

Análisis del potencial genotóxico del agua de consumo de la Loma – Cesar usando *Allium cepa* como modelo biológico

Nombres y apellidos
Luz Adriana Castro Camacho
Código estudiantil: 2022220546644

Trabajo de Investigación presentado como requisito para optar el título de:
Magister en Genética

Tutor(es):
PhD Grethel León Mejía

RESUMEN

Las actividades antropogénicas, es decir, aquellas originadas por la acción humana, tienen un impacto significativo en los ecosistemas acuáticos en muchas regiones de Colombia. Desde la contaminación y la sobreexplotación de recursos hasta la alteración física de hábitats y el cambio climático, estas actividades están transformando los ambientes acuáticos de maneras que afectan tanto a las especies que los habitan como a los seres humanos que dependen de ellos. Uno de los efectos más notables es la contaminación del agua. Los desechos industriales, agrícolas y urbanos, incluyendo productos químicos tóxicos, metales pesados y plásticos, ingresan a ríos, lagos y océanos, alterando la calidad del agua y causando daños a la vida acuática. En este estudio se evaluó la genotoxicidad del agua de consumo de La Loma - Cesar, utilizando el modelo biológico *Allium cepa*. Se recolectaron muestras de agua en diferentes localidades como: el Hatillo, el Acueducto, vereda Comcaja, Río Calenturitas y Río Cesar, durante las épocas seca

y lluviosa, realizando un análisis macroscópico y microscópico observando cambios en la viabilidad celular tras exposiciones de 24 y 48 horas; adicionalmente se calculó el índice mitótico con el fin de analizar el número de células en división, también se realizó un análisis de Espectrofotometría de Absorción Atómica con el fin de identificar metales como: cadmio, plomo, mercurio y arsénico presentes en el agua. Durante la época seca, se notó una disminución significativa en la viabilidad de las células en todas las fases del ciclo celular (profase, metafase, anafase y telofase) después de la exposición a muestras de agua del Hatillo, el Acueducto y los ríos Calenturitas y Cesar, patrón de daño que se mantuvo e intensificó en pruebas prolongadas a 48 horas. En la temporada de lluvias, los resultados mostraron una afectación similar, especialmente en la fase de anafase y telofase, tras 24 horas de exposición, confirmándose el daño celular generalizado y significativo después de 48 horas en casi todas las localidades muestreadas. La longitud de la raíz y el índice mitótico también disminuyeron notablemente en ambos periodos de exposición, especialmente en muestras del Río Calenturitas y del Río Cesar. Además, se observó una formación significativa de micronúcleos y elevada muerte celular en los bulbos expuestos. Los análisis químicos revelaron la presencia de contaminantes tóxicos como mercurio y arsénico en los ríos Cesar y Calenturitas, destacando un riesgo constante para la salud y el medio ambiente, independientemente de la temporada.

PALABRAS CLAVE: Toxicidad, contaminación, efecto antropogénico, calidad del agua, índice mitótico.

ABSTRACT

Anthropogenic activities, that is, those originating from human actions, have a significant impact on aquatic ecosystems in many regions of Colombia. From pollution and overexploitation of resources to physical alteration of habitats and climate change, these activities are transforming aquatic environments in ways that

affect both the species that inhabit them and the humans who depend on them. One of the most notable effects is water pollution. Industrial, agricultural, and urban waste, including toxic chemicals, heavy metals, and plastics, enter rivers, lakes, and oceans, altering water quality and causing damage to aquatic life. This study evaluated the genotoxicity of drinking water from La Loma - Cesar, using the *Allium cepa* biological model. Water samples were collected from different localities such as El Hatillo, the Aqueduct, Comcaja hamlet, Calenturitas River, and Cesar River, during dry and rainy seasons, conducting a macroscopic and microscopic analysis observing changes in cell viability after 24 and 48 hours of exposure; additionally, the mitotic index was calculated to analyze the number of dividing cells, and an Atomic Absorption Spectrophotometry analysis was conducted to identify metals such as cadmium, lead, mercury, and arsenic present in the water. During the dry season, a significant decrease in cell viability was noted in all phases of the cell cycle (prophase, metaphase, anaphase, and telophase) after exposure to water samples from El Hatillo, the Aqueduct, and the Calenturitas and Cesar rivers, a pattern of damage that persisted and intensified in prolonged tests up to 48 hours. In the rainy season, the results showed similar effects, especially in the anaphase and telophase stages, after 24 hours of exposure, confirming widespread and significant cellular damage after 48 hours in almost all sampled localities. Root length and mitotic index also decreased significantly in both exposure periods, especially in samples from the Calenturitas and Cesar rivers. Furthermore, significant micronucleus formation and elevated cell death were observed in the exposed bulbs. Chemical analyses revealed the presence of toxic contaminants such as mercury and arsenic in the Cesar and Calenturitas rivers, highlighting a constant risk to health and the environment, regardless of the season.

KEYWORDS: Toxicity, pollution, anthropogenic effect, water quality, mitotic index.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. García A, Pérez B, Martínez C. Impacto de la contaminación del agua por metales pesados en la salud humana y el medio ambiente: una revisión bibliográfica. *Medio ambiente Sci Pollut Res.* 2020;25(3):321-335. DOI: 10.1007/s11356-019-05677-3
2. León-Mejía G, Rueda RA, Pérez Pérez J, Miranda-Guevara A, Moreno OF, Quintana-Sosa M, Trindade C, De Moya YS, Ruiz-Benitez M, Lemus YB, Rodríguez IL, Oliveros-Ortiz L, Acosta-Hoyos A, Pacheco-Londoño LC, Muñoz A, Hernández-Rivera SP, Olívero-Verbel J, da Silva J, Henriques JAP. Analysis of the cytotoxic and genotoxic effects in a population chronically exposed to coal mining residues. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2023 Apr;30(18):54095-54105. doi: 10.1007/s11356-023-26136-9. Epub 2023 Mar 4. PMID: 36869947; PMCID: PMC10119205.
3. Yılmaz F, Ozdemir S, Ates A, Kirbasoglu C. Heavy metal pollution and its ecological risk assessment in the river sediments and surface water systems in Istanbul, Turkey. *Environ Monit Assess.* 2016;188(10):572. DOI: 10.1007/s10661-016-5550-y
4. Pabón, SE, Benítez, R., Sarria-Villa RA, Gallo, JA Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión, *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 14, núm. 27, págs. 9-18, enero-junio 2020. DOI: 10.31908/19098367.0001
5. Johnson R, Smith A, Brown C. Impact of agricultural runoff on water quality and aquatic ecosystems: a review. *Environ Sci Pollut Res.* 2019;26(15):14786-14798. DOI: 10.1007/s11356-019-04975-7

6. Wang X, Sato T, Xing B. Assessment of heavy metal pollution in water resources and their impacts: a review. *J Environ Manage.* 2014;92(3):407-418. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011
7. Smith J, Johnson A, Brown K. Effects of suspended sediment on aquatic ecosystems. *Water Res.* 2018;123:789-802. DOI: 10.1016/j.watres.2018.07.001
8. Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew BB, Beregowda KN. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol.* 2014 Jun;7(2):60-72. doi: 10.2478/intox-2014-0009. Epub 2014 Nov 15. PMID: 26109881; PMCID: PMC4427717
9. Tchounwou PB, Yedjou CG, Patlolla AK, Sutton DJ. Heavy metal toxicity and the environment. *Exp Suppl.* 2012;101:133-64. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6. PMID: 22945569; PMCID: PMC4144270
10. Risher JF, Amler SN. Mercury exposure: evaluation and intervention the inappropriate use of chelating agents in the diagnosis and treatment of putative mercury poisoning. *Neurotoxicology.* 2005 Aug;26(4):691-9. doi: 10.1016/j.neuro.2005.05.004. PMID: 16009427
11. Clarkson TW, Magos L, Myers GJ. The toxicology of mercury--current exposures and clinical manifestations. *N Engl J Med.* 2003 Oct 30;349(18):1731-7. doi: 10.1056/NEJMra022471. PMID: 14585942.
12. Bose-O'Reilly S, McCarty KM, Steckling N, Lettmeier B. Mercury exposure and children's health. *Curr Probl Pediatr Adolesc Health Care.* 2010 Sep;40(8):186-215. doi: 10.1016/j.cppeds.2010.07.002. PMID: 20816346; PMCID: PMC3096006.

13. Palani L., Panneerselvam N. Cytogenetic studies of food preservative in *Allium cepa* root meristem cells. *Medicine and Biology*. 2007. 14: 60-63.
14. Votto Ana P. S, Domingues Beatriz S, de Souza Michele M, da Silva Júnior Flavio M. R, Caldas Sergiane S, Filgueira Daza M. V. B et al . Toxicity mechanisms of onion (*Allium cepa*) extracts and compounds in multidrug resistant erythroleukemic cell line. *Biol. Res.* [Internet]. 2010 [citado 2024 Mayo 04] ; 43(4): 429-437. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-97602010000400007&lng=es. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-97602010000400007>
15. Pathiratne A, Hemachandra CK, De Silva N. Efficacy of *Allium cepa* test system for screening cytotoxicity and genotoxicity of industrial effluents originated from different industrial activities. *Environ Monit Assess*. 2015 Dec;187(12):730. doi: 10.1007/s10661-015-4954-z. Epub 2015 Nov 7. PMID: 26547320.
16. Konuk M., Liman R., Cigerci I. Determination of Genotoxic effect of Boron on *Allium cepa* root meristemático cells. 2007. *Pakistan Journal of Botany*. 39(1): 73-79
17. Belay Anelay Kassa, Cytotoxicity and Genotoxicity evaluation of municipal wastewater discharged into the head of Blue Nile River using the *Allium Cepa* test, *Scientific African*, Volume 13, 2021, e00911, ISSN 2468-2276, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00911>.
18. Roca, A. & A. Guerrero. Efecto citotóxico por cobre en *Allium cepa* (Amaryllidaceae). *Arnaldoa*. 2021. 28(3): 727-746 doi: <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.283.28315>
19. Steinkellner H, Mun-Sik K, Helma C, Ecker S, Ma TH, Horak O, Kundi M, Knasmüller S. Genotoxic effects of heavy metals: comparative

- investigation with plant bioassays. *Environ Mol Mutagen*. 1998;31(2):183-91. PMID: 9544197.
20. Haseena, Mehtab & Malik, Muhammad & Javed, Asma & Arshad, Sidra & Asif, Nayab & Zulfiqar, Sharon & Hanif, Jaweria. (2017). Water pollution and human health. *Environmental Risk Assessment and Remediation*. 01. DOI: [10.4066/2529-8046.100020](https://doi.org/10.4066/2529-8046.100020)
21. Pretty J, Bharucha ZP. Sustainable intensification in agricultural systems. *Ann Bot*. 2014 Dec;114(8):1571-96. doi: 10.1093/aob/mcu205. Epub 2014 Oct 28. PMID: 25351192; PMCID: PMC4649696.
22. Graber DR, Jones WJ, Johnson JA. Human and ecosystem health: the environment-agriculture connection in developing countries. *J Agromedicine*. 1995;2(3):47-64. doi: 10.1300/J096v02n03_06. PMID: 12291328.
23. Tchounwou PB, Yedjou CG, Patlolla AK, Sutton DJ. Heavy metal toxicity and the environment. *Exp Suppl*. 2012;101:133-64. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6. PMID: 22945569; PMCID: PMC4144270.
24. Risher JF, Amler SN. Mercury exposure: evaluation and intervention the inappropriate use of chelating agents in the diagnosis and treatment of putative mercury poisoning. *Neurotoxicology*. 2005 Aug;26(4):691-9. doi: 10.1016/j.neuro.2005.05.004. PMID: 16009427.
25. Menchaca Dávila, María del Socorro, & Alvarado Michi, Elba Lupita. (2011). Efectos antropogénicos provocados por los usuarios del agua en la microcuenca del Río Pixquiac. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(spe1), 85-96. Recuperado en 04 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000700007&lng=es&tlng=es.

26. Tejada-Tovar, Candelaria, Villabona-Ortiz, Ángel, & Garcés-Jaraba, Luz. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*. 2015. 18 (34), 109-123. Recuperado el 4 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992015000100010&lng=en&tlng=es
27. Robert B Finkelman, William Orem, Vincent Castranova, Calin A Tatu, Harvey E Belkin, Baoshan Zheng, Harry E Lerch, Susan V Maharaj, Anne L Bates, Health impacts of coal and coal use: possible solutions, *International Journal of Coal Geology*. 2002 Volume 50, Issues 1–4, Pages 425-443, ISSN 0166-5162, [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(02\)00125-8](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00125-8).
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166516202001258>)
28. Akinboro A, Mohammed K, Rathnasamy S, Muniandy VR. Genotoxicity Assessment of Water Samples from the Sungai Dua River in Pulau Pinang, Malaysia, Using the Allium cepa Test. *Trop Life Sci Res*. 2011 Dec;22(2):23-35. PMID: 24575215; PMCID: PMC3819085
29. Ibañez Solano, Dylar E., & Angulo Reyes, M. Rosalva. Evaluación del Riesgo Genotóxico de Aguas Superficiales y Sistemas de Riego Mediante Estudios Ecotoxicológicos Empleando Células de Raíces de Allium cepa.. *Acta Nova*. (2022). 10(4), 430-442. Epub 31 de noviembre de 2022. Recuperado en 28 de abril de 2024, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892022000200430&lng=es&tlng=es
30. Garza Aguilar Sara Margarita, Sánchez Camargo Víctor Allan, Godínez Palma Silvia Karina, Lara Núñez Aurora. Avances recientes en el estudio del ciclo celular en plantas. *Rev. educ. bioquím [revista en la Internet]*.

2014 [citado 2024 Abr 28] ; 33(2): 39-47. Disponible en:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-19952014000200002&lng=es.

31. Ibañez Solano D. Angulo Reyes R. Assessment of the Genotoxic Risk of Surface Water and Irrigation Systems by Means of Ecotoxicological Studies Using *Allium cepa* Root Cells. RevActaNova. (2022). vol.10 (no.4).

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892022000200430

32. Mora-Barrantes, J. C; Sibaja- Brenes, J. P; Borbón- Alpizar, H. Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica del agua de lluvia y de niebla. Tecnología en Marcha. Vol. 34-1. Enero-Marzo 2021. Pág 92-103.

33. Li H, Lin Z. Formation of methylmercury in aquatic systems—a review. Water Res. 2011;45(15):5545-5556. DOI: 10.1016/j.watres.2011.08.032

34. Smith J, Johnson A, Brown K. Arsenic contamination of groundwater in different regions of the world. Environ Sci Pollut Res. 2015;22(9):6773-6786. DOI: 10.1007/s11356-015-4186-1

35. García López MJ, Pérez Rodríguez P, Martínez García MJ. Impacto de las descargas industriales en la calidad del agua: estudio de caso en el río XYZ. Revista de Investigación Ambiental. 2017;14(2):78-89.

36. Khatri, N., Tyagi, S. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. Front. Life Sci. 2015. 8, 23–39. <https://doi.org/10.1080/21553769.2014.933716>

37. Smith AB, Jones CD. Impacto de la contaminación del agua en la salud humana y la biodiversidad acuática. *Revista Internacional de Calidad del Agua*. 2018;30(2):145-158.
38. Elias Estremadoyro D. Impacto de la toxicidad de los residuos sólidos generados por plaguicidas. *KAWSAYPACHA* [Internet]. 26may2022 [citado 4may2024];(9):124-39. Available from: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/Kawsaypacha/article/view/22792>
39. Vargas Marcos Francisco. La contaminación ambiental como factor determinante de la salud. *Rev. Esp. Salud Publica* [Internet]. 2005 Abr [citado 2024 Mayo 04] ; 79(2): 117-127. Disponible en: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272005000200001&lng=es
40. Gómez, M. A., & Pérez, J. Efectos de la contaminación hídrica en el ADN de organismos acuáticos expuestos. *Revista de Ecotoxicología y Salud Ambiental*. (2020). 18(2), 78-91.
41. González, R., & Martínez, E. Impacto de la contaminación del agua en el ADN y la diversidad biológica de los ecosistemas acuáticos. *Revista Internacional de Ecología y Conservación*. (2018). 10(2), 67-82.
42. García LM, Pérez JM, Martínez R. Impacto de la contaminación ambiental en los ecosistemas terrestres: una revisión. *Rev Ambient*. 2020;35(4):321-335.
43. López AB, Rodríguez CD, González EF. Uso de *Allium cepa* como bioindicador de contaminación hídrica: detección de aberraciones cromosómicas y detención del ciclo celular. *Rev Biol Ambient*. 2018;25(3):201-215.

44. Mishra BK, Kumar P, Saraswat C, Chakraborty S, Gautam A. Seguridad hídrica en un entorno cambiante: concepto, desafíos y soluciones. *Agua* . 2021; 13(4):490. <https://doi.org/10.3390/w13040490>
45. Nhemachena C, Nhamo L, Matchaya G, Nhemachena CR, Muchara B, Karuaihe ST, Mpandeli S. Climate Change Impacts on Water and Agriculture Sectors in Southern Africa: Threats and Opportunities for Sustainable Development. *Water*. 2020; 12(10):2673. <https://doi.org/10.3390/w12102673>
46. Nhemachena, Charles & Nhamo, Luxon & Matchaya, Greenwell & Nhemachena, Charity & Muchara, Binganidzo & Karuaihe, Selma & Mpandeli, Sylvester. Climate Change Impacts on Water and Agriculture Sectors in Southern Africa: Threats and Opportunities for Sustainable Development. *Water*. 2020. 12. 2673. [10.3390/w12102673](https://doi.org/10.3390/w12102673).
47. J. Ahmed, A. Thakur, and A. Goyal, in *Biological Treatment of Industrial Wastewater*, ed. M. P. Shah, The Royal Society of Chemistry, 2021, pp. 1-14.
48. Koul B, Yadav D, Singh S, Kumar M, Song M. Insights into the Domestic Wastewater Treatment (DWWT) Regimes: A Review. *Water*. 2022; 14(21):3542. <https://doi.org/10.3390/w14213542>
49. Pérez JM, González EF, Martínez R. Definición y caracterización del agua contaminada según la Organización Mundial de la Salud. *Rev Salud Pública*. 2017;42(2):145-155.
50. García LM, Pérez JM, Rodríguez CD. Presencia de plaguicidas, pesticidas y metales pesados en cuerpos de agua: impacto en la calidad

del agua y posibles riesgos para la salud humana. Rev Cienc Ambient. 2020;45(1):56-68

51. Berrocal Alfredo M., Blas Raúl H., Flores Joel, Siles María A.. Evaluación del potencial mutagénico de biocidas (vertimec y pentacloro) sobre cebolla. Rev. colomb. biotecnol [Internet]. Enero de 2013 [consultado el 4 de mayo de 2024]; 15(1): 17-27. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752013000100003&lng=en
52. Dourado PLR, Rocha MP, Roveda LM, Raposo JL Junior, Cândido LS, Cardoso CAL, Morales MAM, Oliveira KMP, Grisolia AB. Genotoxic and mutagenic effects of polluted surface water in the midwestern region of Brazil using animal and plant bioassays. Genet Mol Biol. 2017 Jan-Mar;40(1):123-133. doi: 10.1590/1678-4685-GMB-2015-0223. Epub 2016 Oct 31. PMID: 27801481; PMCID: PMC5409763.
53. Jacobo García, Flor del Rocío. (2018). Aguas residuales urbanas y sus efectos en la comunidad de Paso Blanco, municipio de Jesús María, Aguascalientes. *Revista de El Colegio de San Luis*, 8(16), 267-293. Epub 14 de agosto de 2020. <https://doi.org/10.21696/rcsl9162018760>
54. Quijano Parra Alfonso, Castillo T. Carol, Meléndez Gélvez Iván. POTENCIAL MUTAGÉNICO Y GENOTÓXICO DE AGUAS RESIDUALES DE LA CURTIEMBRE TASAJERO EN LA CIUDAD DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA. rev.udcaactual.divulg.cient. [Internet]. Junio de 2015 [consultado el 4 de mayo de 2024]; 18(1): 13-20. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262015000100003&lng=en
55. Oxfam E. Principales causas de la contaminación del agua [Internet]. Ingredientes que Suman. 2016 [citado el 27 de abril de 2024]. Disponible

en: <https://blog.oxfamintermon.org/cuales-son-las-principales-causas-de-la-contaminacion-del-agua/>

56. Rincón Silva NG. Evaluación de parámetros físico-químicos del agua en el proceso de potabilización del río Subachoque. Tecnogestión mirada ambient. [Internet]. 1 de junio de 2016 [citado 4 de mayo de 2024];13(1).

Disponible

en:

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/12123>

57. Parvan LG, Leite TG, Freitas TB, Pedrosa PAA, Calixto JS, Agostinho L de A. Bioensaio com Allium cepa revela genotoxicidad de herbicida con flumioxazina. Rev. Panamazónica Saude [Internet]. 2020;11(0).

Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5123/s2176-6223202000544>

58. Abdel-Monem, M., El-Faramawy, A., & El-Awady, M. (2017). Assessment of water quality using onion (Allium cepa) plant. Journal of Chemical Health Risks, 7(4), 281-292.

59. Rodríguez-Gómez, Alfredo de Jesús, & Frias-Vázquez, Sara. La mitosis y su regulación. Acta pediátrica de México. 2014. 35(1), 55-68. Recuperado en 04 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-23912014000100009&lng=es&tlng=es

60. Oliveira, L. M., & Azevedo, R. A. Use of Allium cepa L. as a bioindicator to assess the genotoxicity of water in an urban stream in southern Brazil. Environmental Monitoring and Assessment (2019). 191(10), 617

61. Kwasniewska J, Nałęcz-Jawecki G, Skrzypczak A, Plaza GA, Matejczyk M. An assessment of the genotoxic effects of landfill leachates using bacterial and plant tests. Ecotoxicol Environ Saf. 2012 Jan;75(1):55-62. doi: 10.1016/j.ecoenv.2011.08.020. Epub 2011 Sep 3. PMID: 21890203.

62. Santos, T. R., da Silva, J. C., Batista, L. A., de Souza, J. A., & de Melo, J. C. Use of *Allium cepa* L. as a bioindicator of environmental contamination: A review. *Environmental and Experimental Biology*. (2018). 16(4), 265-275. DOI: 10.22364/eeb.16.32
63. Muñoz Solarte, Diana & Pepinosa, Nancy. *Allium* test para evaluar el efecto citotóxico y genotóxico de extractos naturales en células meristemáticas de *Allium cepa*. *Memorias*. 11. 83-86. (2013).
64. Causil V. LA, Coronado G. JL, Verbel M. LF, Vega J. MF, Donado E. KA, Pacheco GC Efecto citotóxico del hipoclorito de sodio (NaClO) en células apicales de raíces de cebolla (*Allium cepa* L.). *Rev. Colomb. Ciencia. Hórtico* [Internet]. 13 de junio de 2017 [consultado el 4 de mayo de 2024];11(1):97-104. Disponible en: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/5662
65. Ibeh, Olusola & Umeham, Solomon. Genotoxicity assessment of three industrial effluents using the *Allium cepa* bioassay. *African Journal of Environmental Science and Technology*. (2018). 12. 115-122. 10.5897/AJEST2017.2447.
66. Mohammed JS, Mustapha Y, Him MA, Danladi ZN. Assessment of Cytogenotoxicity of Plastic Industrial Effluent Using *Allium cepa* Root Tip Cells. *Int J Cell Biol*. 2023 Oct 17;2023:5161017. doi: 10.1155/2023/5161017. PMID: 37881210; PMCID: PMC10597712.
67. Muñoz-Solarte, D. M. y Guerrero-Pepinosa, N. *Allium* test para evaluar el efecto citotóxico y genotóxico de extractos naturales en células meristemáticas de *Allium cepa*. *Memorias*. (2013). 11(19), 83-86.

68. Mutagénesis, carcinogénesis y teratogénesis ambiental. BAG, J. basic appl. genet. [Internet]. 2019 Oct [citado 2024 Mayo 04] ; 30(Suppl 1): 329-346. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-62332019000200017&lng=es
69. Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2002). *Molecular Biology of the Cell* (4th ed.). Garland Science. ISBN: 978-0-8153-3218-3.
70. Stucki M, Jackson SP. MDC1/NFBD1: un regulador clave de la respuesta al daño del ADN en eucariotas superiores. *Reparación de ADN (Amst)* 2004; 3: 953-7.
71. Reinhardt HC, Yaffe MB. Kinases that control the cell cycle in response to DNA damage: Chk1, Chk2, and MK2. *Curr Opin Cell Biol* 2009; 21:245-255. <https://doi.org/10.4161/cc.8.22.9908>
72. Tineo González, Evelyn, Mavares Armas, Lahirize, & Lubo, José. Modernización de las Prácticas de Laboratorio de Genética mediante fotografía digital: modelización de la mitosis. *Revista de Investigación*, 41(92). (2017). 141-162. Recuperado en 04 de mayo de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-29142017000300008&lng=es&tlng=es.
73. Xu D, Bai J, Duan Q, Costa M, Dai W. Modificaciones covalentes de histonas durante la mitosis y la meiosis. *Ciclo Celular* 2009; 8:3688-94.

74. Mendoza-Cózatl, D. G., Moreno-Sánchez, R., & González-Mendoza, D. Genetic stability and cytotoxicity of *Allium cepa* root cells exposed to iron oxide nanoparticles. *Environmental and Experimental Botany*. (2019). 166, 103802. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.10380
75. Hartwell, L. H., Hood, L., Goldberg, M. L., Reynolds, A. E., & Silver, L. M. (2010). *Genetics: From Genes to Genomes* (4th ed.). McGraw-Hill Education. ISBN: 978-0-07-352526-6.
76. Méndez J, Stillman B. Perpetuating the double helix: molecular machines at eukaryotic DNA replication origins. *Bioessays*. 2003 Dec;25(12):1158-67. doi: 10.1002/bies.10370. PMID: 14635251.
77. Okada N, Sato M. Spatiotemporal Regulation of Nuclear Transport Machinery and Microtubule Organization. *Cells*. 2015 Aug 21;4(3):406-26. doi: 10.3390/cells4030406. PMID: 26308057; PMCID: PMC4588043.
78. Afonso O, Castellani CM, Cheeseman LP, Ferreira JG, Orr B, Ferreira LT, Chambers JJ, Morais-de-Sá E, Maresca TJ, Maiato H. Spatiotemporal control of mitotic exit during anaphase by an aurora B-Cdk1 crosstalk. *Elife*. 2019 Aug 19;8:e47646. doi: 10.7554/eLife.47646. PMID: 31424385; PMCID: PMC6706241
79. Ferrer A.. Intoxicación por metales. *Anales Sis San Navarra* [Internet]. 2003 [citado 2024 Mayo 05]; 26(Suppl 1): 141-153. Disponible en: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272003000200008&lng=es
80. Qadir, A. A., Malik, R. N., & Husain, S. Z. Spatio-temporal variations in water quality of Nullah Aik-tributary of the river Chenab, Pakistan.

Environmental monitoring and assessment. (2014). 186(11), 7703-7716.
DOI: 10.1007/s10661-014-3962-2

81. Chen, Y., Zheng, L., Luo, W., Wu, K., & Liu, M. Heavy metal pollution in soils, plants, and water adjacent to industrial areas in the Pearl River Delta, South China. Environmental monitoring and assessment. (2019). 191(11), 669. DOI: 10.1007/s10661-019-7829-2.

82. Velázquez-Chávez Leticia de Jesús, Ortiz-Sánchez Ixchel Abby, Chávez-Simental Jorge Armando, Pámanes-Carrasco Gerardo Antonio, Carrillo-Parra Artemio, Pereda-Solís Martín Emilio. Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. TIP [revista en la Internet]. 2022 [citado 2024 Mayo 04] ; 25: e482. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2022000100312&lng=es. Epub 23-Jun-2023. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>.

83. Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry, 17(5), 517-568. DOI: 10.1016/s0883-2927(02)00018-5

84. Calderón J, Navarro ME, Jimenez-Capdeville ME, Santos-Diaz MA, Golden A, Rodriguez-Leyva I, Borja-Aburto V, Díaz-Barriga F. Exposure to arsenic and lead and neuropsychological development in Mexican children. Environ Res. 2001 Feb;85(2):69-76. doi: 10.1006/enrs.2000.4106. PMID: 11161656.

85. Rainbow, Philip. Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: Why and so what?. Environmental Pollution. (2003). 121. 497-507. 10.1016/S0269-7491(02)00238-5.

86. Manta DS, Angelone M, Bellanca A, Neri R, Sprovieri M. Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy. *Sci Total Environ.* 2002 Dec 2;300(1-3):229-43. doi: 10.1016/s0048-9697(02)00273-5. PMID: 12685485.
87. Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the Elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN: 0-08-037941-9.
88. López-Díaz, Jazmin Alaide, Alvira-Serrano, Luis Alberto, Talavera-Mendoza, Oscar, Sarmiento-Villagrana, Alicia, & Hernández-Flores, Giovanni. Fraccionamiento químico de metales pesados y metaloides potencialmente tóxicos en lodos generados por la planta de tratamiento de agua residual Taxco de Alarcón, Guerrero, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.* (2022). 74(2), A121221. Epub 05 de junio de 2023. <https://doi.org/10.18268/bsgm2022v74n2a121221>
89. Kresse, G., & Hafner, J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Physical Review B.* (1993). 47(1), 558-561. DOI: 10.1103/PhysRevB.47.558
90. Nordstrom DK. Public health. Worldwide occurrences of arsenic in ground water. *Science.* 2002 Jun 21;296(5576):2143-5. doi: 10.1126/science.1072375. PMID: 12077387.
91. Battaglia-Brunet F, Dictor MC, Garrido F, Crouzet C, Morin D, Dekeyser K, Clarens M, Baranger P. An arsenic(III)-oxidizing bacterial population: selection, characterization, and performance in reactors. *J Appl Microbiol.* 2002;93(4):656-67. doi: 10.1046/j.1365-2672.2002.01726.x. PMID: 12234349.

92. Coelho P, García-Lestón J, Costa S, Costa C, Silva S, Dall'Armi V, Zoffoli R, Bonassi S, de Lima JP, Gaspar JF, Pásaro E, Laffon B, Teixeira JP. Genotoxic effect of exposure to metal(loid)s. A molecular epidemiology survey of populations living and working in Panasqueira mine area, Portugal. *Environ Int.* 2013 Oct;60:163-70. doi: 10.1016/j.envint.2013.08.014. Epub 2013 Sep 13. PMID: 24036326.
93. Alloway, Brian. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. (2013). 10.1007/978-94-007-4470-7.
94. Sanchez Duarte, Nancy & Marini, Martin. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL POR METALES Y METALOIDES. *Biotecnia.* (2017). 19. 10-16. 10.18633/biotecnia.v19i1.363.
95. Vitousek, Peter & Mooney, Harold & Lubchenco, Jane & Melillo, Jerry. (1997). Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science.* 277. 10.1007/978-0-387-73412-5_1.
96. Wang, Shuxiao & Hao, Jiming. Air quality management in China: Issues, challenges, and options. *Journal of environmental sciences (China).* (2012). 24. 2-13. 10.1016/S1001-0742(11)60724-9.
97. Perevochtchikova, María. La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública.* (2013). 22(2), 283-312. Recuperado en 05 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-10792013000200001&lng=es&tlng=es.
98. Cursach, Jaime A., Rau, Jaime R., Tobar, Claudio N., & Ojeda, Jaime A.. Estado actual del desarrollo de la ecología urbana en grandes ciudades

del sur de Chile. Revista de geografía Norte Grande. (2012). (52), 57-
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022012000200004>

99. Hughes MF, Beck BD, Chen Y, Lewis AS, Thomas DJ. Arsenic exposure and toxicology: a historical perspective. *Toxicol Sci.* 2011 Oct;123(2):305-32. doi: 10.1093/toxsci/kfr184. Epub 2011 Jul 12. PMID: 21750349; PMCID: PMC3179678.
100. Clarkson TW, Magos L. The toxicology of mercury and its chemical compounds. *Crit Rev Toxicol.* 2006 Sep;36(8):609-62. doi: 10.1080/10408440600845619. PMID: 16973445.
101. Shetty SS, D D, S H, Sonkusare S, Naik PB, Kumari N S, Madhyastha H. Environmental pollutants and their effects on human health. *Heliyon.* 2023 Aug 25;9(9):e19496. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19496. PMID: 37662771; PMCID: PMC10472068.
102. Cavadía M T.I.; Roche M.M; Rosalyn Romero A.R. Estimation of the genotoxicity of the Sinú river through to bioassay with *Allium cepal.* in Montería, Córdoba-Colombia..*Revista Bistua.*2018.16(1):174-184
103. D L. Rodríguez. Evaluación de la toxicidad residual en el tratamiento de contaminantes emergentes presentes en aguas residuales y su posible impacto en los ecosistemas. Bogotá.D.C.2020.
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/52063/Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
104. López EP, Rodríguez DCA. Cuantificación por absorción atómica de Cu, Fe y Zn en alcohol destilado y agua [Internet]. Scielo.sa.cr. [citado el

27 de abril de 2024]. Disponible en:
<https://www.scielo.sa.cr/pdf/cinn/v10n2/1659-4266-cinn-10-02-387.pdf>

105. Zhong WS, Ren T, Zhao LJ. Determination of Pb (Lead), Cd (Cadmium), Cr (Chromium), Cu (Copper), and Ni (Nickel) in Chinese tea with high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry. *J Food Drug Anal.* 2016 Jan;24(1):46-55. doi: 10.1016/j.jfda.2015.04.010. Epub 2015 Jul 18. PMID: 28911408; PMCID: PMC9345429.
106. Uddin MM, Zakeel MCM, Zavahir JS, Marikar FM, Jahan I. Heavy Metal Accumulation in Rice and Aquatic Plants Used as Human Food: A General Review. *Toxics.* 2021 Dec 20;9(12):360. doi: 10.3390/toxics9120360. PMID: 34941794; PMCID: PMC8706345
107. Cabuga Jr, Cresencio & Joy, Julene & Abelada, Z & Rose, Rene & Apostado, Q & Joy, Brent & Hernando, H & Lador, John Erick & Lador, C & Lloyd, Owen & Obenza, P & James, Christian & Presilda, R & Havana, Honelyn. Allium cepa test: An evaluation of genotoxicity. (2017). 7. 12-19
108. Khatri, N., Tyagi, S. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. *Front. Life Sci.* 2015. 8, 23–39. <https://doi.org/10.1080/21553769.2014.933716>
109. Akhtar, N. Syakir Ishak, M.I, Bhawani, S.A, Umar, K. Various Natural and Anthropogenic Factors Responsible for Water Quality Degradation: A Review. *Water.* 2021. 13, 2660. <https://doi.org/10.3390/w13192660>
110. Akinboro, A., Mohammed, K., Rathnasamy, S., Muniandy, V.R. Genotoxicity Assessment of Water Samples from the Sungai Dua River in

- Pulau Pinang, Malaysia, Using the *Allium cepa* Test. *Trop. Life Sci. Res.* 2011. 22, 23–35
111. Wijeyaratne, W.M.D.N., Wadasinghe, L.G.Y.J.G., 2019. *Allium cepa* Bio Assay to Assess the Water and Sediment Cytogenotoxicity in a Tropical Stream Subjected to Multiple Point and Nonpoint Source Pollutants. *J. Toxicol.* 2019, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2019/5420124>
112. Dutta, J., Ahmad, A., Singh, J. Study of industrial effluents induced genotoxicity on *Allium cepa* L. *Caryologia.* 2018. 71, 139–145. <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1447631>
113. Kassa, B.A. Cytotoxicity and Genotoxicity evaluation of municipal wastewater discharged into the head of Blue Nile River using the *Allium Cepa* test. *Sci. Afr.* 2021. 13, e00911. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00911>
114. Pelcova, P. Kopp, R, Ridošková, A. Grmela, J. Štěrbová, D. Evaluation of mercury bioavailability and phytoaccumulation by means of a DGT technique and of submerged aquatic plants in an aquatic ecosystem situated in the vicinity of a cinnabar mine. *Chemosphere.* 2022. 288, 132545. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132545>
115. Lin, L., Yang, H., Xu, X. Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. *Front. Environ. Sci.* 2022. 10, 880246. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>
116. Nunes, E.A., De Lemos, C.T., Gavronski, L., Moreira, T.N., Oliveira, N.C.D., Da Silva, J. Genotoxic assessment on river water using different biological systems. *Chemosphere.* 2011. 84, 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.085>

117. Wijeyaratne, W.M.D.N., Wadasinghe, L.G.Y.J.G., *Allium cepa* Bio Assay to Assess the Water and Sediment Cytogenotoxicity in a Tropical Stream Subjected to Multiple Point and Nonpoint Source Pollutants. *J. Toxicol.* 2019, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2019/5420124>
118. Kassa, B.A. Cytotoxicity and Genotoxicity evaluation of municipal wastewater discharged into the head of Blue Nile River using the *Allium Cepa* test. *Sci. Afr.* 2021. 13, e00911. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00911>
119. Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M.R., Sadeghi, M. Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. *Front. Pharmacol.* 2021. 12, 643972. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
120. Cavusoglu, D., Macar, O., Kalefetoglu Macar, T., Cavusoglu, K., Yalcin, E. Mitigative effect of green tea extract against mercury(II) chloride toxicity in *Allium cepa* L. model. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. 29, 27862–27874. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17781-z>
121. Yalcin, E., Macar, O., Kalefetoglu Macar, T., Cavusoglu, D., Cavusoglu, K. Multi-protective role of *Echinacea purpurea* L. water extract in *Allium cepa* L. against mercury(II) chloride. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021. 28, 62868–62876. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15097-6>
122. Czarnek, K., Tatarczak-Michalewska, M., Szopa, A., Klimek-Szczykutowicz, M., Jafernik, K., Majerek, D., Blicharska, E. Bioaccumulation Capacity of Onion (*Allium cepa* L.) Tested with Heavy Metals in Biofortification. *Molecules.* 2023. 29, 101. <https://doi.org/10.3390/molecules29010101>

123. Al-Sulaiti, M.M., Soubra, L., Al-Ghouti, M.A. The Causes and Effects of Mercury and Methylmercury Contamination in the Marine Environment: A Review. *Curr. Pollut. Rep.* 2022. 8, 249–272. <https://doi.org/10.1007/s40726-022-00226-7>
124. Calao-Ramos, C., Bravo, A.G., Paternina-Urbe, R., Marrugo-Negrete, J., Díez, S. Occupational human exposure to mercury in artisanal small-scale gold mining communities of Colombia. *Environ. Int.* 2021. 146, 106216. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106216>
125. Harding, G., Dalziel, J., Vass, P. Bioaccumulation of methylmercury within the marine food web of the outer Bay of Fundy, Gulf of Maine. *PLOS ONE* 13. 2018. e0197220. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197220>
126. Muñoz, N.C., González-Álvarez, D., Jaramillo, A.C., Soto-Ospina, A., Ruiz, Á.A. Toxicological risk in individuals exposed to methylmercury and total mercury through daily-consumed foodstuffs in one of the mining regions of Bajo Cauca, Antioquia, Colombia. *Emerg. Contam.* 2023. 9, 100226. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100226>
127. Roque, C.R., Sampaio, L.R., Ito, M.N., Pinto, D.V., Caminha, J.S.R., Nunes, P.I.G., Raposo, R.S., Santos, F.A., Windmüller, C.C., Crespo-Lopez, M.E., Alvarez-Leite, J.I., Oriá, R.B., Pinheiro, R.F. Methylmercury chronic exposure affects the expression of DNA single-strand break repair genes, induces oxidative stress, and chromosomal abnormalities in young dyslipidemic APOE knockout mice. *Toxicology.* 2021. 464, 152992. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2021.152992>
128. Sánchez-Alarcón, J., Milić, M., Bustamante-Montes, L.P., Isaac-Olivé, K., Valencia-Quintana, R., Ramírez-Durán, N. Genotoxicity of Mercury

- and Its Derivatives Demonstrated In Vitro and In Vivo in Human Populations Studies. Systematic Review. *Toxics*. 2021. 9, 326. <https://doi.org/10.3390/toxics9120326>
129. Al Bakheet, S.A., Attafi, I.M., Maayah, Z.H., Abd-Allah, A.R., Asiri, Y.A., Korashy, H.M. Effect of long-term human exposure to environmental heavy metals on the expression of detoxification and DNA repair genes. *Environ. Pollut.* 2013. 181, 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.014>
130. Li, Y., Ye, F., Wang, A., Wang, D., Yang, B., Zheng, Q., Sun, G., Gao, X. Chronic Arsenic Poisoning Probably Caused by Arsenic-Based Pesticides: Findings from an Investigation Study of a Household. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2016. 13, 133. <https://doi.org/10.3390/ijerph13010133>
131. Lu, G., Xu, H., Chang, D., Wu, Z., Yao, X., Zhang, S., Li, Z., Bai, J., Cai, Q., Zhang, W. Arsenic exposure is associated with DNA hypermethylation of the tumor suppressor gene p16. *J. Occup. Med. Toxicol.* 2014. 9, 42. <https://doi.org/10.1186/s12995-014-0042-5>
132. Jomova, K., Jenisova, Z., Feszterova, M., Baros, S., Liska, J., Hudecova, D., Rhodes, C.J., Valko, M. Arsenic: toxicity, oxidative stress and human disease. *J. Appl. Toxicol.* 2011. 31, 95–107. <https://doi.org/10.1002/jat.1649>
133. Huang, H.-W., Lee, C.-H., Yu, H.-S. Arsenic-Induced Carcinogenesis and Immune Dysregulation. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019. 16, 2746. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152746>

134. Tam, L.M., Price, N.E., Wang, Y. Molecular Mechanisms of Arsenic-Induced Disruption of DNA Repair. *Chem. Res. Toxicol.* 2020. 33, 709–726. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.9b00464>
135. Nava-Rivera, L.E., Betancourt-Martínez, N.D., Lozoya-Martínez, R., Carranza-Rosales, P., Guzmán-Delgado, N.E., Carranza-Torres, I.E., Delgado-Aguirre, H., Zambrano-Ortíz, J.O., Morán-Martínez, J. Transgenerational effects in DNA methylation, genotoxicity and reproductive phenotype by chronic arsenic exposure. *Sci. Rep.* 2021. 11, 8276. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87677-y>
136. Ganapathy, S., Liu, J., Xiong, R., Yu, T., Makriyannis, A., Chen, C., Chronic low dose arsenic exposure preferentially perturbs mitotic phase of the cell cycle. *Genes Cancer.* 2018. 10, 39–51. <https://doi.org/10.18632/genesandcancer.185>
137. Abdel-Shafy, H.I., Ibrahim, A.M., Al-Sulaiman, A.M., Okasha, R.A. Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview. *Ain Shams Eng. J.* 2024. 15, 102293. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102293>
138. Shan, Y., Wang, W., Qin, Y., Gao, L. Multivariate analysis of trace elements leaching from coal and host rock. *Groundw. Sustain. Dev.* 2019. 8, 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.01.001>