	12
PROSPECTIVA DE METALES PESADOS EN AGUA .....	14
LAGUNA QUIULACOCHA .....	14
LAGUNA YANAMATE .....	15
RÍO TINGO .....	16
CUENCA DEL RÍO SAN JUAN .....	17
AGUA PARA CONSUMO HUMANO .....	18
<b>HALLAZGOS CLAVE .....</b>	<b>19</b>
AGUAS SUPERFICIALES .....	19
AGUAS PARA CONSUMO HUMANO .....	20
IMPLICACIONES PARA LA SALUD HUMANA Y EL MEDIO AMBIENTE .....	20
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>22</b>
<b>APÉNDICE .....</b>	<b>24</b>

# Introducción

## El contexto

Cerro de Pasco, una de las ciudades a mayor altitud en el mundo, ha estado en el centro de actividades extractivas a gran escala durante siglos. Durante el siglo XX, la expansión de la minería a cielo abierto transformó drásticamente el paisaje urbano y natural (Figura 1 y Figura 2) – desplazando barrios, drenando lagos y exponiendo vastas áreas de suelo, agua y sedimentos a la contaminación por metales pesados. Quiulacocha y Yanamate son ejemplos emblemáticos de estos impactos (Figura 2): originalmente lagunas naturales (“Quiulacocha” recibe su nombre de las gaviotas andinas que habitaban sus orillas<sup>1</sup>), desde la década de 1980 han sido utilizados como sitios de descarga de relaves sin tratamiento, lo que ha provocado la completa alteración de sus ecosistemas.

Desde 2008, Source International ha apoyado a organizaciones locales en la documentación de la **contaminación ambiental generalizada provocada por las minas de Cerro de Pasco y todas las actividades asociadas.**<sup>2-5</sup> Múltiples líneas de evidencia ponen de manifiesto la gravedad excepcional de esta contaminación. Entre ellas se incluyen, por ejemplo, el pH altamente ácido y las concentraciones extremas de metales disueltos en las lagunas – que a menudo superan en miles de veces los estándares regulatorios nacionales e internacionales. La contaminación es especialmente evidente en el suelo y en las aguas superficiales, donde se han detectado de forma constante niveles elevados de plomo, cadmio, zinc, manganeso y otros metales tóxicos.<sup>4,5</sup>

Las implicaciones para la salud son profundas. Estudios clínicos y de biomonitorio han indicado que **prácticamente todos los niños de Cerro de Pasco presentan niveles detectables de metales pesados en sangre, orina y cabello, a menudo por encima de los valores de referencia internacionales.**<sup>5-8</sup> Plomo, cadmio y arsénico son los más prevalentes,<sup>5,7,8</sup> y sus niveles están relacionados a los coeficientes intelectuales significativamente más bajos observados en los niños de Cerro de Pasco en comparación con comunidades de control cercanas.<sup>7</sup> A pesar de que el



**Figura 1. Vista aérea del tajo Raúl Rojas,** la gran mina a cielo abierto en torno a la cual ha crecido Cerro de Pasco. Crédito de la foto: Stefano Sbrulli para Source International, 2019.



**Figura 2. Vista aérea de las aguas rojo sangre de la laguna Quiulacocha** desde la cercanías de la comunidad homónima. Crédito de la foto: Stefano Sbrulli para Source International, 2019.

Ministerio de Salud declaró una emergencia sanitaria y está informado de la situación,<sup>9</sup> los niños de Cerro de Pasco continúan sufriendo – e incluso muriendo – como consecuencia de la exposición crónica a estos metales tóxicos, siendo la muerte más reciente reportada a inicios de 2025.<sup>10</sup>

## El informe

En este contexto tan frágil, documentar el estado de los recursos ambientales y la salud de la población local constituye un imperativo tanto social como ético. Basándose en más de una década de trabajo en la región, en julio de 2024 Source International llevó a cabo **una nueva campaña independiente de monitoreo centrada en las aguas superficiales y potables de Cerro de Pasco y sus zonas aledañas**. Estos datos se suman al **creciente cuerpo de evidencia sobre la contaminación del agua por la industria minera local**, reforzando los hallazgos de muestreos realizados en 2008,<sup>3</sup> 2016,<sup>11</sup> 2019,<sup>5</sup> 2022<sup>12</sup> y 2023<sup>13</sup>.

Este informe describe los resultados de la campaña de julio de 2024, proporcionando una base actualizada para respaldar futuras acciones legales. Todos los datos se analizan en el marco de la normativa más reciente emitida por el Ministerio del Ambiente y el Ministerio de Salud del Perú, y se comparan con las dos campañas de monitoreo anteriores de 2022 y 2023.

## Referencia normativa

En este informe, utilizamos la normativa más actualizada del Ministerio del Ambiente (MINAM) y del Ministerio de Salud peruanos (MINSA; **Tabla 1**). Para las aguas superficiales, nos basamos principalmente en los **Estándares de Calidad Ambiental (ECA) peruanos** establecidos por el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM.<sup>14</sup> Nos centramos en los ECA para la conservación de los ambientes acuáticos (categoría 4, subgrupos E1 y E2), que se aplican a lagos (E1) así como a ríos

**Tabla 1. Resumen de las referencias normativas utilizadas para evaluar la calidad ambiental.** Los metales pesados no incluidos en esta tabla no están regulados bajo la normativa vigente. Las columnas en gris no son utilizadas como referencia principal en el texto. <sup>a</sup> Valor en cada momento, no anual. <sup>b</sup> Parámetro organoléptico de calidad del agua.

Parámetro	D.S. N° 004-2017-MINAM		D.S. N° 010-2010-MINAM	D.S. N° 031-2010-MINSA
	Lagos y ríos (E1/E2)	Agricultura y ganadería (D1/D2)	Efluentes mineros <sup>a</sup>	Agua para consumo humano
pH	6.5 – 9	6.5 – 8.5	6 – 9	6.5 – 8.5 <sup>b</sup>
Conductividad	1000 µS/cm	2500 µS/cm	–	1500 µS/cm <sup>b</sup>
Aluminio	–	5000 µg/L	–	200 µg/L <sup>b</sup>
Antimonio	640 µg/L	–	–	20 µg/L
Arsénico	150 µg/L	100 – 200 µg/L	100 µg/L	10 µg/L
Bario	700 µg/L	700 µg/L	–	700 µg/L
Berilio	–	100 µg/L	–	–
Boro	–	1000 – 5000 µg/L	–	1500 µg/L
Cadmio	0.25 µg/L	10 – 50 µg/L	50 µg/L	3 µg/L
Cobalto	–	50 – 1000 µg/L	–	–
Cromo	–	100 – 1000 µg/L	–	–
Hierro	–	5000 µg/L	2000 µg/L	300 µg/L <sup>b</sup>
Manganeso	–	200 µg/L	–	400 µg/L <sup>b</sup>
Mercurio	0.1 µg/L	1 – 10 µg/L	2 µg/L	1 µg/L
Molibdeno	–	–	–	70 µg/L
Níquel	52 µg/L	200 – 1000 µg/L	–	20 µg/L
Plomo	2.5 µg/L	50 µg/L	200 µg/L	10 µg/L
Cobre	100 µg/L	200 – 500 µg/L	500 µg/L	2000 µg/L <sup>b</sup>
Selenio	5 µg/L	20 – 50 µg/L	–	10 µg/L
Talio	0.8 µg/L	–	–	–
Zinc	120 µg/L	2000 – 24000 µg/L	1500 µg/L	3000 µg/L <sup>b</sup>

costeros e interiores situados a 600 m sobre el nivel del mar (E2). Dado que las variables de interés tienen el mismo valor en ambas subcategorías, las presentamos juntas en la [Tabla 1](#) y las consideramos como una única categoría en el texto.

Para las aguas potables, comparamos los resultados con los **Límites Máximos Permisibles (LMP)** definidos en el Decreto Supremo N.º 031-2010-MINSA.<sup>15</sup> Esta normativa regula la composición química y microbiológica del agua destinada al consumo humano y uso doméstico, especificando límites para parámetros microbiológicos (Anexo I), características organolépticas (Anexo II) y contaminantes orgánicos e inorgánicos (Anexo III).

Para contextualizar aún más nuestros hallazgos, consideramos dos marcos normativos adicionales. Primero, los ECA de categoría 3 del Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, que cubren el agua destinada a riego y uso pecuario.<sup>14</sup> Estos estándares son generalmente menos estrictos que los de categoría 4 y resultan especialmente relevantes para muestras recolectadas cerca de actividades agrícolas o ganaderas. Segundo, los LMP para efluentes industriales de actividades mineras establecidos en el Decreto Supremo N.º 010-2010-MINAM.<sup>16</sup> Aunque estos límites se aplican únicamente a un subconjunto de químicos, proporcionan un referente útil para evaluar los niveles generales de contaminación en sitios afectados por operaciones mineras y/o cercanos a efluentes mineros conocidos. Todos los límites relevantes se resumen en la **Tabla 1** (valores en gris).

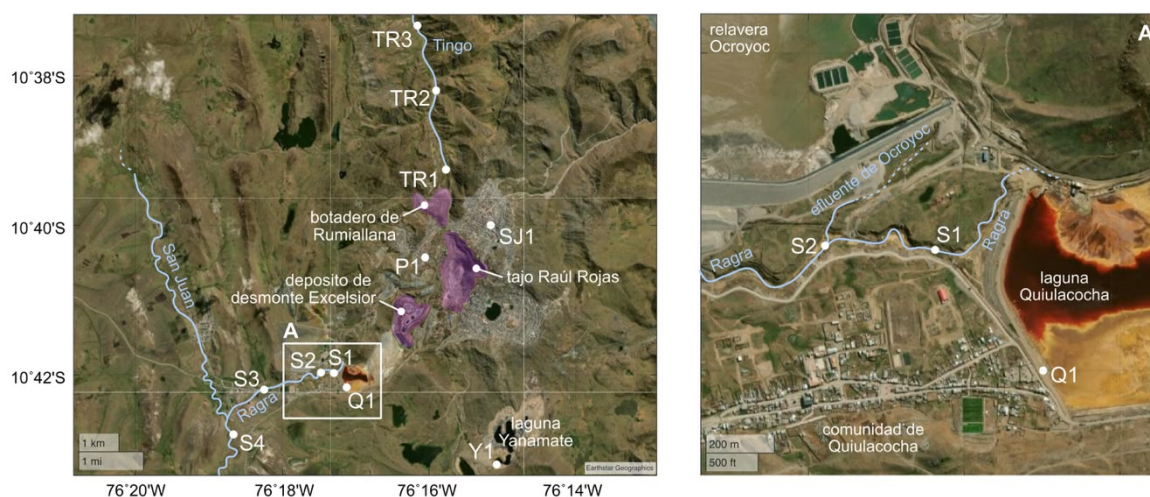
## Sitio y métodos de muestreo

### Sitio de muestreo

El muestreo se realizó el 18 de julio de 2024 en Cerro de Pasco y sus alrededores. Esta investigación se centró en el agua e incluyó la recolección de 9 muestras de aguas superficiales y 2 de agua potable, para un total de 11 muestras (Figura 3). Los sitios fueron seleccionados en base a la experiencia de los años anteriores.<sup>12,13</sup>

Para las aguas superficiales, trabajamos en 3 áreas (Figura 3). Primero, se muestrearon 3 sitios en el río Tingo, comenzando en su manantial bajo el botadero de Rumiallana (TR1) y continuando hacia el norte hasta TR2 y TR3, ubicados aproximadamente a 2.1 y 3.8 km río abajo de TR1. El depósito incluye residuos tanto mineros como municipales.<sup>13</sup> Segundo, se investigaron 5 sitios en el lado suroeste de la ciudad de Cerro de Pasco (Figura 3A), incluyendo la laguna Quiulacocha (Q1) y 4 ubicaciones adicionales dentro de la cuenca del río San Juan (S1 a S4). Específicamente, S1 se recolectó en un punto del río Ragra que recibe descargas de la mina cercana; S2 se tomó directamente de un efluente de la presa de relaves de Ocroyoc antes de su confluencia con el río Ragra; S3 se ubicó en el río Ragra aguas abajo, cerca de la comunidad Yurajhuanca; y S4 se tomó en el río San Juan, aguas arriba de la mina de oro Aurex. La última muestra de agua superficial se recolectó en un brazo sur de la laguna Yanamate (Y1), cerca del punto de muestreo de 2022.<sup>12</sup>

Las muestras de agua destinada al consumo humano se colectaron en 2 ubicaciones en la ciudad de Cerro de Pasco. La muestra P1 se tomó de un tanque doméstico cerca de la plaza principal en Paragsha, mientras que SJ1 se recolectó de un grifo en una habitación del Hotel Señorial, en el distrito de San Juan, la única parte de la ciudad actualmente abastecida con agua potable.



**Figura 3. Vista general de los puntos de muestreo.** Los resaltados en violeta muestran algunos elementos clave del paisaje del legado minero de Cerro de Pasco mencionados en el texto. El panel A presenta un acercamiento de la laguna Quiulacocha y las áreas circundantes. El trazado de los ríos es aproximado. El mapa fue obtenido mediante Matlab (R2021b) y no necesariamente refleja las condiciones existentes durante el muestreo.



**Figura 4. Vista general de las actividades y herramientas de muestreo.** Los paneles A y B muestran el uso de la sonda multiparamétrica en el río Tingo y en la laguna Yanamate. Los paneles C y D ilustran la recolección de aguas superficiales mediante el muestreador de teflón en la laguna Quiulacocha y en el río Tingo.

### Caracterización general del sitio y del agua

En cada sitio, registramos la posición GPS mediante un reloj Garmin Fenix 7 y medimos los parámetros generales de calidad del agua utilizando una sonda multiparamétrica (Hanna, HI 98194). Los sensores de pH y conductividad de la sonda fueron calibrados antes del muestreo con soluciones patrón nuevas (es decir, soluciones comerciales a pH 4 y 7 para el pH y una solución estándar de 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para la conductividad). El sensor de temperatura se utilizó sin calibración. Para las mediciones, colocamos la sonda multiparamétrica en agua corriente (Figura 4A-B) y registramos los valores de temperatura, pH y conductividad después de la estabilización. Posteriormente, la sonda se enjuagó cuidadosamente con agua desionizada y se guardó en su estuche. En el caso de las aguas potables, se colocó la muestra líquida en un recipiente y se registraron los mismos parámetros tras su estabilización.

### Muestreo de agua

Las aguas superficiales se recolectaron con un muestreador de teflón equipado con una varilla de 50 cm (Figura 4C-D). El muestreador se enjuagó cuidadosamente con el agua superficial y, a continuación, el agua se filtró directamente mediante jeringa (filtro de 0.45  $\mu\text{m}$ ) en un tubo Falcon

de 50 mL nuevo. Se añadieron 4 gotas de ácido nítrico concentrado (70%), se mezcló, se etiquetó y se almacenó protegido de la luz solar directa. Las muestras de agua potable se recolectaron en una botella plástica previamente enjuagada y posteriormente se sometieron a los mismos tratamientos que las aguas superficiales.

Durante el transporte nacional e internacional, las muestras se mantuvieron a temperatura ambiente y en oscuridad.

### Análisis químicos

El análisis de metales pesados se realizó en un laboratorio acreditado (certificado por ACCREDIA) dentro de los 20 días posteriores a la recolección de las muestras. Se analizaron 21 metales pesados en agua siguiendo el procedimiento UNI EN ISO 17294-2:2023 (espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, ICP-MS). La [Tabla A1](#) presenta los límites de detección y las incertidumbres de medición promedio según lo indicado en los informes de ensayo del laboratorio.

### Análisis de datos

Todos los datos se analizaron utilizando Excel y Matlab (R2012b). Se calcularon diagramas de caja (boxplots) y medianas empleando todas las concentraciones disponibles, incluso cuando el analito no fue detectado (n.d.; valor asignado igual a 0) o se encontraba por debajo de su límite de detección (los datos brutos se presentan en la [Tabla 3](#)). Se realizó un análisis exploratorio de componentes principales en Matlab introduciendo matrices de datos estandarizadas (mediante la función “zscore”) en la función “pca”.

Para la elaboración de los mapas, las ubicaciones GPS expresadas en grados, minutos y segundos, tal como las proporcionó el reloj Garmin se convirtieron a grados decimales (GD) utilizando la siguiente ecuación.

$$GD = \text{grados} + \frac{\text{minutos}}{60} + \frac{\text{segundos}}{3600}$$

### Muestreos anteriores

En este informe, comparamos principalmente nuestros resultados con las dos campañas más recientes, realizadas en octubre de 2022<sup>12</sup> y agosto de 2023<sup>13</sup>. Si bien las áreas de muestreo se superponen en gran medida, no se dispone de datos históricos para todos los sitios visitados en julio de 2024 ([Tabla 2](#), solo aguas superficiales). El agua potable fue analizada en ambos años anteriores, pero los puntos específicos de muestreo variaron en cada ocasión. Por esta razón, los resultados correspondientes al agua potable se discuten únicamente de forma agregada.

**Tabla 2. Resumen de la disponibilidad de datos de las dos campañas de muestreo anteriores.** El texto entre paréntesis indica el nombre del muestreo en el informe correspondiente. Las ubicaciones pueden diferir ligeramente de las visitadas en 2024.

<b>ID de muestra (2024)</b>	<b>TR1</b>	<b>TR2</b>	<b>TR3</b>	<b>Q1</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>Y1</b>
2022	x (A10)	x (A9)		x (A8)	x (A13)		x (A5)		x (A11)
2023	x (A1)	x (A2)		x (A9)			x (A5)		

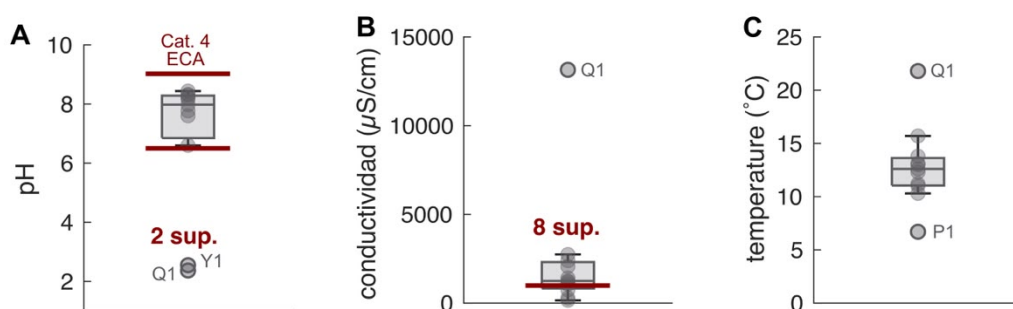
## Resultados

### Parámetros generales del agua

El pH del agua osciló entre 2.4 y 8.4, aunque la mayoría de los valores se situaron entre 6.5 y 8 (Figura 5A y Tabla A2). La laguna Quiulacocha (Q1) y la laguna Yanamate (Y1) presentaron valores de pH muy por debajo de cualquier límite normativo (Tabla 1). Ambos sitios tienen un historial bien documentado de contaminación ácida derivada de residuos mineros y han mostrado de manera consistente condiciones fuertemente ácidas en campañas anteriores.<sup>3,5,12</sup>

La conductividad varió entre 154 y 13150  $\mu\text{S/cm}$  (Figura 5B y Tabla A2). Las dos muestras de agua potable se encontraron por debajo de todos los límites normativos, mientras **8 de las 9 aguas superficiales superaron los ECA para la protección de los ecosistemas acuáticos** (Tabla A2). Q1 presentó la conductividad más alta del conjunto de datos y fue claramente identificada como un valor atípico en el análisis de diagramas de caja (*boxplots*) (Figura 5B). De manera similar, Y1 mostró una conductividad elevada (2740  $\mu\text{S/cm}$ ), ocupando el segundo lugar en el conjunto total y superando los ECA incluso para categorías más permisivas (por ejemplo, categoría 3). Ambos sitios ya presentaban conductividades superiores a 4000  $\mu\text{S/cm}$  en 2022,<sup>12</sup> en concordancia con la contaminación conocida.

La temperatura del agua osciló entre 6.7 y 21 °C (mediana de 13 °C), en consonancia con las condiciones climáticas de Cerro de Pasco. El análisis de diagramas de caja identificó dos valores atípicos: la laguna Quiulacocha (Q1) y el agua potable de Paragsha (P1), que fueron respectivamente más cálidos y más fríos que el resto de las muestras. Sospechamos que la temperatura más elevada de la laguna Quiulacocha podría deberse a la oxidación de la pirita por el oxígeno, el hierro y microorganismos, un proceso conocido por liberar calor.<sup>17,18</sup> De hecho, la pirita – un mineral compuesto por hierro y azufre – constituye aproximadamente el 50% de los residuos de relaves de la laguna Quiulacocha.<sup>19</sup>



**Figura 5. Resumen de los parámetros generales del agua** (N = 11). La línea roja en los paneles A y B indica el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) categoría 4 de Perú, mientras el texto en rojo aclara el número de superaciones (sup.). Los datos brutos se encuentran en el Apéndice (Tabla A2).

**Tabla 3. Concentraciones de metales pesados en agua (en µg/L) y normativa nacional relevante.** Para las aguas superficiales, nos referimos principalmente a los Estándares de Calidad Ambiental categoría 4 (ECA cat. 4). Los ECA de categoría 3 y los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes mineros (EM) son utilizados como referencia secundaria. Para las aguas potables, se indican los LMP para uso humano (UH). Las celdas con concentraciones que excedan ECA cat. 4 o los LMP para uso humano se resaltan en rojo oscuro, mientras las con valores superiores a una o más de las otras normativas se muestran en gris. Los valores en gris corresponden a compuestos no detectados (“n.d.”, reportados como cero por el laboratorio) o por debajo de sus límites de detección (Tabla A1).

ID de muestreo	Aluminio	Antimonio	Arsénico	Bario	Berilio	Boro	Cadmio	Cobalto	Cromo	Hierro	Manganeso	Mercurio	Molibdeno	Níquel	Plomo	Cobre	Selenio	Estaño	Talio	Vanadio	Zinc
<b>Agua superficial</b>																					
RT1	82	0.73	3.8	14	n.d.	92	0.19	0.50	n.d.	350	520	n.d.	1.5	2.9	1.5	11	0.62	0.19	n.d.	0.39	170
RT2	6.1	0.51	3.4	13	n.d.	63	n.d.	0.38	n.d.	2200	700	n.d.	0.65	1.4	0.44	2.5	0.27	n.d.	n.d.	0.21	73
RT3	25	0.45	2.3	20	n.d.	56	0.32	0.52	n.d.	230	1700	n.d.	0.95	1.9	0.64	2.0	0.39	n.d.	0.41	0.16	1100
Q1	17000	0.73	450	2.6	3.7	120	460	58	13	1300000	800000	n.d.	n.d.	190	65	3200	1.9	0.16	28	4.5	540000
S1	22	0.96	9.4	170	n.d.	43	0.28	0.40	n.d.	840	1500	n.d.	0.37	1.5	0.92	3.6	n.d.	n.d.	0.50	n.d.	540
S2	88	0.48	1.9	30	n.d.	44	1.2	5.1	n.d.	220	14000	n.d.	0.27	5.8	1.9	13	1.1	n.d.	3	n.d.	250
S3	41	1.1	10	18	n.d.	38	n.d.	0.37	n.d.	140	1300	n.d.	0.3	5.0	1.1	7.5	0.21	n.d.	0.58	n.d.	240
S4	43	1.2	10	19	n.d.	36	0.11	0.41	n.d.	130	1300	n.d.	0.43	2.2	1.6	7.5	n.d.	n.d.	0.46	n.d.	210
Y1	7400	2.2	32	4.5	0.65	47	24	6	1.3	53000	7900	n.d.	n.d.	14	25	460	0.33	n.d.	12	n.d.	14000
ECA cat. 4		640	150	700			0.25					0.1		52	2.5	100	5		0.8		120
ECA cat. 3 (D1)	5000		100	700	100	1000	10	50	100	5000	200	1		200	50	200	20				2000
ECA cat. 3 (D2)	5000		200		100	5000	50	1000	1000		200	10		1000	50	500	50				24000
EM			100				50			2000		2		200	500						1500
<b>Agua potable</b>																					
P1	100	1.7	4.8	32	n.d.	19	n.d.	n.d.	n.d.	310	32	n.d.	0.49	0.34	2.4	3.3	0.12	n.d.	n.d.	0.14	46
SJ1	30	0.73	3.8	7.8	n.d.	16	n.d.	n.d.	n.d.	190	22	n.d.	0.36	0.37	2.7	7.8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16
UH	200 <sup>a</sup>	20	10	700		1500	3			300 <sup>a</sup>	400 <sup>a</sup>	1	70	20	10	2000 <sup>a</sup>	10				3000 <sup>a</sup>

## Prospectiva de metales pesados en agua

**De los 21 metales analizados, se detectaron 20, de los cuales 11 estuvieron presentes en todas las muestras** (Tabla 3). Además de elementos naturalmente ubuiquitarios – como hierro, aluminio y manganeso – todas las aguas contenían antimonio, arsénico, bario, boro, níquel, cobre y zinc por encima de sus límites de detección. El mercurio nunca se detectó, mientras que berilio, cobalto, cromo, molibdeno, selenio, estaño y vanadio superaron sus límites de detección únicamente en pocos sitios (Tabla 3). Esta distribución de metales refleja lo observado en 2022 y 2023.<sup>12,13</sup>

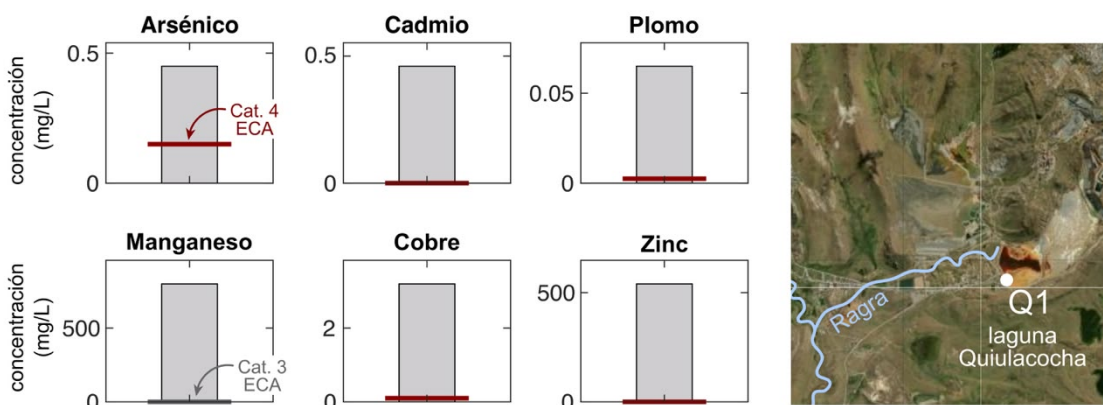
Cuando se consideran en el contexto de la normativa peruana, **el zinc y el cadmio mostraron las superaciones más frecuentes**, con 7 y 5 valores, respectivamente, que excedieron los Estándares de Calidad Ambiental peruanos para la protección de la vida acuática (Tabla 3). Todas las muestras de aguas superficiales también presentaron niveles significativamente altos de manganeso (500–800000 µg/L) e hierro (130–1300000 µg/L). Aunque estos metales no están incluidos en los ECA peruanos para la protección de los ecosistemas acuáticos, existen valores normativos para agua destinada a consumo pecuario y humano, así como para efluentes mineros (Tabla 1). Según estas normas, **el manganeso en aguas superficiales excedió los límites legales en el 100% de las muestras**, mientras que el hierro superó todos los límites aplicables en 2 muestras y excedió el límite para efluentes mineros en 2 sitios adicionales (Tabla 3).

**La mayoría de las superaciones se observaron en la laguna Quiulacocha y la laguna Yanamate** (Q1 y Y1). En contraste, las aguas potables mostraron una calidad generalmente buena, con una única superación por hierro en P1 (310 µg/L, frente al Límite Máximo Permisible de 300 µg/L; Tabla 3). Un análisis exploratorio de componentes principales confirmó que Q1 y Y1 presentan una composición química significativamente diferente al resto, mientras que las aguas potables son, en general, similares a las muestras recolectadas en la cuenca del río San Juan (Figura A1).

A continuación, se discute en detalle la composición de las muestras recolectadas en las dos lagunas (Q1 y Y1), a lo largo del río Tingo (TR1 a TR3), dentro de la cuenca del río San Juan (S1 a S4) y en los grifos de Cerro de Pasco (P1 y SJ1). Siempre que fue posible, estos nuevos datos se contextualizan con los resultados de los monitoreos de agua de 2022 y 2023.

### Laguna Quiulacocha

La laguna Quiulacocha presentó niveles excepcionalmente altos de metales disueltos. **Casi todos los elementos regulados bajo el D.S. N.º 008-2017-MINAM superaron su límite normativo, con un total de 7 superaciones de los ECA para la protección de la vida acuática** (Figura 6 y Tabla 3). Específicamente, el arsénico fue 3 veces mayor que el ECA (450 vs. 150 µg/L), el cadmio 1840 veces mayor (460 vs. 0.25 µg/L), el níquel casi 4 veces mayor (190 vs. 52 µg/L), el plomo 26 veces mayor (65 vs. 2.5 µg/L), el cobre 32 veces mayor (3200 vs. 100 µg/L), el talio 35 veces mayor (28 vs. 0.8 µg/L) y el zinc 4500 veces mayor (540000 vs. 120 µg/L). Aunque no regulados en categoría 4, el aluminio, el hierro, el manganeso y el cobalto superaron los ECA de categoría 3, sumando 4 superaciones



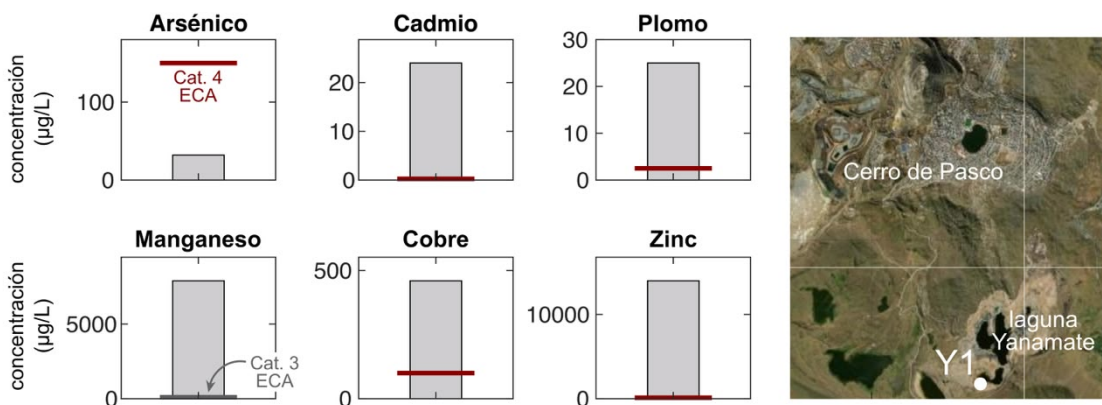
**Figura 6. Superaciones de metales pesados seleccionados en la Laguna Quiulacocha.** Las líneas en roja oscuro y gris indican respectivamente los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) categoría 4 y 3 (subcategoría D1; mostrada solamente por manganeso) de Perú (detalles en la Tabla 1). Los datos brutos están en la Tabla 3. El mapa a la derecha es una reproducción de la Figura 3 que aclara la ubicación del sitio de muestreo.

adicionales (Tabla 3). El arsénico, cadmio, hierro y cobre también excedieron los límites normativos para efluentes mineros (Tabla 3).

Estos hallazgos concuerdan muy bien con los resultados de la campaña de 2022<sup>12</sup> (este sitio no fue muestreado en 2023; ver Tabla 2). **Casi todos los metales que superaron los ECA para la protección de la vida acuática en 2024 también lo hicieron en 2022**; como únicas excepciones, el plomo y el talio estuvieron por debajo del límite de detección en 2022, pero por encima del ECA categoría 4 en 2024, mientras que el selenio superó la norma en 2022 (8.4 µg/L vs. 5 µg/L) pero no en 2024. De manera similar, el aluminio, el hierro y el manganeso superaron los ECA de categoría 3 también en 2022. En conjunto, estos resultados indican una **contaminación sostenida de la laguna a lo largo de los años**. Entre los elementos detectados, el arsénico, el cadmio y el plomo son particularmente preocupantes debido a sus efectos tóxicos incluso a bajas concentraciones.<sup>20</sup> Mientras que el arsénico, el plomo y el talio han fluctuado a lo largo de los años, **el cadmio se ha mantenido siempre excepcionalmente alto** (790 µg/L en 2022 y 640 µg/L en 2024, al menos 2 órdenes de magnitud superiores a su ECA de 0.25 µg/L).

### Laguna Yanamate

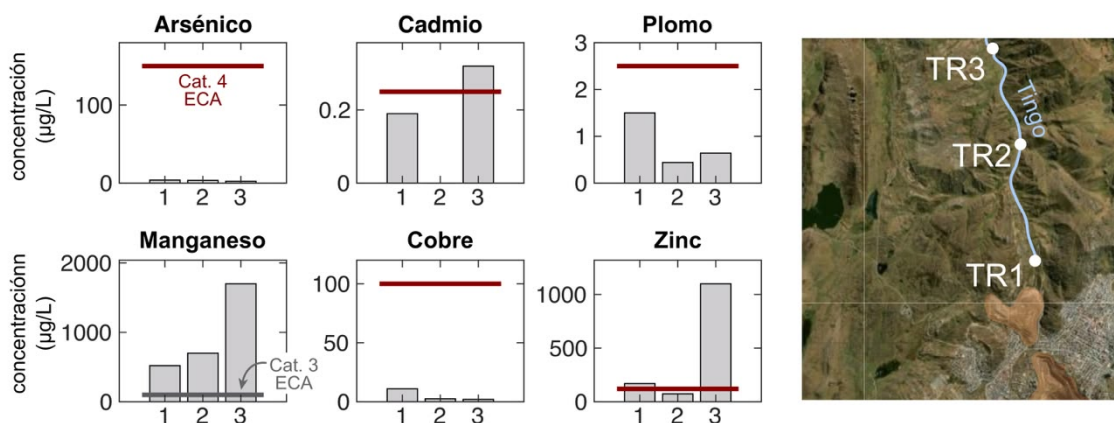
La laguna Yanamate (Y1) fue el segundo sitio más contaminado después de Q1, con **5 superaciones de los ECA peruanos para la protección de los ecosistemas acuáticos** (Figura 7 y Tabla 3). Los metales que superaron el ECA categoría 4 incluyeron cadmio (24 µg/L, 96 veces superior al ECA), plomo (25 µg/L, 10 veces superior), cobre (460 µg/L, casi 5 veces superior), talio (12 µg/L, 15 veces superior) y zinc (14000 µg/L, 116 veces superior). Al igual que en la laguna Quiulacocha, el aluminio, el hierro y el manganeso superaron los ECA de categoría 3, resultando **en 3 superaciones adicionales según la normativa nacional** (Tabla 3). El hierro, el cobre y el zinc también estuvieron por encima del límite normativo para efluentes mineros (Tabla 3).



**Figura 7. Superaciones de metales pesados seleccionados en la Laguna Yanamate.** El código de colores es el mismo que en la Figura 6. Los datos brutos se encuentran en la Tabla 3.

Aunque las concentraciones fluctúan, **los datos históricos revelan una contaminación estable por metales pesados también en Yanamate.** En 2022, se observaron prácticamente las mismas superaciones de los ECA del D.S. N.º 008-2017-MINAM que en 2024 – es decir, 5 superaciones de categoría 4 y 2 de categoría 3.<sup>12</sup> Como única variación, en 2022 este sitio presentó concentraciones de hierro por debajo del ECA categoría 3 (4400 µg/L vs. 5000 µg/L). La conductividad y el pH también estuvieron por encima de los límites normativos tanto en 2022 como en 2024.

## Río Tingo



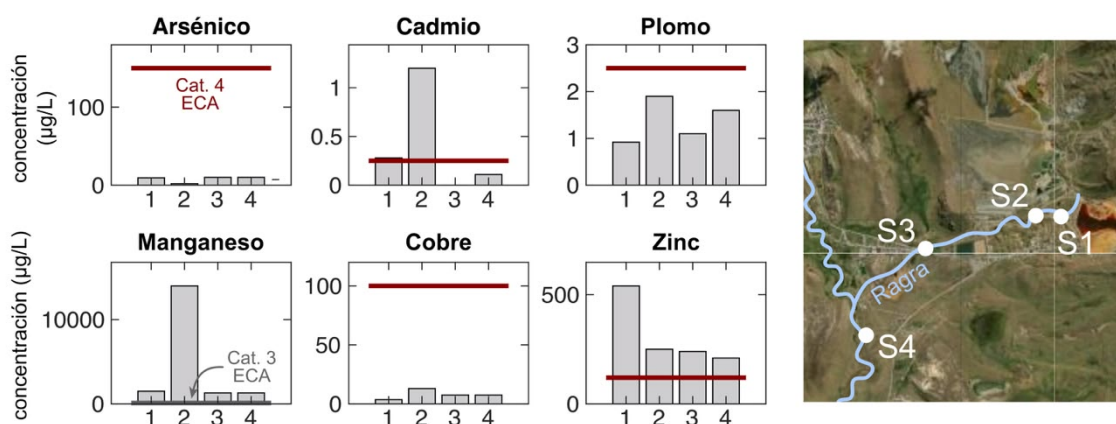
**Figura 8. Superaciones de metales pesados seleccionados en la cuenca del río Tingo.** El código de colores es el mismo que en la Figura 6. Los datos brutos se encuentran en la Tabla 3.

En 2024, se observaron **3 superaciones de los ECA nacionales para la protección de los ecosistemas acuáticos** en muestras recolectadas a lo largo del río Tingo – a saber, 2 superaciones de zinc en TR1 y TR3, y 1 de cadmio en TR3 (Figura 8 y Tabla 3). **El manganeso también estuvo por encima del ECA categoría 3 en todos los sitios** (Figura 8), mientras que el hierro superó el ECA categoría 3 en TR1 y TR2, y excedió el límite para efluentes mineros en TR2 (Tabla 3). Varios metales disminuyeron de manera consistente desde el manantial del río Tingo (TR1) hacia aguas abajo, lo que sugiere que se lixiviaron desde debajo del depósito de relaves (Figura A2). Los elementos con

este comportamiento incluyen antimonio, arsénico, boro, cobre y vanadio. Cabe destacar que la conductividad siguió la misma tendencia decreciente desde TR1 hasta TR3 (Tabla A2). Por otro lado, otros metales aumentaron de manera consistente de TR1 a TR3 (por ejemplo, manganeso) o solo entre TR2 y TR3 (por ejemplo, cadmio y zinc; Figura 8), lo que indica una posible fuente secundaria de contaminación aguas abajo de TR2.

Aunque TR3 no fue muestreado en las dos campañas anteriores (Tabla 2), **los otros 2 sitios mostraron en general una química del agua similar a lo largo de los años** (Figura A2).<sup>12,13</sup> El zinc siempre superó el ECA categoría 4 en TR1 y, en 2023, también estuvo por encima de este valor en TR2. De igual manera, el manganeso se mantuvo siempre por encima del ECA categoría 3 en ambas ubicaciones. Entre los demás metales regulados bajo el D.S. N.º 008-2017-MINAM, en 2022 el cadmio superó ligeramente el ECA categoría 4 en TR1, mientras que el plomo mostró una disminución constante a lo largo del tiempo: en 2022 superó el ECA categoría 4 en ambos sitios; en 2023, solo en TR1; y en 2024 estuvo por debajo del ECA en ambas ubicaciones (Figura A2).

### Cuenca del río San Juan



**Figura 9. Superaciones de metales pesados seleccionados en la cuenca del río San Juan.** El código de colores es el mismo que en la Figura 6. Los datos brutos se encuentran en la Tabla 3.

En esta área se observaron 7 **superaciones de los ECA nacionales para la protección de los ecosistemas acuáticos** (Figura 9 y Tabla 3). Todos los sitios superaron al menos el doble el ECA categoría 4 para zinc (210–540 vs. 120 µg/L), mientras que S1 también estuvo ligeramente por encima del ECA para cadmio (0.28 vs. 0.25 µg/L), y S2 superó el ECA tanto para cadmio (1.2 vs. 0.25 µg/L) como para talio (3 vs. 0.8 µg/L). En conjunto, **S1 y S2 fueron los sitios más contaminados**, lo que concuerda con su proximidad a actividades mineras y a la presa de relaves de Ocroyoc (Figura 9 y Figura 3). El análisis exploratorio de componentes principales reveló además una ligera diferencia entre S2 y las otras muestras (Figura A1), evidenciada también en las mayores concentraciones de metales específicos, como cadmio, cobalto, manganeso, selenio y talio. S2 fue recolectada en un efluente de la presa de relaves de Ocroyoc *antes* de unirse al río Ragra, lo que probablemente explica esta pequeña diferencia en la composición química.

Los sitios S1 y S3 también fueron incluidos en las dos campañas anteriores,<sup>12,13</sup> mostrando una **disminución general de la contaminación a lo largo de los años**. Por ejemplo, en 2022, S1 presentó 4 superaciones del ECA categoría 4 (cadmio, plomo, talio y zinc) y 1 en categoría 3 (manganeso); en 2023 se observaron 3 superaciones de categoría 4 (cadmio, talio y zinc) y 2 de categoría 3 (hierro y manganeso); y en 2024 hubo únicamente 2 superaciones de categoría 4 (cadmio y zinc) y 1 de categoría 3 (manganeso). **El cadmio, el zinc y el manganeso fueron consistentemente los elementos más problemáticos en estos sitios**, seguidos por el plomo y el talio. La conductividad también se ha mantenido constantemente por encima del ECA categoría 4 en ambos sitios desde 2022 hasta la fecha.

### Agua para consumo humano

En las aguas potables, se observó únicamente una superación menor del D.S. 031-2010-MINSA – es decir, por hierro en Paragsha (310 µg/L vs. 300 µg/L; [Tabla 3](#)). Aunque las concentraciones específicas de metales pesados pueden variar, estos resultados confirman los hallazgos de las campañas de 2022<sup>12</sup> y 2023<sup>13</sup> de una **calidad de agua potable generalmente aceptable en Cerro de Pasco**.

## Hallazgos clave

### Aguas superficiales

En esta última investigación, se confirmó la **contaminación generalizada de las aguas superficiales en Cerro de Pasco y sus alrededores vinculada a las actividades mineras locales**. En total, se registraron **32 superaciones del Estándar de Calidad Ambiental nacional para aguas categoría 4**, 25 para la categoría 3 subgrupo D1 y 22 para la categoría 3 subgrupo D2 (según lo definido en el D.S. 004-2017-MINAM<sup>14</sup>; Tabla 4). También se registraron **10 superaciones de los Límites Máximos Permisibles de la normativa para efluentes mineros** (D.S. 010-2010-MINAM<sup>16</sup>), que ocurrieron principalmente en la laguna Quiulacocha y la laguna Yanamate (Tabla 4). A lo largo de todos los sitios y años (2022 – 2024), **la conductividad, el cadmio y el zinc** fueron los parámetros que con mayor frecuencia superaron los ECA categoría 4, mientras que **el manganeso**, que no está regulado en categoría 4, mostró el mayor número de superaciones del ECA categoría 3. Otros metales que superaron de manera consistente – aunque no siempre – los ECA categoría 4 incluyeron **plomo y talio**. En los últimos tres años, el arsénico, el cobre, el hierro y el pH estuvieron fuera de los estándares regulatorios únicamente en las lagunas.

**Estos resultados son, en términos generales, consistentes con las campañas de muestreo anteriores**,<sup>12,13</sup> que también documentaron una contaminación severa de las aguas superficiales en las lagunas (Q1 y Y1) y en las áreas inmediatamente cercanas a la mina y sus actividades (TR1, S1,

**Tabla 4. Resumen de las superaciones en las muestras de aguas superficiales.** Superaciones de los ECA categoría 4, ECA categoría 3 y los Límites Máximos Permisibles para efluentes mineros (LPM-EM). Este cálculo también incluye superaciones en los valores de conductividad y pH. La última columna a la derecha resume los parámetros con mayor número de superaciones de los ECA categoría 4 desde 2022; los valores resaltados en gris son comunes en todas las áreas.

ID	Superaciones del ECA cat. 4	Superaciones del ECA cat. 3	Superaciones del LPM-EM	Parámetros con mayor número de superaciones desde 2002
TR1	2	1	0	Conductividad, cadmio, manganeso, zinc (+ plomo)
TR2	1	1	1	
TR3	2	1	0	
Q1	9	10	6	Conductividad, pH, arsénico, aluminio, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel, zinc (+ plomo, selenio, talio)
S1	3	1	0	Conductividad, cadmio, manganeso, zinc (+ talio, plomo)
S2	4	1	0	
S3	2	1	0	
S4	2	1	0	
Y1	7	8 (grupo D1) 5 (grupo D2)	3	Conductividad, pH, aluminio, cadmio, cobre, hierro, manganeso, talio, zinc
<b>Tot</b>	<b>32</b>	<b>25</b> (grupo D1) <b>22</b> (grupo D2)	<b>10</b>	

S2 y S3). Aunque con algunas fluctuaciones y excepciones, las concentraciones de metales pesados en toda el área de estudio han mostrado un descenso gradual a lo largo de los años.<sup>5,12,13</sup> Si bien el orden de magnitud general de la contaminación se mantiene constante, esta ligera tendencia descendente podría reflejar cambios en las condiciones climáticas – por ejemplo, variaciones en la precipitación estacional y sus efectos de dilución asociados – y/o ser resultado de los esfuerzos de remediación en curso del depósito de Excelsior.<sup>21</sup> No obstante, **dado el alcance de la contaminación y los impactos sobre la salud bien documentados,<sup>5,8</sup> la remediación sigue siendo una necesidad crítica y urgente.**

### Aguas para consumo humano

**En cuanto a los metales pesados, la calidad del agua potable fue en general aceptable,** con una única superación menor en Paragsha (P1; Tabla 3). Esta superación se refería al hierro, un parámetro que describe la calidad organoléptica del agua más que su seguridad para el consumo humano.<sup>15</sup> **Estos hallazgos son consistentes con las dos campañas anteriores,** que no reportaron superaciones del D.S. 031-2010-MINSA.<sup>12,13</sup>

Aunque actualmente el agua potable presenta un riesgo de contaminación menor que las aguas superficiales, se recomiendan mejoras en el tratamiento y en el abastecimiento de agua para garantizar un consumo doméstico seguro y prevenir la exposición crónica, especialmente en poblaciones vulnerables.

### Implicaciones para la salud humana y el medio ambiente

**Estos hallazgos se suman a la creciente evidencia que demuestra el alto potencial de exposición crónica a metales pesados en la población de Cerro de Pasco** – que se encuentra en una de las regiones de mayor riesgo por contaminación relacionada con la minería.<sup>22</sup>

La mayoría de las sustancias detectadas repetidamente por encima de los límites normativos en los últimos 3 años son bien conocidas como tóxicos y están incluidas entre los contaminantes prioritarios a nivel mundial. De hecho, **la Organización Mundial de la Salud clasifica al cadmio y al plomo entre los químicos de mayor preocupación para la salud pública.**<sup>20</sup> El arsénico y el mercurio, otros metales pesados de esta lista,<sup>20</sup> también presentaron niveles preocupantes en sitios específicos de muestreo y/o en otras matrices ambientales, como el suelo.<sup>12</sup> El cadmio se asocia con daño renal, desmineralización ósea, problemas respiratorios y ha sido clasificado como carcinógeno Clase I por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer.<sup>23</sup> El plomo, un tóxico acumulativo, afecta múltiples sistemas del cuerpo, incluidos el neurológico, hematológico, gastrointestinal, cardiovascular y renal.<sup>24</sup> El plomo inorgánico también es un probable carcinógeno (Clase 2A).<sup>25</sup> **Varios estudios epidemiológicos reportaron niveles elevados de plomo en sangre y altos niveles de cadmio, arsénico y mercurio en la orina de residentes de Cerro de Pasco** (revisado en nuestro informe de 2019<sup>5</sup>). Apoyando estos hallazgos, se observaron repetidamente altas concentraciones de estos mismos metales en muestras de cabello de la población infantil de

Cerro de Pasco.<sup>5,8</sup> Estos datos subrayan un **vínculo claro entre la contaminación ambiental y la exposición**. Aunque en general son menos problemáticos – al ser elementos esenciales –, también el zinc y el manganeso pueden causar problemas de salud si están presentes de forma crónica en concentraciones altas.<sup>26,27</sup> Además, la co-ocurrencia de múltiples metales en concentraciones elevadas agrava aún más la situación, aumentando el potencial de efectos adversos sinérgicos.

**Estos metales representan riesgos también para los ecosistemas.** Si bien restaurar las lagunas que alguna vez fueron naturales alrededor de Cerro de Pasco puede no ser factible a corto plazo, **los ambientes aguas abajo permanecen altamente vulnerables**. Por ejemplo, el río San Juan desemboca en la laguna Junín, un sitio Ramsar desde 1997 y un área de importancia ecológica y agrícola nacional.<sup>28,29</sup> Este humedal de gran altitud alberga especies raras y endémicas, incluyendo el Zambullidor de Junín y el Rascón de Junín – ambos clasificados como en peligro en la Lista Roja de la UICN de Especies Amenazadas<sup>30,31</sup> – y provee servicios ecosistémicos críticos como purificación de agua, almacenamiento de carbono y pastoreo para las comunidades locales.<sup>29</sup> Un estudio de 2014 mostró un vínculo claro entre la construcción de la represa hidroeléctrica de Upamayo en 1932 y la posterior acumulación de plomo y zinc en los sedimentos de la laguna, alcanzando niveles que superan el estándar ambiental de la EPA en un orden de magnitud.<sup>32</sup> Construida para suministrar electricidad a la industria minera de Cerro de Pasco, la represa desvió el río San Juan, canalizando sedimentos contaminados hacia la laguna Junín y poniendo en riesgo a largo plazo su frágil ecosistema.<sup>32</sup> Estos hallazgos subrayan las profundas consecuencias ecológicas de las actividades mineras y destacan la urgente necesidad de protección ambiental y manejo sostenible de las cuencas, incluso más allá de los límites del distrito Simón Bolívar.

## Referencias

- (1) *Quiulacocha*. Cerro de Pasco – Referencias, datos historicos, recopilaciones y mas. <https://pascoblogs.blogspot.com/2015/04/quiulacocha.html> (accessed 2025-11-10).
- (2) *Cerro de Pasco*. Source International. <https://www.source-international.org/featured-cerro-de-pasco> (accessed 2025-09-25).
- (3) Bianchini, F.; Pascali, G.; Campo, A.; Orecchio, S.; Bonsignore, R.; Blandino, P.; Pietrini, P. Elemental Contamination of an Open-Pit Mining Area in the Peruvian Andes. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **2015**, *12* (3), 1065–1074. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0493-8>.
- (4) Source International. *Evaluación de La Contaminación Ambiental En Cerro de Pasco (2009 - 2022)*; 2023. [https://assets-global.website-files.com/5d9baf75f6edb09b82b5aaf/650402136a13d41bd981726d\\_Ambiente%20Estudios%20OK%202018-2021%20\(17.3%20x%2024.6%20cm\)\\_compressed.pdf](https://assets-global.website-files.com/5d9baf75f6edb09b82b5aaf/650402136a13d41bd981726d_Ambiente%20Estudios%20OK%202018-2021%20(17.3%20x%2024.6%20cm)_compressed.pdf).
- (5) Source International. *Condiciones de La Calidad Ambiental y Exposición Humana a Metales Pesados En Cerro de Pasco (2019)*; 2019. [https://cdn.prod.website-files.com/5d9baf75f6edb09b82b5aaf/623854d50fdefb41ce5e2a95\\_C.%20de%20P%20-%20Informe.%20Inv.clinica%20total.pdf](https://cdn.prod.website-files.com/5d9baf75f6edb09b82b5aaf/623854d50fdefb41ce5e2a95_C.%20de%20P%20-%20Informe.%20Inv.clinica%20total.pdf).
- (6) Source International. *A Human Rights Impact Assessment: The Case of the Cerro de Pasco Mining Operation and Its Adverse Consequences on Children Population*; 2017. [https://cdn.prod.website-files.com/5d9954966e7b48dc0509576b/680683c2a60e30a87c667fe2\\_HRIA%20Pasco.pdf](https://cdn.prod.website-files.com/5d9954966e7b48dc0509576b/680683c2a60e30a87c667fe2_HRIA%20Pasco.pdf).
- (7) Source International. *Exposición Humana a La Contaminación Minera – Estudio Del Coeficiente Intelectual y Análisis Del Cabello En La Población Infantil y Adolescente de Cerro de Pasco (2021)*; 2021. [https://cdn.prod.website-files.com/5d9baf75f6edb09b82b5aaf/650401af3bebc55ac800422d\\_Qi%20pelo%20pasco%20OK%20%2817.3%20x%2024.6%20cm%29%281%29.pdf](https://cdn.prod.website-files.com/5d9baf75f6edb09b82b5aaf/650401af3bebc55ac800422d_Qi%20pelo%20pasco%20OK%20%2817.3%20x%2024.6%20cm%29%281%29.pdf).
- (8) Piñeiro, X. F.; Ave, M. T.; Mallah, N.; Caamaño-Isorna, F.; Jiménez, A. N. G.; Vieira, D. N.; Bianchini, F.; Muñoz-Barús, J. I. Heavy Metal Contamination in Peru: Implications on Children's Health. *Sci. Rep.* **2021**, *11* (1), 22729. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02163-9>.
- (9) Minsa declaró emergencia sanitaria en 2 distritos de Pasco, contaminados con metales pesados. *Actualidad Ambiental*. June 25, 2017. <https://www.actualidadambiental.pe/minsa-declaro-emergencia-sanitara-en-2-distritos-de-pasco-contaminados-con-metales-pesados/> (accessed 2025-09-25).
- (10) Reportan fallecimiento de niña de 12 años expuesta a metales pesados en Pasco. *Actualidad Ambiental*. May 16, 2025. <https://www.actualidadambiental.pe/reportan-fallecimiento-de-nina-de-12-anos-expuesta-a-metales-pesados-en-pasco/> (accessed 2025-09-25).
- (11) Source International. *Análisis Ambiental de La Calidad de Los Recursos Hídricos En La Zona Minera de Cerro de Pasco, Perú*; 2017.
- (12) Source International. *Estado de Calidad de Agua y Suelo En El Territorio Minero de Cerro de Pasco, Perú*; 2023. [https://cdn.prod.website-files.com/5d9baf75f6edb09b82b5aaf/661ffc2be220e77db339f764\\_Informe%20Final%20agua%20y%20suelo%202022.pdf](https://cdn.prod.website-files.com/5d9baf75f6edb09b82b5aaf/661ffc2be220e77db339f764_Informe%20Final%20agua%20y%20suelo%202022.pdf) (accessed 2025-09-22).
- (13) Source International. *Estado de Calidad de Agua En El Territorio Minero de Cerro de Pasco, Perú*; 2024.
- (14) Ministerio del Ambiente. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf> (accessed 2025-09-02).

- (15) Ministerio de Salud. Decreto Supremo N° 031-2010-MINSA. <https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/244805-031-2010-sa> (accessed 2025-09-06).
- (16) Ministerio del Ambiente. Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/317458-010-2010-minam> (accessed 2025-09-16).
- (17) Lottermoser, B. G. Sulfidic Mine Wastes. In *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*; Lottermoser, B., Ed.; Springer: Berlin, Heidelberg, 2010; pp 43–117. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8_2).
- (18) Baker, B. J.; Banfield, J. F. Microbial Communities in Acid Mine Drainage. *FEMS Microbiol. Ecol.* **2003**, *44* (2), 139–152. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(03\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(03)00028-X).
- (19) *Quiulacocha Tailings*. Cerro de Pasco Resources Inc. <https://www.pascoresources.com/projects/quiulacocha-tailings/> (accessed 2025-11-20).
- (20) *Chemical Safety and Health*. World Health Organization. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/chemical-safety-and-health/health-impacts/chemicals> (accessed 2025-09-25).
- (21) Ormeño, Y.; Ventura, E. El cierre del depósito de desmontes Excélsior en Pasco, considerado el pasivo ambiental minero más grande del Perú y América. *Revista Minería*. 2022. <https://www.revistamineria.com.pe/tecnico-cientifico/el-cierre-del-deposito-de-desmontes-excelsior-en-pasco%2C-considerado-el-pasivo-ambiental-minero-mas-grande-del-peru-y-america-la> (accessed 2025-11-19).
- (22) Defensoría del Pueblo. En Defensa de Las Persona Expuestas a Metales Pesados, Metloides y Otras Sustancias Químicas: Los Impactos de La Contaminación Ambiental, 2021. <https://repositorio.mimp.gob.pe/server/api/core/bitstreams/4346fd23-730d-4ac6-bfd4-c36e4dfe09b9/content> (accessed 2025-09-25).
- (23) World Health Organization. *Exposure to Cadmium: A Major Public Health Concern*; Geneva, 2019. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/f190f2f1-f74d-48a3-823b-25f5d3af702b/content>.
- (24) World Health Organization. *Exposure to Lead: A Major Public Health Concern – Fourth Edition*; Geneva, 2025. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/48b6e05d-1d82-4ccd-adc6-a0bbea71b456/content>.
- (25) IARC. *Inorganic and Organic Lead Compounds*; ARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans; 2006; Vol. 87.
- (26) ATSDR. *Manganese | Toxic Substances | Toxic Substance Portal | ATSDR*. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/substances/ToxSubstance.aspx?toxid=23> (accessed 2025-09-25).
- (27) ATSDR. *Zinc | Toxic Substances | Toxic Substance Portal | ATSDR*. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/substances/ToxSubstance.aspx?toxid=54> (accessed 2025-09-25).
- (28) *Reserva Nacional de Junín*. Ramsar Sites Information Service. <https://rsis.ramsar.org/ris/882> (accessed 2025-09-25).
- (29) *Lake Chinchaycocha, Peru*. Wetlands International. <https://www.wetlands.org/case-study/lake-chinchaycocha/> (accessed 2025-09-25).
- (30) *IUCN Red List of Threatened Species: Podiceps taczanowskii*. IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/en> (accessed 2025-11-11).
- (31) *IUCN Red List of Threatened Species: Laterallus tuerosi*. IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/en> (accessed 2025-11-11).
- (32) Rodbell, D. T.; Delman, E. M.; Abbott, M. B.; Besonen, M. T.; Tapia, P. M. The Heavy Metal Contamination of Lake Junín National Reserve, Peru: An Unintended Consequence of the Juxtaposition of Hydroelectricity and Mining. *GSA Today* **2014**, 4–10. <https://doi.org/10.1130/GSATG200A.1>.

## Apéndice

**Tabla A1** Resumen del límite de detección de los métodos analíticos y la incertidumbre de medición promedio para los 21 metales pesados.

**Tabla A2** Resumen de las ubicaciones de las muestras y de los parámetros generales de la química del agua.

**Figura A1** Análisis exploratorio de componentes principales de las muestras de aguas superficiales.

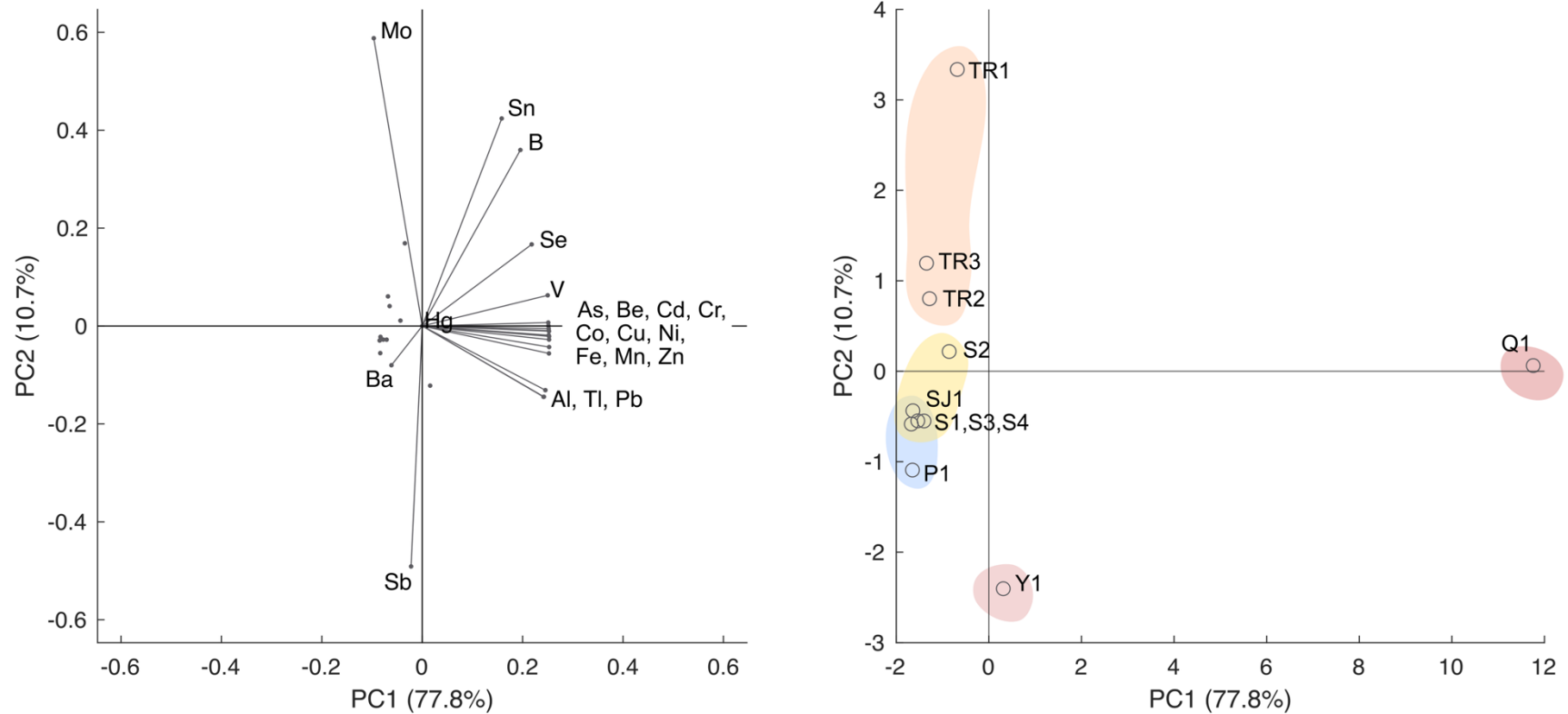
**Figura A2** Cambios en la concentración de metales a lo largo del río Tingo (2022 a 2024).

**Tabla A1. Resumen del límite de detección y del error relativo de los métodos analíticos para los 21 metales pesados** (valores proporcionados por el laboratorio). Cuando no está disponible (n.a.), los analitos estuvieron siempre por encima de sus límites de detección.

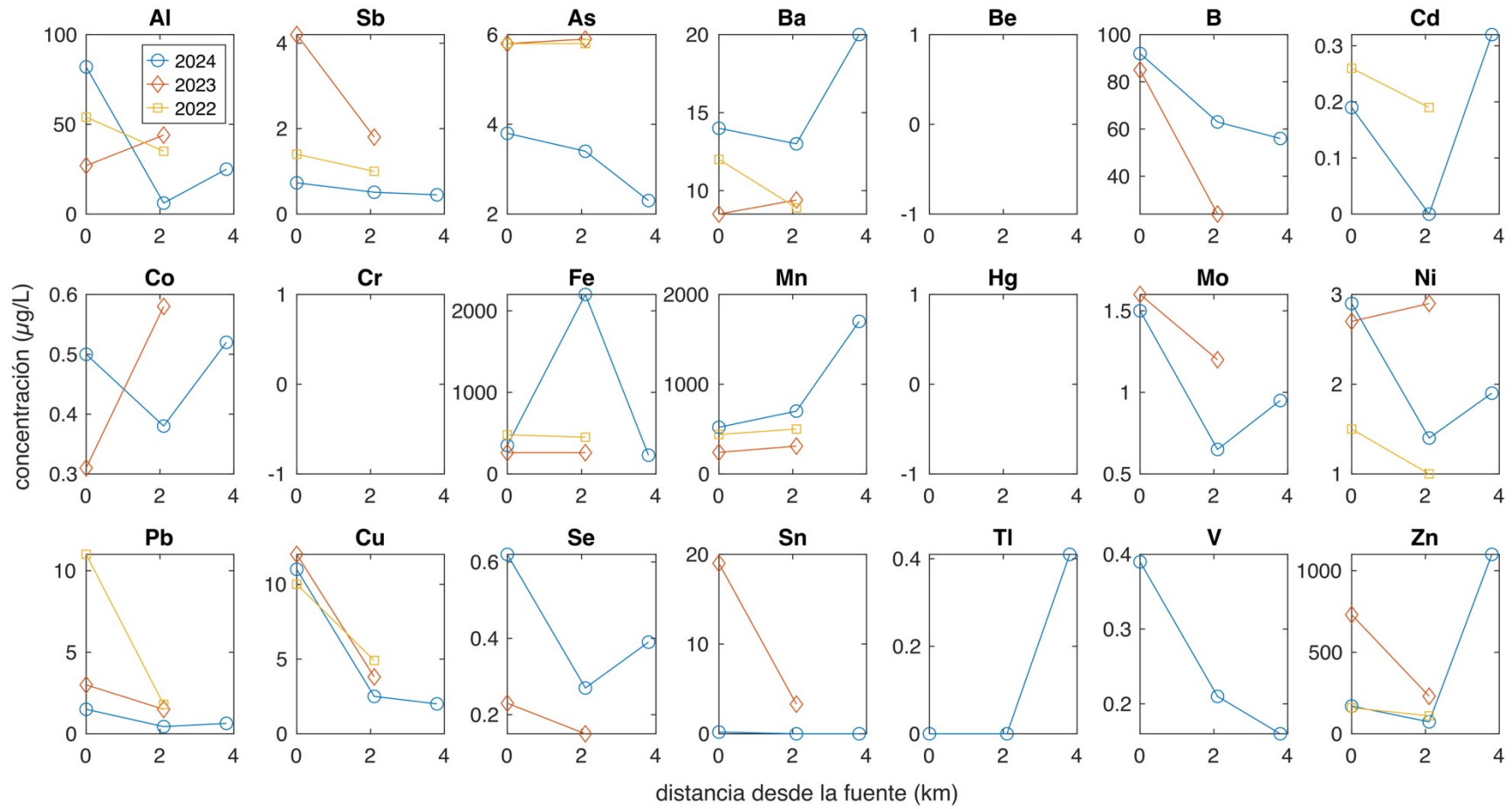
	Aluminio	Antimonio	Arsénico	Bario	Berilio	Boro	Cadmio	Cobalto	Cromo	Hierro	Manganeso	Mercurio	Molibdeno	Níquel	Plomo	Cobre	Selenio	Estaño	Talio	Vanadio	Zinc
<b>Límite de detección (µg/L)</b>	25	n.a.	n.a.	n.a.	0.1	n.a.	0.1	1	5	n.a.	n.a.	0.5	1	n.a.	1	n.a.	1	1	0.1	1	n.a.
<b>Error relativo promedio (%)</b>	26%	n.a.	29%	30%	24%	26%	29%	25%	23%	24%	24%	n.a.	n.a.	21%	29%	25%	n.a.	n.a.	26%	n.a.	27%

**Tabla A2. Resumen de las ubicaciones de las muestras y de los parámetros generales de la química del agua.** Las celdas resaltadas en rojo superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) categoría 4.

ID	Tipo de muestra	Locación	Latitud	Longitud	pH	Conductividad (μS/cm)	Temperatura (°C)
<b>RT1</b>	agua de río	Tingo River	-10.65423	-76.26281	8.31	<b>2068</b>	12.6
<b>RT2</b>	agua de río	Tingo River	-10.63661	-76.26505	8.21	<b>1061</b>	11.2
<b>RT3</b>	agua de río	Tingo River	-10.62211	-76.26932	8.44	747	10.3
<b>Q1</b>	agua de laguna	Lake Quiulacocha	-10.70278	-76.28539	<b>2.37</b>	<b>13150</b>	21.8
<b>S1</b>	agua de río	San Juan River	-10.69961	-76.28828	7.98	<b>1181</b>	13.1
<b>S2</b>	agua de río	San Juan River	-10.69950	-76.29122	7.77	<b>2391</b>	15.7
<b>S3</b>	agua de río	San Juan River	-10.70329	-76.30414	8.33	<b>1411</b>	13.0
<b>S4</b>	agua de río	San Juan River	-10.71329	-76.31111	8.19	<b>1252</b>	13.8
<b>Y1</b>	agua de laguna	Lake Yanamate	-10.72000	-76.25128	<b>2.55</b>	<b>2740</b>	12.3
<b>P1</b>	agua del grifo	Paragsha	-10.67383	-76.26756	6.60	286	6.7
<b>SJ1</b>	agua del grifo	Hotel Señorial	-10.66660	-76.25263	7.60	154	11.0
					<b>ECA cat. 4</b>	6.5 – 9	1000
					<b>ECA cat. 3</b>	6.5 – 8.5	2500
					<b>Efluentes mineros</b>	6 – 9	
					<b>Uso humano</b>	6.5 – 8.5	1500



**Figura A1. Análisis exploratorio de componentes principales** (biplot a la izquierda, puntuaciones a la derecha). Las dos primeras componentes principales (PC) explicaron el 88.5% de la varianza. Q1 y Y1 fueron las muestras más diversas dentro del conjunto de datos (áreas rojas en el gráfico de la derecha). Las muestras recolectadas a lo largo del río Tingo (áreas naranja; TR1 a TR3) se agruparon en el cuadrante VI, mientras que las tomadas a lo largo del río Ragra y el río San Juan (área amarilla; S1 a S4) fueron en general similares entre sí y con las aguas potables (áreas azules).



**Figure A2. Cambios en la concentración de metales pesados disueltos a lo largo del río Tingo de 2022 a 2024.** Las distancias desde el manantial se estimaron usando la herramienta de medición en Google MyMaps. Los datos de años anteriores se tomaron de los informes de las campañas de muestreo de 2022<sup>12</sup> y 2023<sup>13</sup>. El berilio, el mercurio y el cromo nunca fueron detectados.