

# Remediación de sedimentos contaminados con mercurio a través del uso de l-cisteína

Remediation of mercury-contaminated sediments through the use of l-cysteine.

Andrés Felipe Acosta Rodriguez, Walter Murillo Arango, Scott Neese

## Resumen



El mercurio es un metal pesado tóxico que tiene la capacidad de bioacumularse y biomagnificarse al ser liberado al medio ambiente; debido a su mal uso y manipulación en distintos procesos, actualmente en Colombia este contaminante amenaza ecosistemas enteros y representa una problemática de salud pública para varias regiones de país. Como alternativa de solución se empleó un agente quelante para estimular la conversión del mercurio móvil-tóxico a especies no móviles, para lo cual se utilizó como modelo de sedimentos el Río Sur (South River), ubicado en Waynesboro, VA, USA; las muestras fueron sometidas a un proceso de remediación mediante el uso de l-Cisteína, un aminoácido conocido por ser un agente quelante de metales pesados a través de su grupo tiol; del mismo modo, se empleó una solución comercial llamada “MERCON X” usada como descontaminante y supresor de vapores de mercurio. Tras el proceso de remediación, se presenció el aumento de especies de mercurio no móviles en la muestra tratada con l-Cisteína, lo que hace del aminoácido una posible alternativa de bajo costo para la remediación de sedimentos contaminados con mercurio.

**Palabras Clave:** Mercurio, sedimentos, l-Cisteína, Mercurio no móvil, remediación

## Abstract



Mercury is a toxic heavy metal that has the ability to bioaccumulate and biomagnify when released into the environment; Due to its misuse in Colombia, currently this pollutant threatens entire ecosystems and represents a public health problem for various regions of the country. As an alternative solution, a chelating agent was used to stimulate the conversion of mobile-toxic mercury to non-mobile species, for which the South River, located in Waynesboro, VA, USA is used as a sediment model; the samples were subjected to a remediation process using l-Cysteine, an amino acid known to be a chelating agent for heavy metals through its thiol group; Additionally, a commercial solution called “MERCON X” typically used as a decontaminant and suppressor of mercury vapors was utilized in another sediment sample. After the remediation process, the increase in non-mobile mercury species was observed in the sample treated with l-Cysteine, which makes the amino acid a possible low-cost alternative for the remediation of sediments contaminated with mercury.

**Key words:** Mercury, sediments, l-Cysteine, nonmobile mercury, remediation.

Recibido / Received: 08 de Mayo de 2019 Aprobado / Approved: 18 de Junio de 2019

Tipo de artículo / Type of paper: Investigación científica y tecnológica

Afiliación Institucional de los autores / Institutional Affiliation of authors: Universidad de Manizales

Autor para comunicaciones / Author communications: andresfacostar@gmail.com

Los autores declaran que no tienen conflicto de interés.

## Introducción

El mercurio es un metal pesado que por muchos años ha sido empleado en distintos productos y procesos industriales; su mal manejo y disposición final han generado problemáticas de contaminación severa en distintas zonas del mundo. Colombia en la actualidad es el país que más libera mercurio al medio ambiente per cápita (Montoya Chica & Escallón Wey, 2017), lo que en los últimos años ha desatado problemáticas graves de salud pública y amenaza directa a ecosistemas en varias regiones del país (Gorder, 2019; MINSALUD & Instituto Nacional de Salud, 2018).

A pesar de ser reconocidas las afectaciones generadas por el mercurio hace varios años, aún existen vacíos teóricos sobre las alternativas de tratamiento del contaminante (Gong et al., 2019), sobre todo en escenarios que involucran su tratamiento in-situ en ecosistemas contaminados. A través del presente trabajo se realizará una prueba piloto con los sedimentos del Río Sur (South River) ubicado en Waynesboro, VA, USA, el cual fue contaminado con mercurio tras un derrame en los años 1950s y fue objeto de estudio al ser tratado con un agente quelante que busca reducir la toxicidad del mercurio al llevarlo a una de sus formas inorgánica más estables (Sulfuro de mercurio - HgS) (Issaro et al., 2009). Para esto se empleó L-Cisteína, un aminoácido que posee un grupo tiol el cual se enlaza fuertemente al mercurio y ha sido recientemente explorado en el campo medioambiental (Bansal et al., 2018; Jagtap, 2011) y en la medicina para el tratamiento de pacientes intoxicados con mercurio (Joshi et al., 2014); de la misma manera, se hizo uso de MERCON X, un descontaminante y supresor de vapores de mercurio comercial con el fin de comparar la inmovilización de mercurio resultante. Una vez las muestras fueron tratadas, se adoptó la metodología de especiación de mercurio propuesta por (Han et al., 2003), mediante la cual se determinó y analizó la cantidad de mercurio móvil y no-móvil generada tras la culminación de cada uno de los dos tratamientos, estableciendo así la efectividad de cada uno de ellos. La medición de mercurio total fue realizada por un laboratorio externo que empleo la técnica manual de vapor frío en las muestras sólidas -Método EPA 7471B- (Environmental Protection Agency, 2007) y Absorción Atómica de Vapor frío para las muestras líquidas -Método EPA 7470A- (Environmental Protection Agency, 1994).

## Marco Teórico

El Mercurio (Hg) es un elemento natural el cual es reconocido como un contaminante global debido a que puede ser transportado largas distancias en la atmósfera, ser persistente en el medio ambiente y acumularse en los seres vivos, lo que visto desde la cadena trófica representa un grave problema de salud para los humanos y ecosistemas (Nriagu, 1979). A temperatura ambiente, en su forma elemental (metálica) el mercurio se encuentra en estado líquido, el cual es bastante volátil y se vaporiza fácilmente; al ser inhalado el vapor de mercurio, es absorbido y transformado en compuestos orgánicos eficientemente, los cuales tienen alta afinidad con el sistema nervioso central, de allí su alto riesgo para los seres vivos (Chang & Tjalkens, 2010). Para la medición de vapores de mercurio, existen instrumentos como el Ohio Lumex RA-915+ Mercury Analyzer (OL), el cual es una unidad portable de absorción atómica altamente sensible con límite de detección de  $2\text{ng}/\text{m}^3$  (Ohio Lumex, 2020).

Alrededor del mundo existen distintos casos de cuerpos de agua contaminados con mercurio, en donde el metal se almacena principalmente en los sedimentos (Randall & Chattopadhyay, 2013); su tratamiento, requiere la utilización de distintas técnicas de remediación que remuevan, aislen y reduzcan la recirculación del metal, tal como el dragado, añadidura de capas (capping) y fitorremediación o inmovilización química, respectivamente (Randall & Chattopadhyay, 2013). Un caso bastante conocido en los Estados Unidos fue el del Río Sur en Waynesboro, VA, donde la compañía DuPont en los años 1929-1950 empleó el mercurio elemental para la producción una fibra conocida como Rayón; en 1976, durante actividades de remodelación de la empresa se descubrieron cantidades de mercurio líquido debajo de la planta, las cuales se infiltraron en el suelo y contaminaron el Río Sur. En la actualidad, aún existe contaminación de este metal en la zona (South River Science Team, 2001).

El índice de rango de bajo efecto (Effects range-low - ERL por sus siglas en inglés) establecido por la Administración Nacional de Océanos y Atmósfera (NOAA) para el mercurio en sedimentos es de  $0.15\text{mg}/\text{Kg}$ , lo que indica que a esta concentración, el 10% de los organismos benthicos se ven afectados, dando inicio a la biomagnificación del contaminante (Long et al., 1995). Además,

el mismo autor establece el Límite de Efecto Aparente (Apparent effects threshold - AET por sus siglas en inglés) en sedimentos como 2.1mg Hg/Kg para el mercurio; este valor determina la concentración en la cual un contaminante es estadísticamente siempre adverso.

Naturalmente una de las formas más comunes en las que se encuentra el mercurio es en el compuesto inorgánico Sulfato de Mercurio (HgS) también conocido como cinabrio; (Han et al., 2003) clasifica las especies de mercurio ubicadas en los sedimentos en tres tipos de acuerdo a su solubilidad: móviles y tóxicas [Hg orgánico, Hg(OH), Hg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, HgO, complejos de Hg+2], semimóviles [Complejos de Hg+2, Hg elemental, amalgamas, bajo porcentaje de Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>] y no-móviles [alto porcentaje de Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, HgS, HgSe] (Fernández-Martínez et al., 2006). Con base en lo anterior, el HgS es clasificado como una especie no-móvil de mercurio debido a su baja solubilidad (10<sup>-54</sup> mol/dm<sup>3</sup>) (Issaro et al., 2009);

Debido a la alta toxicidad que representa el mercurio, varios métodos han sido estudiados para tratar el contaminante tanto en el campo de la medicina como en el campo medioambiental; para el último se ha descubierto que el mercurio es un elemento altamente calcófilo (afinidad con el azufre) por ende, se enlaza fuertemente a compuestos que contengan un grupo tiol incluso en presencia de otros metales pesados con concentración molar equivalente (Bansal et al., 2018; Matlock et al., 2003) formando últimamente HgS. (Jagtap et al., 2011) separation and determination of mercury species by HPLC-ICPMS using a Perkin-Elmer 3 μm C8 (33 mm × 3 mm menciona el uso de varios compuestos que presentan azufre en su estructura relativamente comunes como el 2-mercaptoetanol, tiourea, o L-Cisteína como agentes extractores de mercurio, los cuales son analizados por (Matlock et al., 2002), quien además diseñó y sintetizó un compuesto conocido como BDET que ha demostrado tener alta efectividad en la precipitación quelante del mercurio al generar especies de mercurio no-móviles (Matlock et al., 2003).

En cuanto a costos y capacidad de asimilación por el medio ambiente de los agentes extractores anteriormente mencionados, L-Cisteína fue la opción escogida en el presente trabajo para inmovilizar químicamente el mercurio, debido a que el aminoácido puede ser extraído

de alimentos altos en proteínas, plumas de aves o pelos de cerdo (Barone et al., 2006), lo que lo hace abundante y además es fácilmente degradado, razón por la cual también es usado como suplemento dietario.

## Materiales y Métodos

Reactivos aprobados por la Sociedad Química Americana (ACS por si siglas en inglés) fueron utilizados: Etanol al 95% fue adquirido de Carolina (Burlington, NC, USA), prueba BART para Bacterias Reductoras de Sulfato (SRB), Ácido Nítrico al 70% y Ácido Clorhídrico al 37% fueron adquiridos de Hach (Loveland, CO, USA) y L-Cisteína fue adquirido de Puritan's Pride.

Los instrumentos utilizados fueron el Ohio Lumex RA-915+, el analizador de fluorescencia de rayos X Olympus DP-2000-C Delta Premium Alloy (XRF Analyzer) y la centrifuga Thermo Scientific Legend XTR. Para el análisis de mercurio total en las muestras sólidas se emplearon los servicios del laboratorio EMSL Analytical (Cinnaminson, NJ, USA) para el análisis del mercurio total (Hg<sub>T</sub>) mediante el Método EPA 7471B.

## Toma de muestra

Una muestra compuesta de sedimentos fue tomada a la orilla del Río Sur (South River) a la altura del Basic Park ubicado en Waynesboro, VA, USA (38°05'01.4"N 78°52'30.4"W), la cual fue recolectada haciendo uso de un tubo de extracción manual de 3" de diámetro; para esto se tomaron tres muestras a profundidades entre ~17.78cm a ~33.02cm, a una distancia aproximada de 1m una de la otra, las cuales fueron homogenizadas y preservadas en frío durante su transporte al laboratorio, donde finalmente fueron almacenadas a una temperatura de 6.9°C mientras se procedía con los siguientes pasos de extracción del mercurio.

## Formación de especies de mercurio no-móvil

Se realizaron dos experimentos bajo las mismas condiciones, uno mediante el uso de una solución de 0.8% w/v de L-Cisteína y el otro empleando el descontaminante comercial MERCON X. Para ambos tratamientos,

se extrajo 35g del sedimento previamente recolectado y se añadió 100mL de solución que luego se mezcló en un agitador vortex y se dejó reposar por un tiempo de 5 días a temperatura ambiente ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ) en un lugar oscuro. Una vez transcurrido el tiempo de reacción, se procedió a realizar la especiación del mercurio descrita por (Han et al., 2003) a sequential extraction scheme has been developed to classify mercury species based on their environmental mobility and/or toxicity for either routine lab analysis or on-site screening purposes. The alkyl mercury species and soluble inorganic species that contribute to the major portion of potential mercury toxicity in the soil are extracted by an acidic ethanol solution (2% HCl+10% ethanol solution, en donde se extrajeron las especies no-móviles de mercurio en estado sólido. Debido a que la extracción se realizó en medio ácido, durante el transporte de las muestras al laboratorio para análisis final de  $\text{Hg}_p$ , estas fueron preservadas únicamente en frío, descartando la preservación en ácido nítrico sugerido por (Environmental Protection Agency, 1994). Por parte del laboratorio, se analizó el mercurio total de cuatro muestras: Muestra original, muestra original especiada, muestra tratada con L-Cisteína y muestra tratada con MERCON X.

## Análisis de posibles interferencias

Los compuestos que poseen con grupos tiol no solo se enlazan al mercurio divalente, sino que además tienen una afinidad un poco menor que la del  $\text{Hg}^{+2}$  con moléculas divalentes de metales pesados como  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$  y  $\text{Pb}^{+2}$  (Bansal et al., 2018). Por esta razón, la muestra de sedimentos fue analizada a través de Fluorescencia de Rayos-X (XRF), en donde se encontraron los elementos Mn, Zn, Pb (se desconoce su estado de oxidación).

## Prueba BART, Bacterias Sulfato Reductoras

Debido a que el tratamiento propuesto en el presente trabajo incluye la adición de un compuesto con contenido de azufre al suelo, fue esencial garantizar que este elemento pueda ser degradado por la microbiota presente en el río estudiado. Para esto, se realizó el ensayo BART para bacterias sulfato reductoras (SRB).

## Resultados

Tras la especiación de las cuatro muestras, se obtuvieron las siguientes cantidades de mercurio total:

**Tabla 1.** Resultados de Mercurio Total en las distintas muestras

Muestra	Mercurio Total (mg/Kg)
Sedimentos Río Sur	4.9
Sedimentos Río Sur especiados	0.36
Sedimentos tratados con L-Cisteína especiados	0.92
Sedimentos tratados con MERCON X especiados	0.083

La medición de posibles interferencias causadas por metales pesados divalentes fue realizada con el XRF, el cual arrojó una lista de los distintos elementos detectados en la muestra; Ver Tabla 1. Concentraciones de Mn, Zn y Pb fueron encontradas en la muestra, lo cual puede impedir que el grupo tiol de la L-Cisteína se enlace únicamente con el mercurio.

**Tabla 2.** Concentración de elementos hallados en la muestra a través del XRF

Elemento	PPM	$\pm$
Fe	12,400	0.1
Ti	3,203	94
Zr	568	4
Ba	150	40
Mn	125	8
Sr	42.9	0.7
Rb	215	0.5
Sn	17	5
Zn	10	3
Pb	9	1
Mo	5.7	0.8
As	2.5	0.7

Debido a que la contaminación presentada en el Río Sur fue realizada con mercurio en forma elemental, la muestra de sedimentos original fue analizada con el Ohio Lumex mediante absorción atómica con el fin de medir la cantidad de vapor de mercurio que emanaba. Los vapores solo se producen cuando existe mercurio elemental (metálico), lo cual no era de esperarse debido a la presencia de materia orgánica y microbiota que rápidamente transforman el mercurio a sus formas orgánicas e inorgánicas. Esto fue corroborado cuando las mediciones fueron  $< 10\text{ng Hg/m}^3$ .

La prueba BART para las bacterias sulfato reductoras mostró resultados positivos, tras la formación de limo al sexto día.

Foto 1. Prueba Bart para bacterias sulfato reductoras, día 6.



## Discusión

El Río Sur (South River) aún presenta problemas de contaminación por mercurio incluso casi 70 años después del derrame generado por la empresa DuPont. Los valores para mercurio total en la muestra de sedimentos no tratada

( $4.9\text{mg/Kg}$ ) se encuentran dentro de los límites de efecto aparente (AET), siendo estos adversos para el ecosistema. Al realizar la especiación de especies no-móviles de mercurio en la muestra se encontró que únicamente el 7.35% del mercurio total puede ser clasificado en esta categoría, lo cual indica que más del 90% del mercurio total es fácilmente transportado a través del ecosistema. Tras el uso de L-Cisteína, se obtuvo la mayor cantidad de especies no móviles de mercurio ( $0.92\text{mg/Kg}$  o un 18.7% del mercurio total), lo cual aumentó en más del doble la cantidad inicial de estas especies de mercurio.

Por otro lado, el descontaminante comercial MERCON X disminuyó significativamente la cantidad de especies no móviles de mercurio, lo cual indica que su efectividad va ligada hacia el tratamiento de mercurio en estado elemental presente en laboratorios o consultorios odontológicos, tal como es indicado en su sitio web y no es una alternativa eficiente para tratar mercurio liberado en ecosistemas.

Cabe resaltar que para el tratamiento de las muestras, únicamente se añadieron las soluciones con el fin de que hubiese un contacto y por ende una reacción de con las distintas especies de mercurio presentes en la muestra, sin embargo, se aclara que solo un tipo de tratamiento (inmovilización química en este caso) no es suficiente para remediar la contaminación de mercurio en los sedimentos. La L-Cisteína comprueba ser un agente quelante efectivo que además es de bajo costo en comparación con los compuestos encontrados comúnmente en la literatura, lo cual la convierte en una posible alternativa para el desarrollo de proyectos de descontaminación a larga escala. Para futuras investigaciones, se recomienda variar la concentración del aminoácido y además usar técnica avanzada de oxidación que no alteren de manera significativa las condiciones iniciales del ecosistema y que puedan ser aplicadas *in-situ*, con el fin de asegurar el incremento de  $\text{Hg}^{+2}$  y lograr una mayor generación de especies no móviles de mercurio.

Aunque se comprobó que en la muestra hay presencia de Mn, Zn y Pb, el XRF no diferencia el estado de oxidación en el cual se encuentra cada elemento, por lo que no se conoce la cantidad de moléculas divalentes presentes ni se puede predecir qué tanta interferencia representan estos elementos al reaccionar con el grupo tiol presente en la L-Cisteína. Por último, el hecho de que existan

bacterias sulfato reductoras en los sedimentos es un resultado positivo para el presente estudio debido a que esto garantiza que en caso tal de sobresaturar el suelo con la solución de L-Cisteína, el exceso de azufre será degradado por la microbiota presente.

## Conclusiones

La L-Cisteína comprobó ser una alternativa de bajo costo con potencial de uso *in-situ* en la remediación de sedimentos contaminados con mercurio al aumentar las especies de mercurio no móvil en más del doble de las presentes originalmente, únicamente tras colocar el aminoácido en contacto con la muestra contaminada. Esto representa un hallazgo significativo debido al vacío y falta de conocimiento en temas relacionados al tratamiento de mercurio en ecosistemas; el proyecto también demuestra que no todos los descontaminantes comerciales o usados en la literatura son efectivos para su uso en la naturaleza. Al ser la L-Cisteína abundante y fácilmente degradada, es posible pensar en su implementación en proyectos a gran escala, especialmente en zonas altamente afectadas por la presencia del mercurio, como es el caso de varias regiones en Colombia donde se realiza extracción artesanal de oro.

Por otro lado, es importante resaltar que de la forma en la que se emplea la L-Cisteína en el proyecto, sólo sería posible su uso en suelos o en las riveras; para la remediación del mercurio presente el fondo de los cuerpos de agua se requerirá un enfoque distinto. En futuros estudios se debe considerar el uso de técnicas avanzadas de oxidación con el fin de aumentar la generación de especies no móviles de mercurio, que para el caso de la L-Cisteína sería principalmente sulfuro de mercurio.

## Bibliografía

- [1] Bansal, M., Ram, B., Chauhan, G. S., & Kaushik, A. (2018). L-Cysteine functionalized bagasse cellulose nanofibers for mercury(II) ions adsorption. *International Journal of Biological Macromolecules*, *112*, 728–736. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.206>
- [2] Barone, J. R., Dangaran, K., & Schmidt, W. F. (2006). Blends of cysteine-containing proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *54*(15), 5393–5399. <https://doi.org/10.1021/jf053238l>
- [3] Chang, L. W., & Tjalkens, R. B. (2010). Neurotoxicology of Metals. In *Comprehensive Toxicology, Second Edition* (Vol. 13, pp. 483–497). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-046884-6.01329-4>
- [4] Environmental Protection Agency. (2007). *METHOD 7471B*. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/7471b.pdf>
- [5] Environmental Protection Agency, U. (1994). *EPA Method 7470A (SW-846): Mercury in Liquid Wastes (Manual Cold-Vapor Technique)*. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/epa-7470a.pdf>
- [6] Fernández-Martínez, R., Loredó, J., Ordóñez, A., & Rucandio, M. I. (2006). Physicochemical characterization and mercury speciation of particle-size soil fractions from an abandoned mining area in Mieres, Asturias (Spain). *Environmental Pollution*, *142*, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.10.034>
- [7] Gong, Y., Huang, · Yao, Wang, · Mengxia, Liu, F., & Zhang, · Tong. (2019). Application of Iron-Based Materials for Remediation of Mercury in Water and Soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *102*, 721–729. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02559-4>
- [8] Gorder, G. (2019, December 20). *Contaminación con mercurio de minería ilegal afecta a indígenas de Colombia*. <https://es.insightcrime.org/noticias/noticias-del-dia/contaminacion-con-mercurio-de-mineria-ilegal-afecta-a-indigenas-de-colombia/>
- [9] Han, Y., Kingston, H. M., Boylan, H. M., Rahman, G. M. M., Shah, S., Richter, R. C., Link, D. D., & Bhandari, S. (2003). Speciation of mercury in soil and sediment by selective solvent and acid extraction. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *375*(3), 428–436. <https://doi.org/10.1007/s00216-002-1701-4>

- [10] Issaro, N., Abi-Ghanem, C., & Bermond, A. (2009). Fractionation studies of mercury in soils and sediments: A review of the chemical reagents used for mercury extraction. *Analytica Chimica Acta*, 631, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.10.020>
- [11] Jagtap, R. (2011). *Measurement of methyl mercury (I) and mercury (II) in fish tissues and sediments by HPLC-ICPMS and HPLC-HGMS* (pp. 49–55).
- [12] Jagtap, R., Krikowa, F., Maher, W., Foster, S., & Ellwood, M. (2011). Measurement of methyl mercury (I) and mercury (II) in fish tissues and sediments by HPLC-ICPMS and HPLC-HGAAS. *Talanta*, 85(1), 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2011.03.022>
- [13] Joshi, D., Mittal, D. K., Shukla, S., Srivastav, A. K., & Srivastav, S. K. (2014). N-acetyl cysteine and selenium protects mercuric chloride-induced oxidative stress and antioxidant defense system in liver and kidney of rats: A histopathological approach. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 28(2), 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2013.12.006>
- [14] Long, E. R., Macdonald, D. D., Smith, S. L., & Calder, F. D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 19(1), 81–97. <https://doi.org/10.1007/BF02472006>
- [15] Matlock, M. M., Henke, K. R., & Atwood, D. A. (2002). Effectiveness of commercial reagents for heavy metal removal from water with new insights for future chelate designs. *Journal of Hazardous Materials*, 92(2), 129–142. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00389-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00389-2)
- [16] Matlock, M. M., Howerton, B. S., Aelstyn, M. Van, Henke, K. R., & Atwood, D. A. (2003). Soft metal preferences of 1,3-benzenediamidoethanethiol. *Water Research*, 37(3), 579–584. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00279-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00279-8)
- [17] MINSALUD, & Instituto Nacional de Salud. (2018). *EVALUACION DEL GRADO DE CONTAMINACIÓN POR MERCURIO Y OTRAS SUSTANCIAS TÓXICAS, Y SU AFECTACIÓN EN LA SALUD HUMANA EN LAS POBLACIONES DE LA CUENCA DEL RIO ATRATO, COMO CONSECUENCIA DE LAS ACTIVIDADES DE MINERÍA*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/protocolo-sentencia-t622-vcolciencias.pdf>
- [18] Montoya Chica, D., & Escallón Wey, C. (2017, August 16). *Colombia aún no hace parte del Convenio de Minamata que busca eliminar el mercurio* | WWF. WWF. <https://www.wwf.org.co/?308690/Colombia-aun-no-hace-parte-del-Convenio-Minamata>
- [19] Nriagu, J. O. (1979). Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere. In *Nature* (Vol. 279, Issue 5712, pp. 409–411). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/279409a0>
- [20] Ohio Lumex. (2020). *Portable Mercury Vapor Analyzer RA-915M* | USA | Ohio Lumex. <https://www.ohiolumex.com/mercury-vapor-analyzer-915m>
- [21] Randall, P. M., & Chattopadhyay, S. (2013). Mercury contaminated sediment sites-An evaluation of remedial options. *Environmental Research*, 125, 131–149. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.01.007>
- [22] South River Science Team. (2001). *Who We Are* | South River Science Team | Waynesboro, VA. <https://southriverscienceteam.org/who-we-are/#historic-timeline>