






Variation in the concentration of heavy metals due to rains and floods in the Rimac river basin, Lima-Peru

Mariana Alexandra Diaz Crespo¹ , Silvia Rocío Blas Cadillo² , Shirley Alexandra Gonzales Baldeon³ , Nicole Stefany Damián Esperilla⁴  and Ulises Francisco Giraldo Malca, Magister⁵ 
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ, u202018220@upc.edu.pe¹, u202011310@upc.edu.pe²,
u201920135@upc.edu.pe³ u201920703@upc.edu.pe⁴, pcigugir@upc.edu.pe⁵

Abstract – The urban agglomeration of Lima and Callao is the second largest city in the world located in a desert, and its supply depends on three small rivers, the Rímac River being the one with the greatest water supply, affected by contamination by mining tailings, sewage and Solid waste. In order to know the climatological and hydrographic conditions that favor the concentration of heavy metals in the water, the relationship between rainfall, water discharges and concentration of aluminum, cadmium, iron and lead in the Rimac River hydrographic system in the period 2018 – 2021. For which data processing was carried out from six meteorological stations, a water quality monitoring point and four limnometric stations, through dynamic tables. As a result, it was found that the concentration of heavy metals is higher in the lower basin when rainfall and river level increase in localities of the Alto Rímac sub-basin, which presents intense mining activity, unlike the Santa Eulalia sub-basin. river where there are no large-scale mining operations, whose records present weaker relationships with the concentration of heavy metals. In conclusion, the highest concentration of heavy metals in the lower basin occurs during the months with the most intense rains in the headwaters of the basin, as the dragging capacity increases during the flooding of rivers and streams, allowing concentrations to exceed up to 120 times the quality standards for the production of drinking water.

Keywords: mining contamination, basin, trace metals, wet season, EQS.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Variación de la concentración de metales pesados por precipitaciones y avenidas en la cuenca del río Rímac, Lima-Perú

Mariana Alexandra Diaz Crespo¹, Silvia Rocío Blas Cadillo², Shirley Alexandra Gonzales Baldeon³, Nicole Stefany Damián Esperilla⁴ and Ulises Francisco Giraldo Malca, Magister⁵
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ, u202018220@upc.edu.pe¹, u202011310@upc.edu.pe², u201920135@upc.edu.pe³, u201920703@upc.edu.pe⁴, pcigugir@upc.edu.pe⁵

Resumen – La aglomeración urbana de Lima y Callao es la segunda ciudad más grande del mundo ubicada en un desierto, y su abastecimiento depende de tres pequeños ríos, siendo el río Rímac el de mayor aporte hídrico, afectado por la contaminación por relaves mineros, aguas servidas y residuos sólidos. Con el fin de conocer las condiciones climatológicas e hidrográficas que favorecen la concentración de metales pesados en el agua, se identificó la relación entre precipitaciones, descargas hídricas y concentración de aluminio, cadmio, hierro y plomo en el sistema hidrográfico del río Rímac en el periodo 2018 – 2021. Para lo cual se realizó el procesamiento de datos de seis estaciones meteorológicas, un punto de monitoreo de calidad de aguas y cuatro estaciones limnimétricas, mediante tablas dinámicas. Como resultado, se halló que la concentración de los metales pesados es mayor en la cuenca baja cuando se incrementan las precipitaciones y el nivel del río en localidades de la subcuenca del Alto Rímac, que tiene una intensa actividad minera, a diferencia de la subcuenca del río Santa Eulalia donde no hay operaciones mineras de gran envergadura, cuyos registros presentan relaciones más débiles con la concentración de metales pesados. En conclusión, la mayor concentración de los metales pesados en la cuenca baja ocurre durante los meses de lluvias más intensas en las cabeceras de la cuenca, al incrementar la capacidad de arrastre durante las avenidas de ríos y quebradas, permitiendo que las concentraciones superen hasta en 120 veces los estándares de calidad para producción de agua potable.

Palabras clave: contaminación minera, cuenca hidrográfica, trazas de metales, estación húmeda, ECA.

I. INTRODUCCIÓN

La aglomeración urbana de Lima y Callao, capital del Perú, es considerada la segunda metrópolis más poblada del mundo ubicada sobre un desierto [1], que para el año 2017 concentraba 10'479,899 habitantes [2], representando aproximadamente un tercio de la población peruana [3]. Esta ciudad se ubica en el cono deyectivo de tres torrentosos ríos de pequeño caudal que descienden por la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes: el río Rímac con un caudal promedio anual de 30 m³/s; río Chillón con 8.2 m³/s; y Lurín con 5.2 m³/s [4]. En ese sentido, la población de Lima-Callao, y todas las actividades

económicas agropecuarias, industriales, mineras, de generación eléctrica, dependen casi en su totalidad del agua que proveen estos ríos (69% por el río Rímac, 20% por el río Chillón y 11% por el río Lurín) [5].

En nuestro planeta tan solo el 0.77% de aproximadamente 1,386 millones de km³ de agua, representa la disponibilidad de agua dulce para los seres humanos y ecosistemas terrestres fuera de casquetes glaciares [6], el cual viene siendo impactado por el rápido crecimiento poblacional de las ciudades, por su mayor demanda hídrica y el vertimiento de contaminantes al ambiente [7]. Según la Asociación para las Ciencias de Limnología y Oceanografía (*Association for the Sciences of Limnology and Oceanography - ASLO*) los ríos, sistemas de agua que fluyen cuesta abajo en las cuencas hidrográficas, indispensables para poblaciones humanas y ecosistemas, constituyen el 0.0002% de agua del planeta [8], lo que hace notar lo importante de su conservación y adecuada gestión.

No obstante, estos ríos son afectados por las actividades industriales y domésticas mediante descargas de aguas servidas y residuales, así como por residuos sólidos y otro tipo de vertimientos, que incorporan a su composición metales pesados, residuos químicos y biológicos, material particulado, entre otras sustancias que ponen en riesgo la salud de la población, los ecosistemas y las actividades agropecuarias que usan el agua a lo largo de todo su curso [9]. Un estudio reciente estima que alrededor de 359 mil millones de m³ de aguas residuales se generan en el mundo al año y el 48% es vertido al ambiente sin tratamiento alguno [10]. Asimismo, los residuos sólidos son considerados un problema creciente para el medio ambiente, ya que su gestión inadecuada conlleva a que sean dispuestos en vertederos a cielo abierto, lo que provoca la contaminación de los recursos acuáticos cercanos por escorrentía o infiltración de lixiviados [11]. En 2018 se reportó que el mundo genera aproximadamente 2.01 billones de toneladas de residuos sólidos municipales al año, de los cuales, el 33% termina en botaderos abiertos sin el manejo seguro para el ambiente [12]. Además, la actividad minera, al ser una de las actividades más impactantes, altera la calidad de los ríos del mundo con el vertimiento de relaves, como en el año 2022 el *Global Tailing Review* estimó que la producción de estos residuos superaba los 14 mil millones de toneladas métricas por año [13], enfatizando que la ocurrencia de derrames está asociada al deficiente manejo de relaves, fenómeno bastante

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

frecuente en países andinos como el Perú. Estas actividades degradan la calidad de las fuentes de agua, que, de no ser tratadas, no son aptas para el consumo humano, la agricultura, la ganadería, la acuicultura y la pesca [14].

Los metales pesados como el aluminio (Al), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni), plata (Ag), plomo (Pb) y zinc (Zn) son los principales contaminantes generados por la minería [15]. Se ha identificado que los relaves mineros son una fuente significativa de estos metales y su liberación al medio natural supone un riesgo alto debido a su naturaleza móvil, acumulativa, tóxica, y de biodisponibilidad [16]. Así, los efluentes de la actividad minera, concentrada principalmente en la parte alta de las cuencas hidrográficas, son una amenaza para la calidad del agua, ante la posibilidad de introducir, verter o aumentar la concentración de sustancias minerales extrañas al medio acuático, que alteran sus propiedades fisicoquímicas y/o biológicas, llegando en ocasiones a superar los estándares de calidad ambiental (ECA) y límites máximos permisibles (LMP), establecidas por las instituciones y entidades competentes a nivel nacional e internacional [17], [18].

Las aguas residuales industriales y domésticas se distinguen como una de las mayores contribuyentes de metales pesados, desechos fecales, compuestos nitrogenados, hidrocarburos y otros desechos al curso de los ríos [19], [20]. Estos efluentes provienen de industrias de minería, chapado, galvanizado, fundición, aleación, curtiduría, electrónica, petroquímica, textilera y producción de pesticidas [21]. En América Latina y el Caribe (LAC), las descargas se producen diariamente desde las ciudades y sin monitoreo permanente, lo que representa un gran peligro, dado que impactan al 35.1% de todos los recursos hídricos renovables a nivel mundial [22]. Una revisión realizada en LAC reporta que cuarenta estuarios están contaminados con Cd, Cu, Cr, Hg, Ni y Pb en sedimentos, y en conformidad con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (*United States Environmental Protection Agency - USEPA*) son los metales pesados que más impacto provocan en la salud humana [23]. Los sedimentos se comportan como sumidero de metales pesados en los ambientes acuáticos y acondicionan su acumulación y transporte, si las condiciones del río varían, los metales pueden suspenderse en la superficie del agua mezclándose con otras sustancias y contaminando todo a su paso [24], [25].

En Ghana, la cuenca del río Pra suministra agua a 43 distritos del país mediante 9 embalses artificiales, donde el 42% de hogares no cuenta con servicio de agua potable, más aún, el río Pra es fuente fundamental para la generación de energía hidráulica y el desarrollo de la agricultura. Sin embargo, las minas ilegales están dispersas por toda la cuenca, y contaminan el río con metales pesados, especialmente con el Pb (único metal que superó el umbral de calidad), siendo un problema de salud pública para las comunidades que dependen del río para el consumo de agua o para la pesca [26]. Por otro lado, en Corea del Sur, la rápida industrialización y urbanización ha logrado

impactar negativamente el recurso hídrico más grande del país, el sistema hidrográfico de la cuenca del río Han, el cual abastece de agua a cerca de 26 millones de personas en Seúl, su capital y metrópoli más grande, y Gyeonggi-do [27]. Las descargas residuales industriales en la cuenca del río Han contienen altas trazas de metales pesados y compuestos orgánicos, donde el Cr se encuentra en mayor cantidad que otros metales, por lo que es un peligro potencial para la salud de los ecosistemas y personas. Estos hechos demuestran que los metales pesados como contaminantes están presentes en distintas fuentes puntuales y no puntuales, pero en concentraciones mayores a lo permitido repercuten negativamente en la calidad de los cuerpos de agua.

El Ministerio del Ambiente de Perú (MINAM), en 2017, identificó 2,658 fuentes de contaminación en los ríos, de las cuales 682 corresponden a pasivos ambientales mineros [28]. En 2016, según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), de un total de 159 cuencas hidrográficas del territorio nacional, 129 se encuentran contaminadas con presencia de coliformes fecales y metales pesados, producto de operaciones mineras, el vertimiento de aguas residuales y deficiente disposición final de residuos sólidos [29]. En los ríos de la vertiente del Pacífico, los metales que llegan a exceder el ECA de agua son Al, arsénico (As), hierro (Fe), manganeso (Mn) y Pb, superior a la que registran otras vertientes [30].

La parte alta de la cuenca del río Rímac, ubicada en el sistema hidrográfico de la Costa, es afectada principalmente por relaves mineros producto de la explotación de depósitos o yacimientos polimetálicos que se ha desarrollado desde inicios del siglo XX, con escasa supervisión y fiscalización [31]. La cuenca alta presenta recursos hídricos no aptos para el consumo humano a causa de que se vierten directamente los efluentes mineros a los ríos y quebradas, lo que, en épocas de avenida, arrastran los metales pesados hacia la zona inferior de la cuenca [32], [33]. Además, durante su recorrido el río Rímac recibe efluentes domésticos e industriales convirtiendo así el agua en insalubre por la alta concentración de sustancias nocivas, lo que dificulta y encarece su tratamiento para el suministro de agua potable a la población de la aglomeración urbana de Lima y Callao en las plantas potabilizadoras de La Atarjea y Huachipa [34].

Con el fin de aportar a una mejor gestión del recurso hídrico al interior de la cuenca hidrográfica del río Rímac se considera necesario conocer las condiciones climatológicas que favorecen el arrastre de contaminantes desde sus fuentes hacia la cuenca baja donde se ubica la aglomeración urbana de Lima y Callao, así como las condiciones de los ríos en los que contaminantes pueden incrementar o disminuir sus concentraciones. En ese sentido, el presente artículo tiene como objetivo identificar la relación entre la dinámica de las precipitaciones, descargas hídricas y la variación de concentraciones de metales pesados en el sistema hidrográfico del río Rímac en el periodo 2018 - 2021.

II. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Rímac, se extiende sobre la vertiente occidental de la Cordillera Central de los Andes y desemboca en el océano Pacífico [35], situada en las provincias de Huarochirí, Lima y Callao, entre las coordenadas geográficas 11°27'12" S - 12°10'39" S; y 76°03'02" O - 77°09'57" O; con una altitud que llega hasta los 5655 m s.n.m. [36], un área de 3,485 km² y una longitud de 134 km (**Figura 1**).

La cuenca presenta diferentes climas, de acuerdo con los pisos altitudinales que tienen en su territorio, las que se pueden caracterizar a partir de los datos de las estaciones meteorológicas ubicadas en su interior (**Figura 1**). Según la clasificación climática de Thornthwaite, la estación meteorológica automática (EMA) Von Humboldt ubicada a una altura de 247 m s.n.m y la EMA Ñaña ubicada a una altura de 553 m s.n.m, tienen un clima árido, con nulo exceso de agua, mesotérmica templada cálida, y con 37.3% - 35.6% de concentración de la eficiencia térmica en verano (E d B'3 a'). La EMA Matucana ubicada a una altura de 2,421 m s.n.m., muestra un clima semiárido seco, con pequeño exceso de agua, mesotérmica templada fría y con 22.4% de concentración de la eficiencia térmica en verano (D d B'2 a'). La EMA Santiago de Tuna ubicada a una altura de 2,926 m s.n.m. y la EMA San Mateo de Otao ubicada a una altura de 3,506 m s.n.m., tienen un clima semiárido seco, con pequeño exceso de agua, mesotérmica semi fría, y con 23.7% y 24.2% de concentración de la eficiencia térmica en verano (D d B'1 a'). Finalmente, la EMA Casapalca ubicada a una altura de 4,294 m s.n.m., presenta un clima húmedo, con nula o pequeña deficiencia de agua, micro térmica fría moderada y con 25.3% de concentración de la eficiencia térmica en verano (B3 r C'2 a').

En ese sentido, según el Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín, las precipitaciones en la cuenca del río Rímac tienen una dinámica variada respecto a la elevación de sus diferentes sectores, es decir, la intensidad de las precipitaciones se incrementa en las partes altas, y se reduce hacia las zonas más bajas [37]. Esto se observa en los registros de la EMA Casapalca, Matucana, San Mateo de Otao y Santiago de Tuna ubicadas a mayor altitud, reportando mayor cantidad de lluvias a diferencia de las EMA Von Humboldt y Ñaña, que se encuentran en altitudes menores, con precipitaciones muy escasas.

Los principales afluentes del río Rímac son los ríos: Santa Eulalia, Parac-Blanco, Blanco, Alto Rímac, la Quebrada Parac y Santa Eulalia Parac [38]. Actualmente, un 80% de las aguas superficiales de la cuenca son utilizadas para el abastecimiento de su población y lo restante para actividades agrícolas, mineras, industriales y otros, mientras que sus aguas subterráneas, un 69% son destinadas para uso poblacional, 18% para uso industrial y 13% para uso doméstico [38]. Según el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), existen aproximadamente 27 operaciones mineras en toda la extensión de la cuenca, de las cuales 7 son minas en operación, 10 minas cerradas o abandonadas y 7 concentradoras, siendo los principales centros mineros y pasivos ambientales: Caridad,

Lichicocha, Venturosa (Subcuenca Santa Eulalia), Casapalca, Cocachacra, Coricancha, Millontingo, Pacococha y Tamboraque (Subcuenca Alto Rímac) [35]. Además, en San Mateo de Otao existen 7 pasivos mineros ambientales de prioridad muy alta de la ex unidad minera Farrallon [39]. Adicionalmente, de acuerdo con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la actividad agrícola en la cuenca alta del río Rímac consume 105'150,000 m³ de agua superficial, mientras que las hidroeléctricas utilizan 788'802,400 m³ de agua [40]. De estas actividades se generan descargas de aguas residuales en distintos puntos de la cuenca del río Rímac.

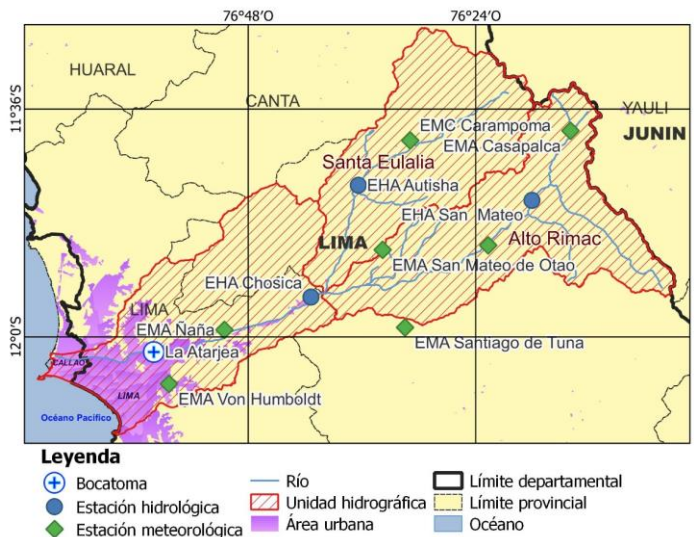


Fig. 1 Mapa de unidades hidrográficas, estaciones meteorológicas, estaciones hidrológicas y bocatoma de La Atarjea.

III. MÉTODOS

A. Búsqueda y análisis de información bibliográfica

La presente investigación es cuantitativa de tipo exploratorio y correlacional, desarrollada por medio de técnicas computacionales y estadísticas. Se buscó información en múltiples bases de datos, las cuales permitieron el acceso a libros virtuales, informes institucionales, tesis, y revistas reconocidas que brindaron artículos relevantes, de confianza y calidad. De la misma manera, se obtuvo estudios provenientes de instituciones competentes en la gestión y calidad del agua, tales como la ANA, el SENAMHI, Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), MINEM, MINAM, entre otros.

B. Sistematización y procesamiento de data meteorológica.

Para la caracterización de climas y la estimación de precipitaciones anuales en el área de estudio, se descargó la data de siete EMA (con registro de datos por hora), complementadas con la data de una estación meteorológica convencional (EMC - de registro diario), disponibles en la plataforma web del SENAMHI (organismo técnico competente y especializado en el monitoreo meteorológico de Perú), elegidas por estar

ubicadas dentro del área de estudio, en diferentes pisos altitudinales, con data completa para el periodo de enero de 2018 a diciembre de 2021, que coincide con la disponibilidad de data de monitoreo de concentraciones de metales pesados en las aguas del río Rímac. Seguidamente se sistematizó la data de cada estación en una hoja de cálculo en el software Microsoft Excel y se procesó mediante la aplicación de tablas dinámicas. Con ello se obtuvo la temperatura media mensual y anual, así como las precipitaciones anuales y el promedio de precipitaciones mensuales. Con los datos obtenidos se aplicó el sistema de clasificación climática propuesto por Charles Warren Thornthwaite para caracterizar el clima correspondiente a cada EMA.

C. Sistematización y procesamiento de data hidrológica

Para conocer la dinámica de los principales ríos de la cuenca, se descargó la data de las estaciones hidrológicas automáticas (EHA) disponibles en la plataforma web del SENAMHI, correspondientes a las localidades de Autisha (subcuenca Santa Eulalia), San Mateo (subcuenca Alto Rímac) y Chosica (intercuenca Bajo Rímac). El registro de datos del nivel del agua de río de las EHA se realizó por horas. Los datos se sistematizaron en hojas de cálculo del software Microsoft Excel, y procesadas en tablas dinámicas. Con ello se determinó el promedio mensual del nivel limnimétrico de cada río, así como los valores máximos que presentaron en cada uno de los meses del periodo de análisis.

D. Correlación de variables analizadas

Tras una búsqueda de informes de concentración de los metales pesados presentes en la cuenca del río Rímac en plataformas web de instituciones del gobierno peruano, se obtuvo reportes mensuales en el Informe Técnico de Estadísticas Ambientales del INEI [41], que registra los valores promedio mensuales y máximos de las concentraciones que presentan los parámetros de Al, Cd, Fe y Pb, medidos por el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima en el punto de monitoreo Bocatoma La Atarjea ubicado en el curso bajo del río Rímac, en las coordenadas 12°01'34.53" S y 76°57'57.96" O, correspondiente a la principal planta de tratamiento de agua potable de la aglomeración urbana de Lima y Callao.

Seguidamente, se realizó correlaciones de tipo lineal entre las concentraciones mensuales de cada metal pesado con el total de las precipitaciones mensuales correspondientes de las EMA Casapalca, San Mateo (cuenca alta del río Rímac) y EMC Carampoma (cuenca alta del río Santa Eulalia), así como con los niveles limnimétricos de los ríos Santa Eulalia y Alto Rímac, para determinar cuál de estos cursos de agua sería el principal aportante de los metales pesados que llegan a la aglomeración urbana de Lima y Callao en la cuenca baja.

IV. RESULTADOS

Tras procesar y analizar las variables de estudio, contrastándolas entre sí, en todos los casos se observa que la

concentración de los metales pesados en las aguas del río Rímac presenta sus valores más elevados en los meses de la estación húmeda para los andes peruanos (diciembre-marzo), y registrando sus valores más bajos entre los meses de estiaje (mayo – noviembre).

En el caso de la concentración del Al, Cd y Fe, se puede apreciar que, en los meses de lluvias, sus valores se incrementan de forma similar en los 4 años de análisis, a diferencia del Pb que registra valores extraordinarios en diciembre de 2019 (1.6 mg/L) y febrero de 2020 (6 mg/L), mientras que en los meses restantes no excede la concentración máxima de 1 mg/L (**Figura 2**).

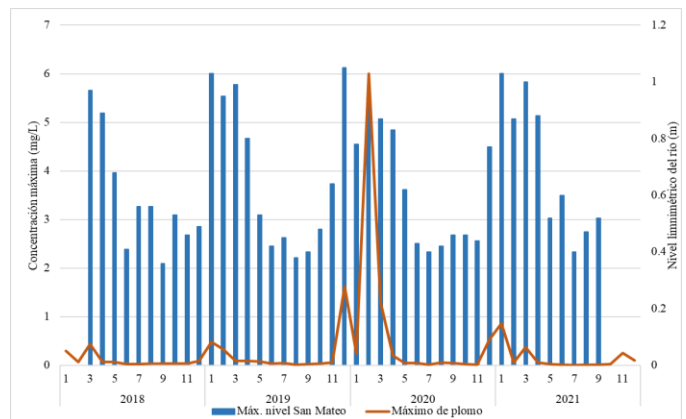


Fig. 2. Evolución de la concentración máxima de Pb mensual y nivel máximo del río Rímac en la EHA San Mateo.

En la estación lluviosa comprendida entre diciembre de 2019 y marzo de 2020 se registraron los promedios mensuales más altos de las concentraciones del Cd, Fe y Pb, y en el caso del Al es el segundo registro más alto pero muy próximo al valor más elevado (**Tabla 1**). Asimismo, los registros máximos para cada parámetro se presentaron en: febrero de 2019 para el Al con 82.33 mg/L; en febrero del 2020 para el caso del Pb con 6.003 mg/L; en marzo de 2018 para el Cd con 0.064 mg/L; y diciembre de 2019 para el Fe con 94.22 mg/L, observándose que en todos los casos se superó el ECA menos exigente para consumo humano, correspondiente a aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado.

La concentración promedio de Al excedió el ECA A3 (5 mg/L) en los meses de lluvias (diciembre –Marzo) de todos los años analizados, llegando a ser la concentración máxima hasta 16 veces el valor de referencia entre diciembre de 2018 y marzo de 2019 (**Tabla 1**). Un comportamiento semejante muestra las trazas de Fe, porque sus valores promedio de concentración en época húmeda exceden los ECA en los 4 años de análisis, llegando a ser su concentración máxima hasta 18 veces más alta que el valor del ECA A3 (5 mg/L) en el periodo de lluvias 2019-2020. Para el caso de la concentración promedio del Pb supera el ECA A3 (0.05 mg/L) en dos de las 4 estaciones húmedas (2019-2020 y 2020-2021), pero entre los meses de diciembre de 2019 a marzo de 2020, presenta registros máximos de hasta 120 veces el valor del mencionado ECA. Por último, el Cd muestra

concentraciones promedio que no superan el ECA A3 (0.01 mg/L), pero sus valores máximos alcanzan a ser hasta un séxtuplo del ECA en las estaciones húmedas de 2018 y 2019-2020.

TABLA I.
CONCENTRACIONES MENSUALES MÁXIMAS Y PROMEDIO DE METALES PESADOS EN LOS PERIODOS DE LLUVIA (DICIEMBRE-MARZO) PARA CADA AÑO DEL PERIODO DE ANÁLISIS.

	2018 (E/F/M)	2019 (D18/E/F/M)	2020 (D19/E/F/M)	2021 (D20/E/F/M)
Máximo Al (mg/L)	52.5800	82.3300	77.0000	42.6900
Promedio Al (mg/L)	5.8633	6.9100	6.7750	5.0050
Máximo Cd (mg/L)	0.0640	0.0200	0.0600	0.0210
Promedio Cd (mg/L)	0.0027	0.0028	0.0035	0.0025
Máximo Fe (mg/L)	56.3600	72.7400	94.2200	47.3800
Promedio Fe (mg/L)	6.1700	6.4980	8.0250	5.3450
Máximo Pb (mg/L)	0.4350	0.4840	6.0030	0.8640
Promedio Pb (mg/L)	0.0417	0.0483	0.1993	0.0518

Los resultados de las correlaciones entre la concentración de los metales pesados y los máximos niveles limnimétricos, muestran que los promedios de Al, Cd y Fe tienen una mayor relación con el nivel del río Rímac en la EHA San Mateo ($R^2 > 0.55$), superiores a los que registra la EHA Chosica ($0.31 < R^2 < 0.36$) y a la EHA Autisha ($R^2 < 0.27$) que reporta los valores más bajos. Asimismo, se identifica que el nivel de río Santa Eulalia en la EHA Autisha y la concentración de los metales presentan una relación poco marcada ($0.017 < R^2 < 0.268$), ejemplificado por los picos más altos que alcanza el Al, cuando el nivel limnimétrico del río presenta valores significativamente menores (1.52 m - 1.75 m) a sus máximas avenidas de hasta 3 metros de altura (Figura 3). Adicionalmente, no todos los valores máximos de Al muestran un pico en los meses que el río Santa Eulalia presenta sus máximos niveles, en ese sentido, se tuvieron las fuertes avenidas en enero de 2018, noviembre de 2018 y diciembre de 2018, meses en los que la concentración del metal es relativamente baja, y en los meses de febrero y diciembre de 2019, así como febrero de 2020, la concentración de Al alcanzó sus máximos registros y el nivel máximo del río no fue significativamente alto.

Para el caso de las precipitaciones, los resultados de las correlaciones con las concentraciones de los metales pesados muestran que se tiene una relación ligeramente mayor en la EMA Casapalca para el Fe ($R^2 > 0.54$), Cd ($R^2 > 0.33$) y Pb ($0.22 > R^2 > 0.10$), al que registra la EMA San Mateo de Otao (Fe: $0.51 > R^2 > 0.48$; Cd: $0.33 > R^2 > 0.16$ y Pb: $0.13 > R^2 > 0.05$) y la EMC Carampoma (Fe: $0.53 > R^2 > 0.48$; Cd: $0.34 > R^2 > 0.32$ y Pb: $0.17 > R^2 > 0.08$) (Tabla 2). Respecto a las concentraciones de Al, la EMA San Mateo de Otao presenta la mayor correlación ($R^2 > 0.53$), a diferencia de la EMA Casapalca ($0.52 > R^2 > 0.49$) y la EMC Carampoma ($0.51 > R^2 > 0.45$).

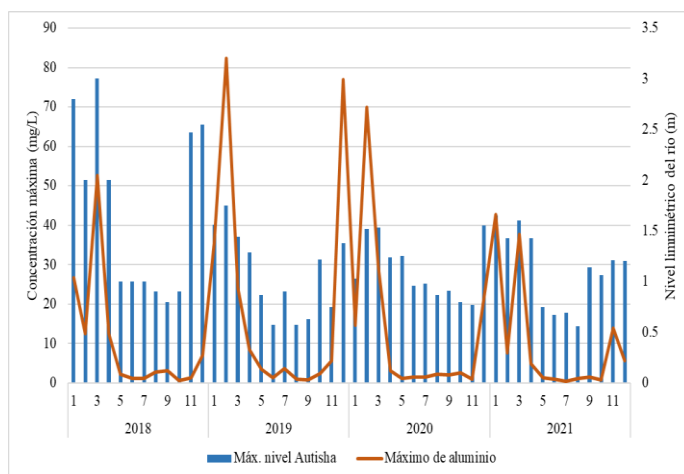


Fig. 3. Evolución de la concentración máxima de Al mensual y nivel máximo del río Santa Eulalia en la EHA Autisha.

Las concentraciones promedio de Fe y Al muestran los valores más altos de correlación con la precipitación mensual registrada en la EMA Casapalca, puesto que, en las épocas de lluvias de los 4 años de análisis, la concentración de los metales aumenta al segundo o tercer mes del inicio de las lluvias después de la época de estiaje (Figura 4). De igual forma, se tiene que la correlación entre las concentraciones de ambos metales y las precipitaciones en la estación de Casapalca son similares a ($R^2 = 0.548$ y $R^2 = 0.518$) lo que reafirma la relación que existe entre las variables (Tabla 2).

TABLA 2.
CORRELACIONES DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS, HIDROLÓGICAS Y METALES PESADOS

Variable de análisis	Precipitación EMA Casapalca	Máximo nivel EHA San Mateo	Promedio de nivel San Mateo	Precipitación EMC Carampoma	Máximo nivel Autisha	Promedio de nivel Autisha	Precipitación EMA San Mateo de Otao	Máximo nivel Chosica	Promedio de nivel Chosica
Máximo Al	0.492	0.575	0.466	0.451	0.238	0.146	0.531	0.340	0.318
Promedio Al	0.518	0.600	0.556	0.509	0.268	0.226	0.537	0.338	0.383
Máximo Cd	0.346	0.365	0.291	0.323	0.210	0.169	0.169	0.181	0.170
Promedio Cd	0.335	0.656	0.580	0.339	0.187	0.164	0.326	0.360	0.411
Máximo Fe	0.543	0.611	0.472	0.486	0.230	0.132	0.504	0.322	0.291
Promedio Fe	0.548	0.631	0.563	0.523	0.264	0.219	0.487	0.318	0.358
Máximo Pb	0.107	0.166	0.124	0.081	0.031	0.017	0.057	0.050	0.048
Promedio Pb	0.214	0.307	0.226	0.160	0.067	0.040	0.126	0.102	0.107

Además, se aprecia que los picos más altos de estas variables coinciden en la estación húmeda (diciembre – marzo), por ejemplo, en marzo de 2018 el Fe alcanza su concentración promedio más alta con 13.37 mg/L, el Al con 12.25 mg/L y la EMA Casapalca registra su precipitación más alta del año,

206.2 mm; en febrero de 2019, el Fe tiene 11.43 mg/L, el Al alcanza 13.4 mg/L y la EMA presenta 134.5 mm de precipitación; en diciembre de 2019, el Fe tiene 12.37 mg/L, el Al presenta 9.82 mg/L y la EMA presenta 149.3 mm de lluvia; en febrero de 2020, el Fe tiene 10.77 mg/L, el Al alcanza 10.94 mg/L y la EMA presenta 128.8 mm de precipitación; por último, en enero de 2021, el Fe tiene 11.3 mg/L, el Al registra 10.27 mg/L con una precipitación mensual de 196.5 mm, el máximo registro de dicho año.

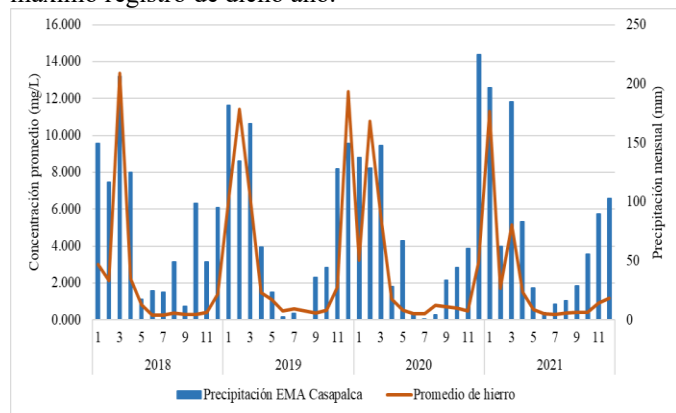


Fig. 4. Evolución de la concentración promedio mensual de Fe y precipitación promedio en la EMA Casapalca.

Las concentraciones de Cd registran valores intermedios en las correlaciones realizadas con las precipitaciones, en relación con los valores más elevados (Fe y Al) y los más bajos (Pb), con regresiones que fluctúan entre 0.35 y 0.16. Pero, curiosamente registran las correlaciones más altas de todo el análisis para el nivel máximo y promedio de la EHA San Mateo con el promedio de concentración del metal (0.66 y 0.58). Asimismo, en su relación con las precipitaciones de la estación meteorológica convencional (EMC) Carampoma (**Figura 5**) presenta correlaciones relativamente débiles ($R^2 < 0.34$), al igual que con el nivel limnimétrico de la EHA Autisha ($R^2 < 0.17$). Finalmente, se observa que, para los valores de Cd, la media de la variación entre el resultado de regresión de las concentraciones máximas y las concentraciones promedio (0.13), en la mayoría de los casos, son significativamente mayores a las que presentan los resultados de los otros metales (0.05) (**Tabla 2**).

V. DISCUSIÓN

En el área de estudio, los valores más elevados de concentraciones de metales pesados se presentan en las épocas de avenida, relacionada con la dinámica climatológica de la Cordillera de los Andes, debido al arrastre y suspensión continua de estos contaminantes por efecto del incremento de las lluvias. En ese sentido, como afirma Im et al., las concentraciones de detección de la mayoría de compuestos nocivos son más altas en la estación húmeda que en la estación seca, lo que podría atribuirse al efecto de entrada de contaminantes no puntuales debido a la lluvia, en lugar del efecto de dilución que tendría un mayor volumen de agua [27].

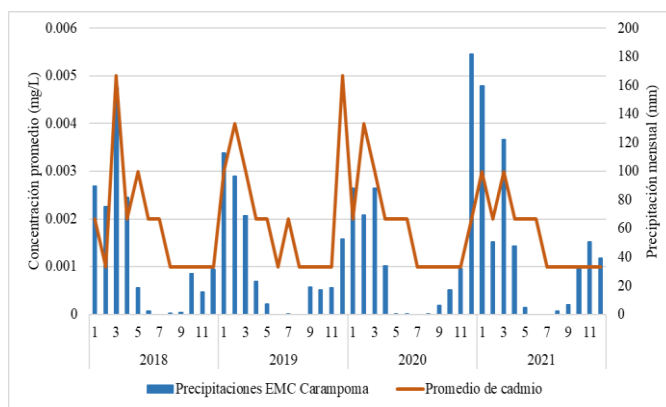


Fig. 5. Evolución de la concentración promedio mensual de Cd y precipitación promedio en la EMC Carampoma.

De igual forma, Yacoub precisa que, en temporadas de elevada descarga hídrica, aumenta el riesgo de dispersión de los metales a través de la cuenca, a causa de la cantidad de sedimentos atrapados en esta, que son re-suspendidos y transportados hacia nuevas locaciones [42]. Asimismo, lo reportado por Díaz et al. puede explicar nuestros hallazgos, al reconocer la influencia de las épocas de lluvia en la suspensión continua de los metales, puesto que facilita su arrastre por escorrentía superficial hasta su desembocadura o su utilización por las actividades y los habitantes de las zonas aledañas [43].

Según los resultados, la EMA Casapalca registra los valores de relación más elevados entre la precipitación y la concentración de metales pesados en el río Rímac, superior al que registran otras estaciones. Ello podría deberse a un mayor transporte por escorrentía superficial en la estación húmeda de contaminantes presentes en los relaves mineros mal dispuestos y desagües domésticos [4]. Un patrón similar se presentaría para la EMA San Mateo de Otao con correlaciones relativamente altas para el Al y el Fe, que se debería a su ubicación en la subcuenca del Alto Rímac y porque presentaría posible aporte de metales pesados desde los pasivos mineros ubicados en sus alrededores. Para el caso de la EMC Carampoma, muestra valores de correlación menores con la concentración de contaminantes en relación con la EMA Casapalca, que se debería a que la subcuenca del río Santa Eulalia (donde se ubica la estación) tiene como principal impacto a la calidad de sus aguas el vertimiento de residuos domésticos y efluentes de actividades agropecuarias.

Además, se tendría una mayor relación entre las concentraciones de los metales pesados y el nivel limnimétrico del río en la EHA San Mateo (**Figura 6**), debido a que las operaciones mineras principalmente se ubican en las cabeceras del río Alto Rímac, aguas arriba de la localidad de San Mateo, a diferencia del caso de la EHA Autisha (**Figura 7**), ubicada en la subcuenca del río Santa Eulalia, donde no se tendría actividad minera de gran envergadura ni de alto impacto, por ende cuando se tienen crecidas de los ríos al aumentar su capacidad de arrastre, el río Rímac en su curso alto estaría incorporando a su flujo residuos de la actividad minera, a diferencia del río santa

Eulalia que cuando presenta crecidas no tendrá la misma capacidad de aporte de metales pesados.

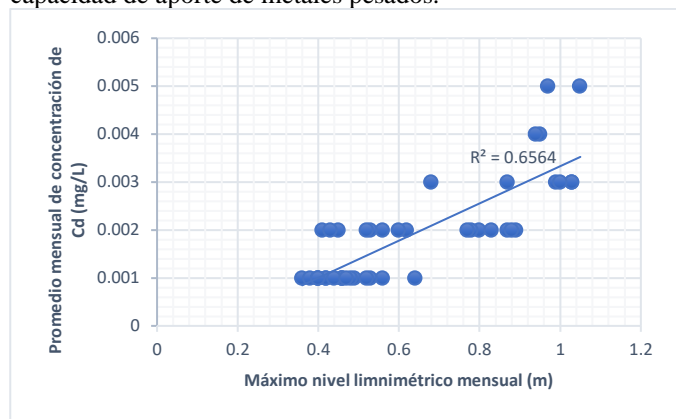


Fig. 6. Máxima correlación el nivel limnimétrico en la EHA San Mateo (río Alto Rímac) con la concentración de metales pesados.

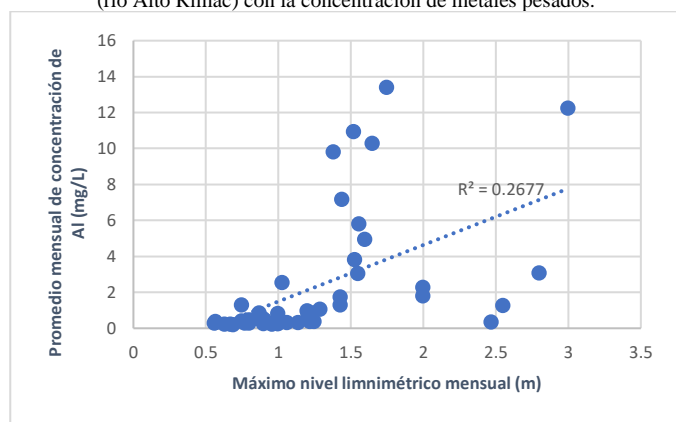


Fig. 7. Máxima correlación el nivel limnimétrico en la EHA Autisha (río Santa Eulalia) con la concentración de metales pesados.

Asimismo, la correlación entre los registros de la EHA Chosica (más próxima al punto de monitoreo de calidad de aguas) y la concentración de metales pesados, sería más baja que las relaciones con las estaciones de la subcuenca del Alto Rímac, debido a que la concentración es afectada por el aporte de agua y vertimientos de otras fuentes, como del mismo río Santa Eulalia, que alterarían la relación de mayor caudal - mayor concentración, porque eventualmente se presentan avenidas de ríos menos contaminados haciendo crecer el nivel limnimétrico en la EHA Chosica, pero registrando valores bajos de concentración de metales pesados en el punto monitoreo Bocatoma La Atarjea. En ese sentido, como enfatiza Zhang et al., para la movilidad de estos metales pesados o sustancias nocivas, los ríos son los principales medios de transporte hacia las áreas costeras, ya que los materiales son arrastrados desde la cuenca alta influenciada por la temporada de lluvias [44], [45]. En efecto, el nivel de los metales es más alto en tramos inferiores por sedimentación y otros efluentes perniciosos [46], lo que afecta continuamente la calidad del agua desde las locaciones mineras en Casapalca hasta la aglomeración urbana de Lima-Callao.

El transporte de metales pesados por las aguas del río Rímac, que muestra concentraciones de Al, Cd, Fe y Pb superiores al ECA de agua para consumo humano con tratamiento avanzado, se constituiría en un peligro para pobladores y ecosistemas de la cuenca baja, debido a la naturaleza de estos contaminantes que suelen acumularse en componentes naturales como sedimentos y la biota. Al respecto, Patel et al., indican que, el 99% de un contaminante se adhiere al sedimento convirtiéndolo en un sumidero para la contaminación secundaria del medio acuático y el resto permanece suspendido en el agua [43], pero cuando se presente una nueva avenida, los contaminantes se incorporarán nuevamente al flujo. Otra condición que justifica el arrastre de sedimentos con contaminantes es que el agua también contiene materia orgánica y esta es ligeramente superior en épocas de lluvias. El material húmico contenido en la materia orgánica está compuesto por ácidos húmicos y fúlvicos, los cuales favorecen la retención y adhesión de metales [43], con lo que, al incrementarse la carga de materia orgánica en una avenida, también lo hará la carga de metales pesados adherida a ella.

El alto contenido de metales pesados que registró el río Rímac se concentra exclusivamente al periodo de lluvias en las cabeceras de su sistema hídrico, y corresponderían al impacto de actividades mineras en la oxidación y lixiviación de minerales en la cuenca alta, pero durante la época de estiaje la concentración de estos contaminantes desciende hasta por debajo del ECA agua más exigente [32], [47]. En ese sentido, este mismo fenómeno se presentaría en la cuenca del río Pra, donde Duncan et al. afirman que los índices de calidad del agua son marginales a aceptables en la estación seca y mala en 26 de los 27 sitios analizados en la estación húmeda [26]. Sin embargo, es importante precisar, como lo indica Calla y Cabrera, que la contaminación por Fe y Al puede tener un origen natural, debido a la presencia de minerales ferromagnesianos (rocas rojizoviolácea) que componen secciones del cauce del río Rímac en el distrito de San Mateo, por lo que los iones de hierro pueden ser incorporados a la escorrentía superficial que se presenta en la cuenca [32]. Asimismo, la alta concentración del aluminio se debe en parte a su abundancia en la litósfera [48], sin embargo, el problema radica en que las intensas actividades industriales y agrícolas han alterado el equilibrio de su estado natural, de modo que ahora es considerado como un contaminante nocivo muy susceptible a movilizarse [49].

Los picos de concentración máxima de Al, Cd y Fe en diciembre de 2019 y febrero de 2020, así como la inusual concentración de Pb en los meses de febrero (6.003 mg/L) y marzo (1.298 mg/L) de 2020, coinciden con la reciente crisis sanitaria mundial por el brote del SARS CoV-2 o COVID-19, reportado desde diciembre de 2019, pero catalogado oficialmente como pandemia por la Organización Mundial de la Salud desde el 11 de marzo de 2020 [50]. Esta crisis pudo tener una repercusión en la economía y los sectores productivos que aún no se conocen bien, como una posible intensificación de la producción e impacto de la minería ante el atractivo

escenario de incremento de los precios de algunos metales, que normalmente ocurre en este tipo de crisis. Además, la pandemia dificultó el control ambiental de los organismos competentes, debido a la inamovilidad y otras medidas adoptadas frente al Estado de Emergencia Nacional dispuesto por el Gobierno Peruano, como lo evidenció el comunicado del 11 de mayo de 2020 del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental de Perú, que en cumplimiento del Decreto Legislativo N° 1500, exoneró a los administrados la obligación de presentar los reportes de monitoreo y cualquier otro tipo de información de carácter ambiental que implique trabajo de campo [51].

V. CONCLUSIONES

La mayor concentración de los metales pesados en las aguas del río Rímac se registran en los meses de la estación húmeda (diciembre - marzo), debido a la mayor capacidad de arrastre y suspensión continua de contaminantes que tiene la escorrentía superficial por efecto del incremento de lluvias. Por el contrario, en la época de estiaje, a pesar del menor volumen de agua, las concentraciones de metales pesados disminuyen significativamente porque se reduce la capacidad de arrastre de ríos y quebradas. Las correlaciones más fuertes de los datos de concentración de metales pesados son con los valores de precipitaciones y niveles limnimétricos que registran la EMA Casapalca y la EHA de San Mateo, debido a su ubicación en la subcuenca del Alto Rímac donde se tiene una actividad minera más intensa y una mayor producción de relaves, así como la presencia de pasivos ambientales mineros. Asimismo, los resultados de menor correlación se presentan con los datos de la EMC Carampoma y la EHA de Autisha, que se debería a su ubicación en la subcuenca del río Santa Eulalia, donde no se tienen minas de gran envergadura y las principales fuentes de contaminación son el vertimiento de residuos domésticos y efluentes de actividades agropecuarias. Por ello, en otros casos, este método podría ser aplicado para identificar preliminarmente los sectores de la cuenca a ser evaluados con prioridad, por ser más probable que contengan los agentes contaminantes que están afectando la calidad de las aguas de sus ríos.

La concentración de los metales pesados analizados, durante la estación húmeda, llegan a exceder los ECA de aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado (A3), superando los valores de referencia hasta en 16 veces en el caso del Al, 6 veces para el Cd, 18 veces para el Fe, y hasta 120 veces en el caso del Pb, constituyendo un peligro para pobladores y ecosistemas que dependen de las aguas del río Rímac, incrementando significativamente los costos en su tratamiento para el abastecimiento de la aglomeración urbana de Lima-Callao. En ese sentido, las entidades gubernamentales competentes deben asumir medidas más estrictas en el control de actividades que generan vertimientos con metales pesados en la subcuenca del Alto Rímac, que permitan reducir los altos índices de contaminación de la principal fuente de agua de la ciudad más poblada de la vertiente occidental sudamericana.

Es probable que exista alguna relación entre el inicio de la crisis sanitaria mundial por el SARS-CoV-2 COVID-19 y los registros máximos de concentración de metales pesados en el río Rímac entre los meses de diciembre de 2019 y marzo de 2020, especialmente en el caso del Pb que presentó un extraordinario incremento, que se debería a una actividad minera más intensa y el relajamiento de los mecanismos de control y fiscalización por parte de instituciones gubernamentales, fenómeno que debería ser estudiado a mayor profundidad en futuras investigaciones.

REFERENCIAS

- [1] A. Gómez-Lobo, M. Gutiérrez, S. Huamaní, T. Serebrisky, and B. Solís, "Reforma tarifaria e inclusión social: el caso de los subsidios en los servicios de agua y saneamiento en Lima y Callao," Washington D.C., Dec. 2021. doi: 10.18235/0003809.
- [2] INEI, *Perú: Perfil Sociodemográfico*. Lima: INEI, 2018. Accessed: Feb. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/libro.pdf
- [3] ANA, "Un tercio de la población de Lima se abastece gracias al río Rímac," ANA, Oct. 07, 2019. <http://www.ana.gob.pe/noticia/un-tercio-de-poblacion-de-lima-se-abastece-gracias-rio-rimac> (accessed Feb. 06, 2023).
- [4] ANA, "Estado Situacional de los Recursos Hídricos en las Cuenclas Chillón - Rímac - Lurín - 2017/2018," *Repositorio Digital de Recursos Hídricos*, Sep. 2020. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4742> (accessed Feb. 14, 2023).
- [5] OCDE, *Gobernanza del Agua en Perú*. París: OECD, 2021. doi: 10.1787/568847b5-en.
- [6] UNESCO, "Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015: agua para un mundo sostenible: resumen ejecutivo," UNESCO, 2015. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000232272_spa (accessed Feb. 06, 2023).
- [7] J. Melgarejo, "Congreso Nacional del Agua Orihuela. Innovación y Sostenibilidad," in *Congreso Nacional del Agua Orihuela. Innovación y Sostenibilidad*, Feb. 2019. doi: 10.14198/CONGRESO-NACIONAL-DEL-AGUA-ORIHUELA-2019.
- [8] ASLO, "Earth's Water Resources," 2019. <https://www.aslo.org/what-is-aquatic-science/earths-water-resources/> (accessed Feb. 10, 2023).
- [9] S. L. Wear, V. Acuña, R. McDonald, and C. Font, "Sewage pollution, declining ecosystem health, and cross-sector collaboration," *Biol Conserv*, vol. 255, p. 109010, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.BIOCON.2021.109010.
- [10] E. R. Jones, M. T. H. van Vliet, M. Qadir, and M. F. P. Bierkens, "Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse," *Earth Syst Sci Data*, vol. 13, no. 2, pp. 237–254, Feb. 2021, doi: 10.5194/ESSD-13-237-2021.
- [11] K. O. A. Amano, E. Danso-Boateng, E. Adom, D. Kwame, E. S. Amoamah, and E. Appiah-Danquah, "Effect of waste landfill site on surface and ground water drinking quality," *Water and Environment Journal*, vol. 35, no. 2, pp. 715–729, May 2021, doi: 10.1111/WEJ.12664.
- [12] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van, *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington: The World Bank, 2018. Accessed: Feb. 16, 2023. [Online]. Available: <https://olc.worldbank.org/system/files/What%20a%20Waste%202.0%20Overview.pdf>
- [13] C. Cacciuttolo and D. Cano, "Environmental Impact Assessment of Mine Tailings Spill Considering Metallurgical Processes of Gold and Copper Mining: Case Studies in the Andean Countries of Chile and Peru," *Water (Basel)*, vol. 14, no. 19, p. 3057, Sep. 2022, doi: 10.3390/w14193057.
- [14] J. Menéndez and S. Muñoz, "Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros," *PAIDEIA XXI*, vol. 11, no. 1, pp. 141–154, Jan. 2021, Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Paideia/article/view/3622/4588>

- [15] S. Kumar *et al.*, "Hazardous heavy metals contamination of vegetables and food chain: Role of sustainable remediation approaches - A review," *Environ Res*, vol. 179, pp. 1–26, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.envres.2019.108792.
- [16] P. Wang, Z. Sun, Y. Hu, and H. Cheng, "Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact," *Science of The Total Environment*, vol. 695, p. 133893, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893.
- [17] C. Salazar-Torres, I. Carbajal-Kam, G. Ponce-Ruiz, J. Lazo-Vilela, and E. Alva-Baltazar, "Environmental Impact of Mining Tailings in the Middle Basin of the Rimac River in Peru," *LACCEI*, no. 1, pp. 1–8, 2021, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.103.
- [18] Á. Canales-Gutiérrez, "Las cuencas hidrográficas y los relaves mineros," *Journal of the Selva Andina Biosphere*, vol. 9, no. 2, pp. 67–68, Nov. 2021, doi: 10.36610/JJSAB.2021.090200067.
- [19] S. E. Pabón, R. Benítez, R. A. Sarria, and J. A. Gallo, "Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión," *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 14, no. 27, pp. 9–18, Jul. 2020, doi: 10.31908/19098367.1734.
- [20] M. A. Agoro, A. O. Adeniji, M. A. Adefisoye, and O. O. Okoh, "Heavy Metals in Wastewater and Sewage Sludge from Selected Municipal Treatment Plants in Eastern Cape Province, South Africa," *Water 2020*, Vol. 12, Page 2746, vol. 12, no. 10, p. 2746, Oct. 2020, doi: 10.3390/W12102746.
- [21] N. A. A. Qasem, R. H. Mohammed, and D. U. Lawal, "Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review," *npj Clean Water 2021 4:1*, vol. 4, no. 1, pp. 1–15, Jul. 2021, doi: 10.1038/s41545-021-00127-0.
- [22] C. Rodríguez, B. García, C. Pinto, R. Sánchez, J. Serrano, and E. Leiva, "Water Context in Latin America and the Caribbean: Distribution, Regulations and Prospects for Water Reuse and Reclamation," *Water 2022*, Vol. 14, Page 3589, vol. 14, no. 21, p. 3589, Nov. 2022, doi: 10.3390/W14213589.
- [23] D. L. Gómez-Aguilar, J. P. Rodríguez-Miranda, and O. J. Salcedo-Parra, "Fruit Peels as a Sustainable Waste for the Biosorption of Heavy Metals in Wastewater: A Review," *Molecules*, vol. 27, no. 7, p. 2124, Mar. 2022, doi: 10.3390/molecules27072124.
- [24] M. M. Ali *et al.*, "Distribution of heavy metals in water and sediment of an urban river in a developing country: A probabilistic risk assessment," *International Journal of Sediment Research*, vol. 37, no. 2, pp. 173–187, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.IJSRC.2021.09.002.
- [25] Z. Huang, C. Liu, X. Zhao, J. Dong, and B. Zheng, "Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China," *Environmental Sciences Europe 2020 32:1*, vol. 32, no. 1, pp. 1–9, Feb. 2020, doi: 10.1186/S12302-020-00305-W.
- [26] A. E. Duncan, N. de Vries, and K. B. Nyarko, "Assessment of heavy metal pollution in the main Pra River and its tributaries in the Pra Basin of Ghana," *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 10, pp. 264–271, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.enmm.2018.06.003.
- [27] J. K. Im, H. R. Noh, T. Kang, and S. H. Kim, "Distribution of Heavy Metals and Organic Compounds: Contamination and Associated Risk Assessment in the Han River Watershed, South Korea," *Agronomy*, vol. 12, no. 12, p. 3022, Dec. 2022, doi: 10.3390/AGRONOMY12123022/S1.
- [28] MINAM, "Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM .- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias," *Sistema Nacional de Información Ambiental*, Jun. 07, 2017. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones> (accessed Feb. 06, 2023).
- [29] ANA, "Actualización de la disponibilidad hídrica y generación de escenarios climáticos para las cuencas del Pacífico," *Repositorio Digital de Recursos Hídricos*, 2016. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1928> (accessed Feb. 06, 2023).
- [30] ANA, "Monitoreo de los Recursos Hídricos en el Perú," ANA, 2015. <http://www.ana.gob.pe/gestion-agua/calidad/pagina/2> (accessed Feb. 06, 2023).
- [31] W. J. Díaz, "Contaminación del ecosistema en San Mateo de Huanchor por los pasivos ambientales minero metalúrgicos y su impacto en la salud de los pobladores," Maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 2016. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/5045>
- [32] H. Calla and C. Cabrera, "Calidad del agua en la cuenca del río Rimac, sector de San Mateo, afectado por las actividades mineras," *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, vol. 13, no. 25, pp. 87–94, Jul. 2010, doi: 10.15381/iigeo.v13i25.399.
- [33] ANA, "Monitoreo de la calidad del agua de la cuenca del río Rimac," Lima, Jun. 2012. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: http://siar.regionlima.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/prime_r_monitoreo_rima_2012-c0006_2012_ana_dgerh_jos.pdf
- [34] Defensoría del Pueblo, "Defensoría del Pueblo: urgen acciones estatales articuladas frente a la contaminación del río Rímac," *Defensoría del Pueblo*, Nov. 16, 2021. <https://www.defensoria.gob.pe/defensoria-del-pueblo-urgen-acciones-estatales-articuladas-frente-a-la-contaminacion-del-rio-rimac/> (accessed Feb. 11, 2023).
- [35] ANA, DCPRH, and ALA CHILLÓN RIMAC LURIN, "Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Río Rimac," Lima, Dec. 2010. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/ANA/Estudio_hidrologico_Cuenca_Rimac_volumen_I_texto_final_2010.pdf
- [36] ANA, "Delimitación de la faja marginal del río Rimac: Resumen ejecutivo," *Repositorio Digital de Recursos Hídricos*, 2019. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4441> (accessed Feb. 14, 2023).
- [37] Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín, "Diagnóstico Inicial para el Plan de Gestión de Recursos Hídricos de las cuencas Chillón, Rímac, Lurín y Chilca," Lima, 2019. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/3901/ANA002485_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [38] ANA and F. Dumler, "Una expresión local de los riesgos del agua: Retos y necesidad de un plan de acción colectiva sobre la cuenca del río Rimac," *Repositorio Digital de Recursos Hídricos*, Apr. 09, 2014. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2101> (accessed Feb. 14, 2023).
- [39] C. Rodríguez, "Estudio de caso de pasivos ambientales mineros en la región La Libertad/Perú: Las Relaveras de la Ciénaga/Pataz Gestión del Estado Peruano y Análisis Específico de Responsabilidad Histórica y Legal," Lima, 2018.
- [40] Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos Área de Aguas Superficiales, "Evaluación de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Rimac," 2010. Accessed: Feb. 16, 2023. [Online]. Available: http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/ANA/Estudio_hidrologico_Cuenca_Rimac_volumen_I_texto_final_2010.pdf
- [41] INEI, "Estadísticas Ambientales," INEI, 2022. <https://www.inei.gob.pe/biblioteca-virtual/boletines/estadisticas-ambientales/1/> (accessed Feb. 06, 2023).
- [42] M. Planas, "Estudio sobre metales pesados en la cuenca del Jequetepeque, Perú," Licenciatura, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2010. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/10583>
- [43] C. Díaz, J. M. Carrión, and J. L. González, "Estudio de la contaminación por Hg, Pb, Cd y Zn en la bahía de Chetumal, Quintana Roo, México," *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 72, no. 1, pp. 19–31, 2006, Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2006000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [44] J. N. Edokpayi, J. O. Odiyo, E. O. Popoola, and T. A. M. Msagati, "Evaluation of temporary seasonal variation of heavy metals and their potential ecological risk in Nzhelele River, South Africa," *Open Chem*, vol. 15, no. 1, pp. 272–282, Jan. 2017, doi: 10.1515/CHEM-2017-0033/DOWNLOADASSET/SUPPL/CHEM-2017-0033_SM.PDF.
- [45] R. M. Laino-Guanes, R. Bello-Mendoza, M. González-Espinosa, N. Ramírez-Marcial, F. Jiménez-Otárola, and K. Musálem-Castillejos, "Concentración de metales en agua y sedimentos de la cuenca alta del río

- Grijalva, frontera México-Guatemala,” *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 6, no. 4, pp. 61–74, 2015, Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v6n4/v6n4a4.pdf>
- [46] U. Chettri, T. K. Chakrabarty, and S. R. Joshi, “Pollution index assessment of surface water and sediment quality with reference to heavy metals in Teesta River in Eastern Himalayan range, India,” *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 18, pp. 1–9, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.enmm.2022.100742.
- [47] CMLT, “Estado de la calidad ambiental de la cuenca del lago Titicaca ámbito peruano,” 2014. Accessed: Feb. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.minam.gob.pe/puno/wp-content/uploads/sites/55/2014/02/ESTUDIO-DEL-ESTADO-DE-LA-CALIDAD-AMBIENTAL-CUENCA-DEL-TITICACA..pdf>
- [48] OMS, *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*, vol. 4. Ginebra: OMS, 2011. Accessed: Feb. 22, 2023. [Online]. Available: <https://bitly.co/7FYT>
- [49] M. Senze, M. Kowalska-Górska, and K. Czyż, “Availability of aluminum in river water supplying dam reservoirs in Lower Silesia considering the hydrochemical conditions,” *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 16, pp. 1–11, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.enmm.2021.100535.
- [50] OMS, “Cronología de la respuesta de la OMS a la COVID-19,” *OMS*, Jun. 29, 2020. <https://www.who.int/es/news/item/29-06-2020-covidtimeline> (accessed Feb. 22, 2023).
- [51] E. Olivera, “Fiscalización ambiental en tiempos de pandemia,” 2020. Accessed: Feb. 22, 2023. [Online]. Available: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1464485/Fiscalizacion%20ambiental%20en%20tiempos%20de%20pandemia.%20Seis%20casos%20de%20la%20regi%C3%B3n.pdf.pdf>