

Sensibilidad *in vitro* de *Gammarus pulex* a la exposición controlada de Sulfatos de Cobre y Aluminio

In vitro sensitivity of *Gammarus pulex* to controlled exposure to Copper and Aluminum Sulfates

Angel Virgilio Cedeño Moreira¹, Ketty Vanessa Arellano Ibarra¹, Cristhian John Macias Holguín¹, Daysi Katherine Puente Bosquez¹, Genesis Alondra Molina Sanchez¹, Pablo Cesar Ramos Corrales¹

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Autor de correspondencia: acedenom@uteq.edu.ec

Recibido: 4/10/2023. Aceptado: 14/01/2024

Publicado el 31 de enero de 2024

Resumen

Los ecosistemas acuáticos, vitales para la purificación del agua, la regulación climática y la preservación de la biodiversidad, se encuentran amenazados por la creciente liberación de contaminantes, entre los cuales destacan el sulfato de cobre y el sulfato de aluminio. Estos compuestos ejercen graves efectos en la salud de los organismos acuáticos y la integridad de sus nichos biológicos. Este estudio se enfoca en *Gammarus pulex*, un indicador altamente sensible de la contaminación en hábitats acuáticos. Para abordar esta investigación, se implementó una metodología rigurosa que abarcó desde el aislamiento y la identificación de individuos de *G. pulex* hasta su aclimatación y posterior exposición controlada a sulfato de cobre y aluminio. La evaluación integral de los efectos de esta exposición incluyó análisis morfométricos y poblacionales detallados. Los resultados revelaron que todas las concentraciones estudiadas de estos contaminantes provocaron reducciones significativas en el crecimiento de las poblaciones de *G. pulex*. Destacando, de manera preocupante, que el tratamiento con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ durante un período de exposición de 48 horas y a una concentración de 40 ppm resultó en una mortalidad del 100%. En conjunto, estos hallazgos subrayan la urgente necesidad de abordar la contaminación por sulfato de cobre y sulfato de aluminio en los ecosistemas acuáticos, reconociendo la vulnerabilidad de especies clave como *G. pulex*. La preservación de la salud de estas poblaciones y la conservación de la integridad de los ecosistemas acuáticos son esenciales para garantizar el funcionamiento adecuado y la sostenibilidad de estos valiosos hábitats.

Palabras clave: Vulnerabilidad; poblacionales; organismos; ecosistemas; preservación.

Abstract

Aquatic ecosystems, essential for water purification, climate regulation and biodiversity conservation, face increasingly worrying threats due to the release of contaminants, including copper sulfate and aluminum sulfate. These compounds, exert serious adverse effects on the health of aquatic organisms and the integrity of their biological niches. This study focuses on *Gammarus pulex*, a highly sensitive indicator of pollution in aquatic habitats. To address this research, a rigorous methodology was implemented that ranged from the isolation and identification of *G. pulex* individuals to their acclimatization and subsequent controlled exposure to copper and aluminum sulfate. Comprehensive evaluation of the effects of this exposure included in detailed morphometric and population analyses. The results revealed that all studied concentrations of these contaminants caused significant reductions in the growth of *G. pulex* populations. Noting, worryingly, that treatment with $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ during an exposure period of 48 hours and at a concentration of 40 ppm resulted in 100% mortality. Together, these findings underscore the urgent need to address copper sulfate and aluminum sulfate pollution in aquatic ecosystems, recognizing the vulnerability of key species such as *G. pulex*. Preserving the health of these populations and conserving the integrity of aquatic ecosystems is essential to ensure the proper functioning and sustainability of these valuable habitats.

Keywords: vulnerability; population; organisms; ecosystems; preservation

Introducción

Los ecosistemas acuáticos representan uno de los biomas más vitales de nuestro planeta, proporcionando servicios ecológicos cruciales como la purificación del agua, la regulación del clima y el sustento de una rica diversidad biológica (Buonocore *et al.*, 2021). Los océanos, en particular, funcionan como sumideros de carbono, absorbiendo grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico. Este proceso ayuda a mitigar el cambio climático al reducir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, además de influir en los patrones climáticos globales y locales. La influencia de los ecosistemas acuáticos en la regulación del clima se extiende a través de la evapotranspiración, la liberación de humedad y la formación de nubes, contribuyendo a la estabilidad climática en diversas regiones del mundo (Ferreira *et al.*, 2023; Assefa *et al.*, 2021).

Por otra parte, los ecosistemas acuáticos albergan una asombrosa diversidad biológica. Desde las diminutas fitoplancton y zooplancton que forman la base de la cadena alimentaria acuática, estos entornos son cunas de vida y esenciales para la subsistencia de numerosas especies, incluyendo al ser humano, que depende de los recursos acuáticos para alimentarse y para su sustento económico (Wei *et al.*, 2023). Sin embargo, estos entornos frágiles están bajo una creciente presión debido a la liberación de contaminantes de diversas fuentes antropogénicas, lo que amenaza su salud y estabilidad. Entre los contaminantes más preocupantes en ecosistemas acuáticos se encuentran el sulfato de cobre y el sulfato de aluminio, dos compuestos químicos utilizados extensamente en la agricultura y la industria (Gomes *et al.*, 2017).

El sulfato de cobre, un compuesto ampliamente utilizado en la agricultura y la industria, y el sulfato de aluminio, un fungicida de uso común en la agricultura, son responsables de una serie de problemas ambientales graves cuando son liberados en entornos acuáticos. Estos contaminantes pueden tener efectos adversos en la salud de los organismos acuáticos, alterando la dinámica de las poblaciones y afectando la calidad del agua en términos generales (Tleuova *et al.*, 2020; Solís, 2022).

La extensa aplicación de estos compuestos no está exenta de consecuencias ambientales significativas. Cuando estos productos químicos ingresan a los ecosistemas acuáticos, ya sea a través de la escorrentía agrícola, el lavado de equipos o las filtraciones industriales, su impacto puede ser profundo y sostenido. Los problemas ambientales que surgen de la liberación de sulfato de cobre y sulfato de aluminio son multifacéticos y abarcan una serie de ámbitos cruciales (Kirk y Andreescu, 2019).

Uno de los problemas más evidentes es el efecto adverso que tienen sobre la salud de los organismos acuáticos (Hadjipanagiotou *et al.*, 2020). La exposición a concentraciones elevadas de sulfato de cobre puede causar daño tóxico a los

tejidos, interferir con las funciones metabólicas y reducir la capacidad de los organismos para resistir enfermedades y depredadores. Por su parte, el sulfato de aluminio, aunque destinado principalmente a combatir hongos, puede tener impactos indirectos en otros componentes de los ecosistemas acuáticos al alterar la disponibilidad de recursos y, en última instancia, desencadenar efectos en cascada en las cadenas tróficas acuáticas (Izdihar *et al.*, 2023; Runkle *et al.*, 2017).

Estos contaminantes también pueden modificar drásticamente la dinámica de las poblaciones en ecosistemas acuáticos. La eliminación selectiva de especies sensibles o la proliferación de organismos resistentes pueden perturbar el equilibrio natural de los ecosistemas y llevar a cambios indeseados en la estructura y la función de la comunidad biológica (Anderson *et al.*, 2021).

Dentro de este contexto, el género *Gammarus*, y específicamente la especie *Gammarus pulex*, se ha destacado como un organismo indicador sensible a la contaminación en ecosistemas acuáticos. Los microorganismos de agua dulce del género *Gammarus* son crustáceos anfipodos que ocupan una posición crítica en las cadenas tróficas acuáticas, desempeñando un papel fundamental en la transferencia de energía y nutrientes en estos ecosistemas (Cikcikoglu *et al.*, 2022). Dada su posición ecológica y su alta sensibilidad a cambios en las condiciones del agua, *G. pulex* se ha convertido en un modelo valioso para el estudio de la toxicidad de contaminantes en ambientes acuáticos (Tatar y Türkmenoğlu, 2020; Serdar *et al.*, 2019).

El presente trabajo se centra en investigar la sensibilidad *in vitro* de *G. pulex* ante la exposición a dos de los contaminantes más prevalentes y preocupantes en ecosistemas acuáticos como son el sulfato de cobre y el sulfato de aluminio. A través de una serie de ensayos de laboratorio rigurosamente diseñados, se busca comprender en profundidad cómo estos contaminantes afectan a nivel morfológico y fisiológico a los individuos de *G. pulex*. Además, se pretende arrojar luz sobre la posible implicación de esta especie en la evaluación de la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos en presencia de estos contaminantes.

Este estudio se presenta como un paso crucial hacia una mejor comprensión de la respuesta de los organismos acuáticos a la contaminación y, en última instancia, hacia la formulación de estrategias más efectivas para la conservación y protección de nuestros valiosos ecosistemas acuáticos.

Materiales y métodos

Aislamiento de *Gammarus* sp.

Se colectaron y procesaron muestras de agua en un reservorio ubicado en el Campus La María de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, situado en el cantón Mocache, provincia de Los Ríos. Cada muestra tenía un volumen de 1 litro y fue cuidadosamente almacenada en recipientes de vidrio para su posterior transporte al Laboratorio de Biología y Microbiología

de la Facultad de Ciencias Pecuarias y Biológicas.

Las muestras fueron sometidas a un proceso de análisis individual, en el que se realizaron observaciones para identificar a los individuos adultos utilizando un estereomicroscopio de la marca Boeco, en una aproximación de aumento de 10x. Posteriormente, estos individuos fueron cuidadosamente separados y colocados en recipientes de vidrio que contenían agua de estanque previamente filtrada y esterilizada. A estos individuos separados se les proporcionó alimento en forma de extracto de levadura con una concentración de 0.5 g/L, y se los mantuvo bajo un fotoperiodo de 12 horas. Este procedimiento se llevó a cabo con el objetivo de preparar adecuadamente a los organismos para su posterior estudio y análisis en el laboratorio.

Análisis morfológico

Se realizaron mediciones morfológicas en individuos adultos con el propósito de caracterizar aspectos relacionados a su tamaño, forma y estructuras anatómicas. Además, se tomaron muestras aleatorias de la población para registrar datos biométricos, como la longitud corporal, el ancho de la cabeza, la longitud de los apéndices. Estos procedimientos analíticos permitieron la identificación precisa de la especie bajo estudio.

Evaluación de la dinámica de crecimiento con diferentes dietas alimenticias

Las poblaciones previamente establecidas e identificadas fueron sometidas a distintos regímenes de alimentación con el objetivo de optimizar su desarrollo y adaptabilidad. Para este propósito, se diseñaron tres dietas específicas: Dieta A, que consistió en harina de maíz 1g/L; Dieta B, que incluyó levadura de cerveza 0.20 g/L y espirulina 0.30 g/L; y Dieta C, que se basó en levadura de cerveza 0.25 g/L. Además, se incluyó un grupo de control que recibió agua de estanque sin adición de alimento.

A lo largo del estudio, se realizaron registros de datos de crecimiento en intervalos de tres días con el propósito de determinar la cantidad de individuos desarrollados, comenzando con una población inicial de 10 ejemplares de *G. pulex*.

Temperatura óptima de desarrollo

Una vez determinada la dieta óptima, se procedió a llevar a cabo un ensayo con el fin de determinar la temperatura óptima para el desarrollo poblacional de las cepas de *G. pulex*. Para este propósito, se seleccionaron 10 individuos adultos, los cuales fueron transferidos a contenedores de vidrio de 100 mL que contenían agua de estanque estéril. Además, se suministró una dieta compuesta por levadura de cerveza y espirulina en una concentración de 0.5 g/L.

Cada uno de los contenedores fue colocado en una cámara de incubación con una temperatura ajustada a 24, 28, 32, 36 y 40 °C, respectivamente. Se instaló un foco LED en la cámara de incubación para proporcionar un fotoperiodo de 12 horas.

El oxígeno fue suministrado mediante un aireador marca JAD con capacidad de 68 Lph, manteniendo los valores de oxígeno disuelto con valores superiores a 86%. El ensayo se llevó a cabo durante un período de 21 días, tras el cual se realizaron las evaluaciones del número de individuos juveniles y adultos.

Mortalidad de *G. pulex* expuesto a sulfato de cobre y Sulfato de aluminio

Para llevar a cabo el ensayo de mortalidad, se asignó un total de 40 individuos a cada tratamiento, distribuidos en 2 grupos compuestos por 20 individuos cada uno. Estos grupos fueron sometidos a una dieta que incluía levadura de cerveza a una concentración de 0.2 g/L y espirulina a 0.3 g/L a lo largo de todo el ensayo, iniciando esta alimentación 5 días antes de la aplicación de sulfato de cobre (CuSO_4) y sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

La metodología empleada en este estudio abordó la evaluación de concentraciones de contaminantes con incrementos de 5 partes por millón (ppm), abarcando un rango que se extendió desde 0 hasta 40 ppm. Posterior a la aplicación del tratamiento, se procedió a evaluar la mortalidad a las 24 y 48 horas. Esta evaluación consideró la inmovilidad de los individuos, la cual fue registrada después de la aplicación de punción con aguja para disección de punta recta, de la marca Euromex.

Cambios en la morfología de juveniles sobrevivientes

Selección de individuos adultos resistentes: Se eligieron cuidadosamente 20 individuos adultos pertenecientes a la población de estudio que sobrevivieron en presencia de concentraciones menores a 15 ppm de sulfato de cobre y sulfato de aluminio en un experimento piloto previo. Estos individuos fueron seleccionados al azar de la población total, asegurando una representación diversa de género y edad.

Período de recuperación: Tras su selección, los 20 individuos adultos se sometieron a un período de recuperación de 10 días en un ambiente controlado, libre de los contaminantes sulfato de cobre y sulfato de aluminio. Durante este período, se registraron observaciones regulares de su salud y comportamiento para asegurarse de que se recuperaran por completo de los efectos de la exposición previa a los contaminantes.

Exposición controlada: Después del período de recuperación, los individuos adultos fueron sometidos a una segunda exposición controlada, abarcando concentraciones entre 0 y 10 ppm de sulfato de cobre (CuSO_4) y sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). El propósito de esta segunda exposición fue iniciar la fase reproductiva de los individuos adultos y examinar los efectos derivados de una segunda exposición a cada contaminante.

Reproducción y seguimiento de generaciones sucesivas:

Luego de la exposición controlada a los contaminantes, se facilitó la reproducción natural de los individuos adultos bajo estricta observancia de los parámetros de alimentación y calidad del agua. Este régimen incluyó el suministro diario de levadura de cerveza a una concentración de 0.2 g/L y espirulina a 0.3 g/L. Además, se garantizó que los niveles de oxígeno en el agua superaran el 86% de saturación, manteniendo un pH constante de 6.7.

Se llevaron a cabo registros detallados sobre el tamaño y la morfología de los juveniles transcurridos 21 días desde la aplicación de los respectivos tratamientos, los cuales consistieron en la administración de Sulfato de Cobre y Sulfato de Aluminio en concentraciones que variaron de 0 a 10 ppm.

Resultados y discusión

Morfología

Los análisis morfométricos confirmaron que los organismos recuperados en el estudio pertenecen al género *Gammarus*. Además, las características morfológicas distintivas, incluyendo la disposición de las antenas, la morfometría de la cabeza, el abdomen y las patas, fueron consistentes con

la especie *G. pulex*, coincidiendo con las características reportadas por Pinkster (1983), quien señala que *G. pulex* es un crustáceo pequeño, con un cuerpo alargado y comprimido lateralmente que puede alcanzar longitudes de hasta unos 2 centímetros. Su forma es típica de los anfípodos, con una cabeza bien diferenciada, un tórax segmentado y un abdomen más largo.

Los individuos adultos de la población en estudio exhibieron un tamaño promedio de más de 12 mm, lo que resalta su estatus como adultos maduros de la especie *G. pulex*. Por otra parte, los individuos juveniles presentaron un tamaño promedio significativamente menor, registrando un promedio de 8 mm. Además, Scheepmaker (1987), señala que *G. pulex* es un crustáceo anfípodo pequeño que generalmente oscila entre 5 y 20 mm de longitud corporal, aunque pueden encontrarse variaciones en función de factores como la edad, el sexo, las condiciones ambientales y las interacciones ecológicas.

Estos hallazgos indican una diferencia marcada en el tamaño entre las dos etapas de desarrollo, destacando la relevancia de la morfometría en la diferenciación de las categorías de edad dentro de la población estudiada.

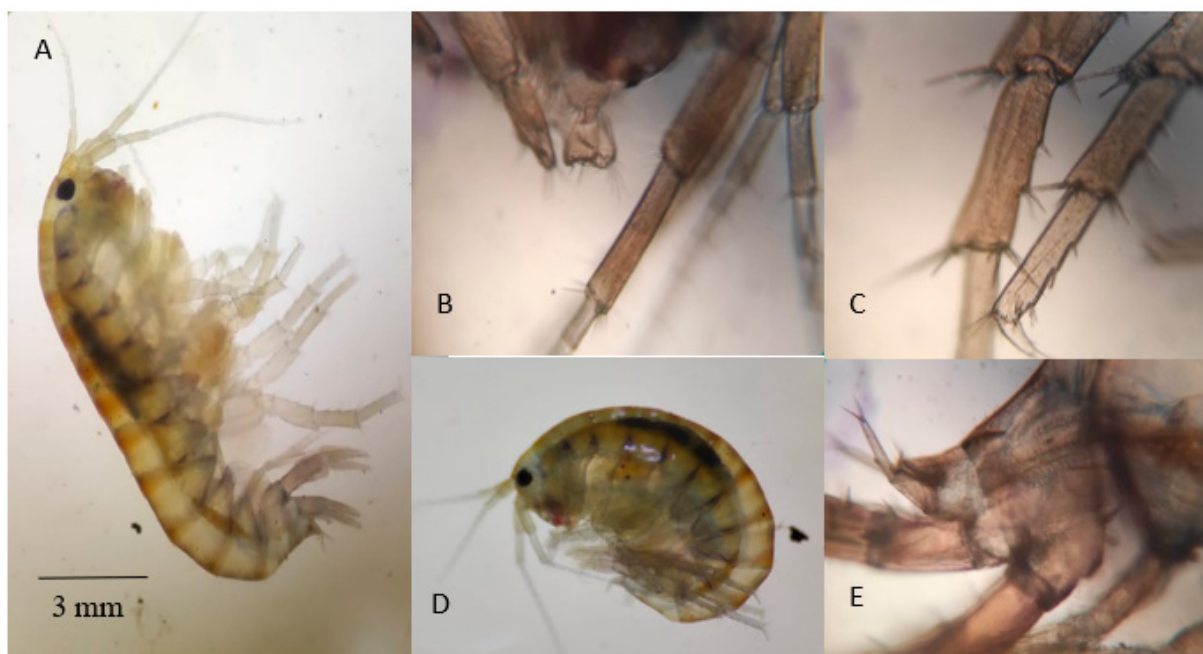


Figura 1. Caracterización morfológica de individuos adultos de *Gammarus pulex*; A) Macho adulto, B). Apéndices anteriores, C). Apéndices posteriores, D). Hembra adulta y E). Zona abdominal posterior

Evaluación de dinámica de crecimiento

Tas evaluar el impacto de distintas dietas en la población de *G. pulex* durante 21 días después del tratamiento inicial, los resultados revelan una tendencia en el aumento de la cantidad de individuos adultos (Figura 2).

Particularmente, la dieta B, que consistía en una combinación de levadura de cerveza 0,2 g/L y espirulina con una concentración de 0.3 g/L, incrementó notable la población de *G. pulex*. En este grupo, observamos un valor promedio de 61 individuos a los 21 días del tratamiento inicial.

La dieta C, que consistía exclusivamente en levadura de cerveza con una concentración de 0.25 g/L, mantuvo valores más bajos en cuanto a la cantidad de individuos adultos registrados. En este caso, alcanzamos un total de 21 individuos en el mismo período de tiempo.

Según Ashour *et al.* (2021), la alimentación es un factor crucial en el desarrollo de poblaciones de *G. pulex* y desempeña un papel significativo en su ecología y dinámica poblacional. Mientras tanto Yardy y Callaghan (2021), exponen que *G. pulex* es un crustáceo anfípodo que se alimenta principalmente de materia orgánica en descomposición, detritos vegetales y otros materiales orgánicos presentes en su entorno acuático.

Este análisis resalta la importancia de la dieta en la dinámica poblacional de *G. pulex* y destaca la influencia significativa de la composición y la concentración de la dieta en el éxito reproductivo de esta especie.

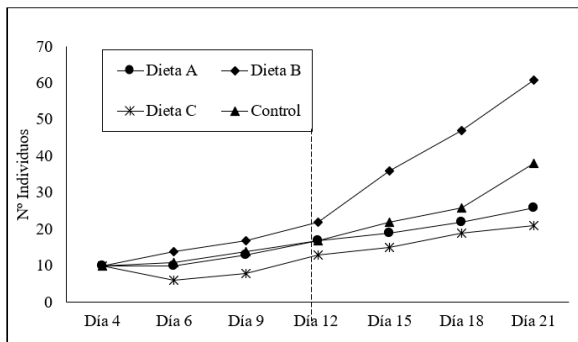


Figura 2. Dinámica de crecimiento de *Gammarus pulex* sometido a diferentes dietas orgánicas. Dieta A). Harina de maíz 1g/L; Dieta B). Levadura de cerveza y espirulina 0.5 g/L; Dieta C). Levadura de cerveza 0.25 y Control). Agua de estaqueo estéril

Rango óptimo de Temperatura

La temperatura de 28 °C, alcanzó un promedio de 65 especímenes de *G. pulex* en la etapa final de evaluación. En el ensayo también se logró evidenciar que el aumento de las temperaturas ejerció un efecto negativo en el desarrollo de la población de esta especie. En particular, a una temperatura de 40 °C, se comprobó una poblacional reducida, con tan solo 16 especímenes que evidenciaban un menor tamaño y una motricidad considerablemente reducida.

Huang *et al.* (2023), en sus estudios expone que el rango óptimo de desarrollo fue de 24°C coincidiendo con los datos reportados en el presente estudio. Mangold *et al.* (2022), señala que la temperatura tiene un impacto directo en la tasa de crecimiento y desarrollo de *G. pulex*. En general, a temperaturas más altas, estos crustáceos tienden a reducir su crecimiento desarrollarse más lento, lo que puede resultar en un mayor tiempo de la generación y una reducción en la tasa de reproducción.

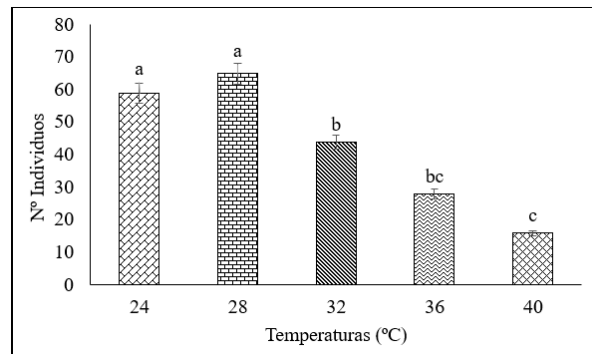


Figura 3. Crecimiento poblacional de *Gammarus pulex* sometido a diferentes temperaturas. Los valores con letras similares no presentan diferencias significativas al nivel de (Tukey $p \leq 0.05$). Las barras indican la DE (Desviación estándar) para cada tratamiento

Exposición a contaminantes

La exposición prolongada de *G. pulex* al sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ durante un período promedio de 48 horas evidenció una elevada mortalidad en todas las concentraciones probadas, que oscilaron entre 5 y 40 ppm, alcanzando una mortalidad máxima del 100% en su concentración más alta. Cuando la exposición a $Al_2(SO_4)_3$ fue por 24 horas, se observó una menor mortalidad, con un promedio del 89% en la concentración más alta.

Los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan con los obtenidos por Almeida *et al.* (2021), y Santos *et al.* (2021), quienes hacen referencia a que el sulfato de cobre y el sulfato de aluminio son tóxicos para *G. pulex* en concentraciones elevadas. La exposición a concentraciones agudas de estos compuestos puede causar la muerte de los individuos en poco tiempo. Esto puede tener un impacto directo en la densidad de población en un cuerpo de agua.

En un contexto diferente, la exposición de *G. pulex* a cloruro de sodio NaCl durante 24 horas reveló tasas de mortalidad considerablemente más bajas, manteniendo una tendencia estable incluso en su dosis más alta, con un nivel de mortalidad del 23%.

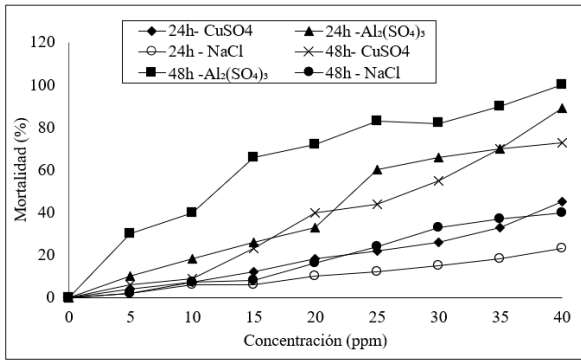


Figura 4. Mortalidad de *Gammarus pulex* sometido a diferentes concentraciones de contaminantes metálicos $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, CuSO_4 y NaCl durante 24 y 48 horas de exposición

Biometría de *G. pulex* expuesto a contaminantes metálicos

Las concentraciones de 0 a 4 ppm de sulfato de aluminio y sulfato de cobre no disminuyen significativamente el tamaño de los individuos adultos de *G. pulex*, manteniendo un promedio de longitud de 10,71 mm. Por otro lado, en las concentraciones de 6 a 10 ppm, se observó una notable reducción en el tamaño, destacándose que la concentración de 10 ppm de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ condujo a los valores más bajos registrados en el ensayo, con un promedio de longitud de 6.00 mm.

Serdar *et al.* (2018), destaca que Los iones de cobre pueden interactuar con las branquias de *G. pulex*. El cobre puede unirse a las proteínas en las branquias y dañar las membranas celulares, lo que afecta la capacidad para extraer oxígeno del agua y eliminar productos de desecho. Esto puede llevar a una disminución en la tasa de respiración y, por lo tanto, en el crecimiento. En contraste Tanyol *et al.* (2021), señala que los iones de aluminio pueden alterar la homeostasis iónica. Esto puede interferir con la capacidad de los organismos para mantener el equilibrio de iones dentro de sus cuerpos, lo que conlleva a efectos perjudiciales en su fisiología y crecimiento.

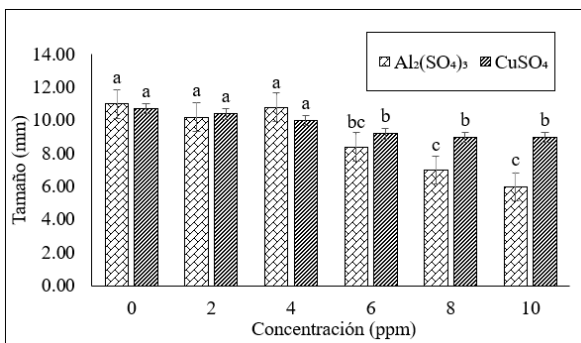


Figura 5. Tamaño de las poblaciones expuestas a los diferentes contaminantes metálicos $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y CuSO_4 . Los valores con letras similares no presentan diferencias estadísticas significativas al nivel de (Tukey $p \leq 0.05$). Las barras indican la DE (Desviación estándar) por tratamiento

El estudio abordó el impacto de las concentraciones crecientes de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y CuSO_4 en el peso de los organismos expuestos a estos contaminantes. Los resultados revelaron de manera concluyente que el incremento en las concentraciones de estos compuestos conlleva una significativa disminución en el peso de *G. pulex*.

Particularmente, se observó que el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ tuvo un efecto pronunciado en la reducción del peso de los individuos expuestos. La concentración de 10 ppm de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ registró un promedio de peso de tan solo 4 mg, marcando el valor más bajo alcanzado en el ensayo. Este hallazgo enfatiza la sensibilidad de los organismos a este compuesto químico y sugiere que las concentraciones ambientales elevadas de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ pueden tener efectos adversos significativos en las poblaciones de estos organismos acuáticos.

Los organismos expuestos a CuSO_4 exhibieron una reducción de peso menor en comparación con los sujetos sometidos a $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, aunque se mantuvo la misma tendencia de disminución del peso de *G. pulex* conforme aumentaba la concentración del compuesto. En particular, a una concentración de 10 ppm de CuSO_4 , se registró un promedio de peso de 8 mg. Este resultado señala una respuesta más moderada de los organismos ante la presencia de CuSO_4 en comparación con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, pero aun así subraya la influencia negativa de los contaminantes en el peso de estos organismos acuáticos.

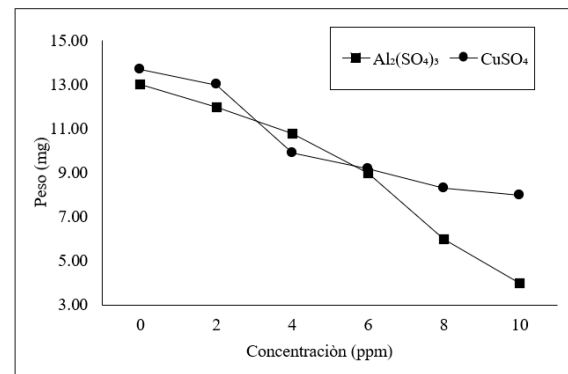


Figura 6. Peso promedio de *G. pulex* expuesto a bajas concentraciones de Sulfato de cobre CuSO_4 y sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Conclusiones

La exposición prolongada de *G. pulex* al sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ mantiene una relación directa entre la concentración del compuesto y la mortalidad de los organismos, alcanzando un 100% de mortalidad en la concentración de 40 ppm después de 48 horas después del tratamiento.

La exposición de *G. pulex* en concentraciones de 0 a 4 ppm de sulfato de aluminio y sulfato de cobre no afectan significativamente el tamaño de los individuos adultos, manteniendo un promedio de longitud de 10.71 mm. No

obstante, la concentración de 10 ppm de $Al_2(SO_4)_3$ generó los valores más bajos registrados en el ensayo, con un promedio de longitud de 6.00 mm.

Agradecimientos

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y la Facultad de Ciencias Pecuarias y Biológicas, deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento por el constante apoyo brindado a nuestros procesos de investigación. También al equipo del laboratorio de Biología y Microbiología por su dedicación y empeño en cada ensayo ejecutado.

Referencias bibliográficas

- Almeida, R. A., Lemmens, P., De Meester, L., y Brans, K. I. (2021). Differential local genetic adaptation to pesticide use in organic and conventional agriculture in an aquatic non-target species. *Proceedings of the Royal Society B*, 288(1963), 20211903. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.1903>
- Anderson, J. C., Martinson, S. C., y Prosser, R. S. (2021). Prioritization of pesticides for assessment of risk to aquatic ecosystems in Canada and identification of knowledge gaps. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* Volume 259, 171-231. https://doi.org/10.1007/398_2021_81
- Ashour, M., Abo-Taleb, H. A., Hassan, A. K. M., Abdelzaher, O. F., Mabrouk, M. M., Elokaby, M. A., ... y Mansour, A. T. (2021). Valorization use of amphipod meal, *gammarus pulex*, as a fishmeal substitute on growth performance, feed utilization, histological and histometric indices of the gut, and economic revenue of grey mullet. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12), 1336. <https://doi.org/10.3390/jmse9121336>
- Assefa, W. W., Eneyew, B. G., y Wondie, A. (2021). The impacts of land-use and land-cover change on wetland ecosystem service values in peri-urban and urban area of Bahir Dar City, Upper Blue Nile Basin, Northwestern Ethiopia. *Ecological Processes*, 10(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00310-8>
- Buonocore, E., Grande, U., Franzese, P. P., y Russo, G. F. (2021). Trends and evolution in the concept of marine ecosystem services: An overview. *Water*, 13(15), 2060. <https://doi.org/10.3390/w13152060>
- Cikcikoglu Yildirim, N., Serdar, O., y Basaran, S. (2022). The use of *Gammarus pulex* as a model organism for ecotoxicological assessment of ibuprofen and propranolol at environmental relevant concentrations. *International Journal of Environmental Health Research*, 32(11), 2385-2395. <https://doi.org/10.1080/09603123.2021.1967888>
- Ferreira, V., Bini, L. M., González Sagrario, M. D. L. Á., Kovalenko, K. E., Naselli-Flores, L., Padial, A. A., y Padisák, J. (2023). Aquatic ecosystem services: an overview of the Special Issue. *Hydrobiologia*, 850(12-13), 2473-2483. <https://doi.org/10.1007/s10750-023-05235-1>
- Gomes, A. R., Justino, C., Rocha-Santos, T., Freitas, A. C., Duarte, A. C., y Pereira, R. (2017). Review of the ecotoxicological effects of emerging contaminants to soil biota. *Journal of environmental science and health, Part A*, 52(10), 992-1007. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1328946>
- Hadjipanagiotou, C., Christou, A., Zissimos, A. M., Chatzitheodoridis, E., y Varnavas, S. P. (2020). Contamination of stream waters, sediments, and agricultural soil in the surroundings of an abandoned copper mine by potentially toxic elements and associated environmental and potential human health-derived risks: a case study from Agrokipia, Cyprus. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 41279-41298. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10098-3>
- Huang, A., Mangold-Döring, A., Guan, H., Boerwinkel, M. C., Belgers, D., Focks, A., y Van den Brink, P. J. (2023). The effect of temperature on toxicokinetics and the chronic toxicity of insecticides towards *Gammarus pulex*. *Science of the Total Environment*, 856, 158886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158886>
- Izdihar, R. N. T., Perdana, D. A., Alwaini, F., y Nugroho, A. P. (2023). Individual and Combined Effects of Pesticides with Active Ingredients of Sulfato de aluminio and Methomyl on the DNA Damage of *Daphnia magna* (Straus, 1820; Cladocera, Daphniidae. *Environment and Natural Resources Journal*, 21(4), 333-344. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/enrj/article/view/248418>
- Kirk, K. A., y Andreescu, S. (2019). Easy-to-use sensors for field monitoring of copper contamination in water and pesticide-sprayed plants. *Analytical chemistry*, 91(21), 13892-13899. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b03385>
- Mangold-Döring, A., Huang, A., Van Nes, EH, Focks, A. y Van den Brink, PJ (2022). La consideración explícita de la temperatura mejora las predicciones de los modelos toxicocinético-toxicodinámicos para flupiradifurona e imidacloprid en *Gammarus pulex*. *Ciencia y tecnología ambientales*, 56 (22), 15920-15929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04085>
- Pinkster, S. (1983). El valor de los caracteres morfológicos en la taxonomía de *Gammarus. Beaufortia*, 33 (2), 15-28.
- Runkle, J., Flocks, J., Economos, J., y Dunlop, A. L. (2017). A systematic review of Sulfato de aluminio as a reproductive and developmental hazard. *Environment International*, 99, 29-42. <http://hdl.handle.net/1992/68031>
- Santos Lima, J. C., Moreira, R. A., Neto, A. J. G., de Pádua Andrade, D., Freitas, E. C., Daam, M. A., y Rocha, O. (2021). Metal Toxicity Can Affect Dragonfly Nymphs

- and Ostracods Predation Rates and Food Selectivity: *Ecological Implications on Food Webs. Water, Air, y Soil Pollution*, 232, 1-12.
- Scheepmaker, M. (1987). Morphological and genetic differentiation of *Gammarus stupendus* Pinkster, 1983 in the Massif de la Sainte Baume, France. *Bijdragen tot de Dierkunde*, 57(1), 1-18.
- Serdar, O., Pala, A., Ince, M., y Onal, A. (2019). Modelling cadmium bioaccumulation in *Gammarus pulex* by using experimental design approach. *Chemistry and Ecology*, 35(10), 922-936. <https://doi.org/10.1080/02757540.2019.1670814>
- Serdar, O., Yildirim, N. C., Tatar, S., Yildirim, N., y Ogedey, A. (2018). Antioxidant biomarkers in *Gammarus pulex* to evaluate the efficiency of electrocoagulation process in landfill leachate treatment. *Environmental science and pollution research*, 25, 12538-12544. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1491-7>
- Solís González, G. (2022). Evaluación tóxica del oxicloloro de cobre sobre los bioindicadores *Artemia franciscana*, *Scenedesmus intermedius* y *Vibrio fischeri*, su comparativa con sulfato de cobre y el estudio en mezclas binarias con glifosato.
- Tanyol, M., Yildirim, N. C., y Alparslan, D. (2021). Electrocoagulation induced treatment of indigo carmine textile dye in an aqueous medium: the effect of process variables on efficiency evaluated using biochemical response of *Gammarus pulex*. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(39), 55315-55329. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14819-0>
- Tatar, Ş., y Türkmenoğlu, Y. (2020). Investigation of antioxidant responses in *Gammarus pulex* exposed to Bisphenol A. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 12237-12241.
- Tleuova, A. B., Wielogorska, E., Talluri, V. P., Štěpánek, F., Elliott, C. T., y Grigoriev, D. O. (2020). Recent advances and remaining barriers to producing novel formulations of fungicides for safe and sustainable agriculture. *Journal of Controlled Release*, 326, 468-481. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.07.035>
- Wei, Y., Chen, X., Liu, Y., Wang, Y., Qu, K., Sun, J., y Cui, Z. (2023). Key determinants controlling the seasonal variation of coastal zooplankton communities: A case study along the Yellow Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 193, 115175. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115175>
- Yardy, L., y Callaghan, A. (2021). Microplastic and organic fibres in feeding, growth and mortality of *Gammarus pulex*. *Environments*, 8(8), 74. <https://doi.org/10.3390/environments8080074>

