

NANOPARTÍCULAS: EFECTOS EN LA SALUD HUMANA Y EL MEDIO AMBIENTE

Nanoparticles: human health effects and environment

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Sofía Navarro-Espinoza ¹

Diana Meza-Figueroa ²

Diego Soto-Puebla ³

Beatriz Castañeda ⁴

Martín Pedroza-Montero ⁵

Recibido: 29 / 06 / 2021

Aceptado: 11 / 09 / 2021

Publicado: 22 / 11 / 2021

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i30.166>

Autor de Correspondencia:

Sofía Elena Navarro Espinoza

Correo: sofia.navarro@unison.mx

Resumen

Recientemente, la nanotecnología ha sido un tema de gran interés que ofrece ventajas considerables en muchas áreas. Las características de muchos productos de consumo diario tienen significativas mejoras cuando están nanoestructurados. Por lo que actualmente se han integrado nanopartículas en alimentos, materiales de construcción, así como productos de belleza y cuidado personal, entre otros. En ese sentido, en los últimos años se ha incrementado su uso de manera significativa, conduciendo a la liberación no regulada de dichos nanomateriales al medio ambiente. La exposición ambiental a nanopartículas tiene un efecto negativo en diversos órganos en seres humanos. Además, su acumulación ambiental afecta los procesos naturales dañando a organismos y plantas. En este artículo se describen las vías de exposición y los peligros relevantes para los seres humanos, con una breve introducción a la literatura emergente de su ecotoxicología.

Palabras clave: Nanopartículas, Nanomateriales, Nanotoxicología, Salud humana, Medio ambiente

Abstract

Recently, nanotechnology has been a topic of great interest that offers considerable advantages in many areas. The characteristics of many everyday consumer products are significantly improved when they are nanostructured. As a result, nanoparticles have now been integrated into food, construction materials, as well as beauty and personal care products, among others. In this sense, in recent years, their use has increased significantly, leading to the unregulated release of these nanomaterials into the environment. Environmental exposure to nanoparticles has a negative effect on various organs in humans. In addition, their environmental accumulation affects natural processes by damaging organisms and plants. This article describes the exposure pathways and hazards relevant to humans, with a brief introduction to the emerging literature on their ecotoxicology.

Keywords: Nanoparticles, Nanomaterials, Nanotoxicology, Human health, Environmen.

¹ Sofía Navarro-Espinoza, Departamento de Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, sofia.navarro@unison.mx.

² Diana Meza-Figueroa, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, diana.meza@unison.mx.

³ Diego Soto-Puebla, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, diego.soto@unison.mx.

⁴ Beatriz Castañeda, Departamento de Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, beatriz.castaneda@unison.mx.

⁵ Martín Pedroza-Montero, Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, México, martin.pedroza@unison.mx.

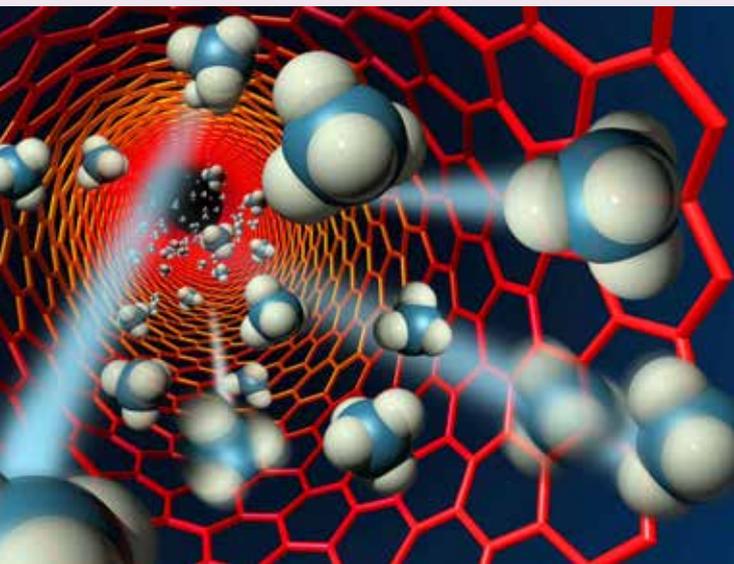
INTRODUCCIÓN

Una nanopartícula (NP) es un material de composición variable, cuyo tamaño está entre 1 y 100 nanómetros (nm) de diámetro. El prefijo griego "nano" significa "enano" y en el campo de la ciencia se refiere a estructuras que miden la mil millonésima parte de un metro ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$) o a la millonésima parte de un milímetro ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-6} \text{ mm}$) (figura 1). La nanotecnología es la disciplina que estudia la materia a nanoescala para comprender sus propiedades físicas y químicas, así como en el avance del diseño, síntesis manipulación y aplicaciones de estos materiales [1]. Las NPs son extremadamente pequeñas y para observarlas se requieren microscopios de alta resolución, como son el electrónico de transmisión (TEM) o el electrónico de barrido (SEM) [1, 2]. Las NPs se generan de manera natural en el polvo de arena de los desiertos, en sustancias químicas formadas por el plancton oceánico, incendios o como resultado de procesos geológicos (volcanes, fumarolas), etc. [3]. En áreas urbanas, se originan principalmente de manera no intencional en procesos de combustión por vehículos de motor y en el desgaste de las llantas o frenos. Aquí, las NPs se acumulan en las banquetas y calles en cantidades hasta diez veces mayores que las concentraciones naturales (o de fondo) [4]. Otra fuente de NPs no intencional es la construcción. En este caso, existen NPs esféricas de TiO_2 y Fe_3O_4 (magnetita), nanotubos de carbono y un enriquecimiento especialmente mayor de metales y metaloides (As, Co, Cr, Cu, Hg, Fe, Sn y Ta) en NPs en relación con partículas más grandes [5]. Adicionalmente, algunas características fisicoquímicas de las NPs son muy atractivas para la industria. En este sentido, se han desarrollado métodos novedosos de síntesis tales como, sol-gel, hidrotermal y coprecipitación [6]. Estos métodos consisten en procedimientos y reacciones químicas con-



troladas, con el objetivo de fabricar NPs intencionalmente para su incorporación en algunos productos. Por ejemplo, en lácteos como leches bajas en grasa, sustitutos de crema para café, polvos para preparar aguas saborizadas, dulces y confitados, con la intención de darles una apariencia más atractiva. Además, se han incorporado en productos de cuidado personal tales como champús estimulantes del crecimiento del cabello, pastas dentales con NPs de plata antibacterianas, cremas para la piel elaboradas con NPs de oro "energizantes y desintoxicantes", y maquillaje de "alta duración" [7]. En el caso de los protectores solares, se incluyen NPs de dióxido de titanio u óxido de zinc porque bloquean eficazmente la luz ultravioleta, pero se han suscitado algunas dudas sobre su toxicidad [8]. En efecto, algunos de estos nanomateriales pueden suponer riesgos para la salud humana y el medio ambiente [9]. El uso de estos productos conlleva el riesgo de exposición directa; además, las NPs pueden ingresar al sistema de alcantarillado y después al medio ambiente como efluente tratado





descargado a aguas superficiales o a tierras agrícolas. Así pues, la contaminación por NPs es un problema mundial que ha recibido y recibirá atención por parte de la comunidad científica.

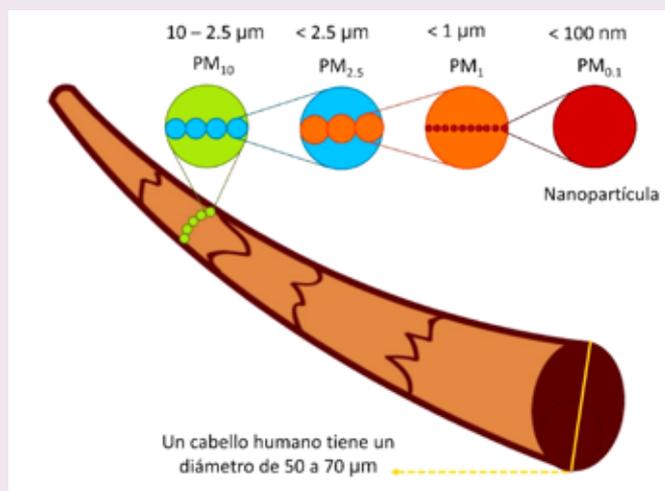


Figura 1: Escala de tamaño de las NPs. Un cabello humano tiene un diámetro aproximado de 50 a 70 micrómetros (un micrómetro, o micra, es la milésima parte de un milímetro). Las partículas se clasifican según su diámetro aerodinámico como PM_{10} (partículas entre 2.5 y 10), $\text{PM}_{2.5}$ (partículas menores a 2.5 micras), PM_1 (partículas menores a 1 micra) y como $\text{PM}_{0.1}$ (partículas menores a 100 nm), también denominadas NPs.

Implicaciones en la salud humana

Las NPs pueden ingresar al cuerpo humano a través de tres vías de exposición, la más importante es el tracto respiratorio. A medida que el aire pasa a través de la nariz pueden depositarse en las vías respiratorias y en los pul-

mones. Otra vía de ingreso es la ingestión directa; como se mencionó antes, es posible que algunos alimentos procesados contengan NPs incorporadas durante el proceso de elaboración para mejorar sus características. La tercera vía de exposición y menos probable es la cutánea. Las NPs pueden almacenarse en los folículos pilosos y las glándulas sudoríparas y posteriormente ser internalizadas por las células de la epidermis [10, 11]. A partir de estos mecanismos de entrada, las NPs pueden transportarse fácilmente entre diferentes tejidos y luego trasladarse al sistema circulatorio, y consecuentemente, a otros órganos. Los nanomateriales se distribuyen y acumulan principalmente en el hígado, los riñones, el bazo, el sistema nervioso central, la médula ósea y los ganglios linfáticos [1]. La toxicidad de las NPs depende de varios factores, como su persistencia en los órganos y la respuesta biológica del individuo. Asimismo, las NPs de diferentes composiciones químicas siguen distintas vías de absorción y mecanismos para sus respuestas biológicas finales. Estudios previos han reportado la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) provocadas por la exposición a las NPs de TiO_2 [12], ZnO [13], CeO_2 [14], Al_2O_3 [15], MnO_2 [16], etc. El desequilibrio entre la producción y la acumulación de ROS conduce a la aparición de estrés oxidativo en células y tejidos vivos [17]. Su generación excesiva por factores externos como las NPs también provoca efectos nocivos como la apoptosis (muerte celular programada) e induce daños en el ARN o el ADN [18]. Algunos estudios señalan efectos genotóxicos debido a la exposición a las NPs de CeO_2 [14], Ag [19], C [20], TiO_2 [21], ZnO [22], SiO_2 amorfo [22], CuSO_4 [23], etc. La genotoxicidad se produce por la interacción directa de las NPs con el material genético, o por daño indirecto debido a la generación de ROS [20]. Uno de los factores clave en la interacción con las estructuras vivas es su solubilidad. Las NPs formadas por compuestos solubles demostraron ser citotóxicas debido a su disolución para liberar iones metálicos. Por ejemplo, las NPs de ZnO son parcialmente solubles para liberar iones de Zn , lo que se ha demostrado como uno de los mecanismos de toxicidad inducida por las NPs de ZnO en células de mamíferos [24]. Las NPs de Ag , que pueden conducir a la acumulación de iones Ag ,



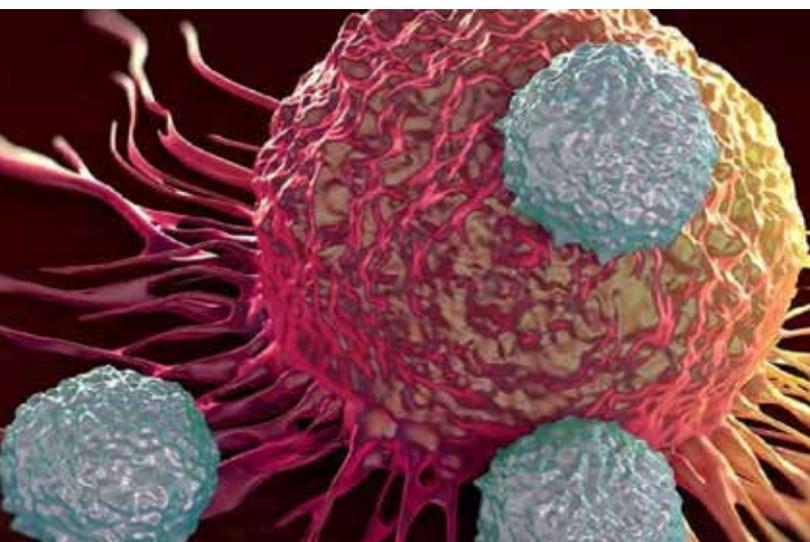


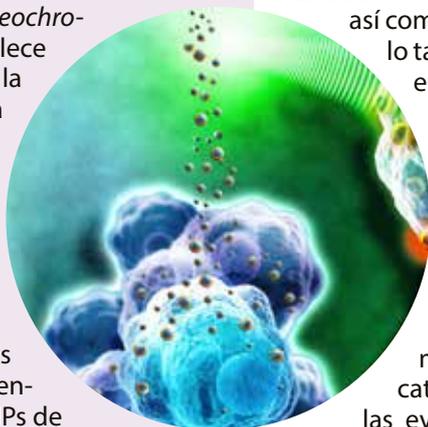
Figura 2: Vías de ingesta de NPs para el humano y productos de uso cotidiano que podrían contener NPs.

también fueron citotóxicas para las células endoteliales [25]. Otro ejemplo son los puntos cuánticos basados en Cd, que pueden liberar iones altamente tóxicos [26]. Las otras NPs que no se disuelven o degradan fácilmente persisten en el sistema biológico y provocan una serie de efectos a largo plazo. Las consecuencias de tal acumulación generalmente implican una influencia carcinogénica, efectos mutagénicos o teratogénicos en el organismo [27]. Conjuntamente con este hecho, se ha señalado la formación de vesículas como un mecanismo en donde los macrófagos alveolares excluyen a los intrusos tóxicos (fagocitosis) [27]. Las NPs de muy baja biosolubilidad como SiO_2 , CeO_2 , ZrO_2 , y asbestos pueden destruir a estas células liberando enzimas y ROS. Esto genera citoquinas inflamatorias y fibróticas, causando daños en el tejido [28]. En resumen, se han identificado varios procesos de daño toxicológico, sin embargo, los mecanismos completos que subyacen a ciertos hallazgos toxicológicos aún no se comprenden del todo y siguen siendo objeto de intensa investigación.

Impacto ambiental

La comprensión de la síntesis para la producción de NPs ayuda a eficientizar y minimizar la generación de contaminantes o a reducir sus emisiones a la atmósfera. El uso de las NPs como eje central de las nuevas tecnologías de remediación ambiental posibilita la remoción o reducción de contaminantes en aire, agua y suelo [29]. Sin embargo, más allá de la gran cantidad de efectos benéficos, también aparecen nuevos riesgos asociados con las fuentes industriales estacionarias (procesos de combustión) [30], las fuentes móviles [31] y los nuevos ambientes laborales [32]. Además de la alteración de fuentes naturales como el polen y los virus [33] que cargados con las NPs al aspirarlas provocan alergias y la diseminación acelerada de algunas enfermedades, respectivamente. La presencia de las NPs en la atmósfera cambia los procesos fotoquímicos afectando, por ejemplo, la nucleación en las nubes [34]. Estos cambios climáticos favorecen la migración de las NPs a

grandes distancias. Éstas luego se depositan en cuerpos de agua o en suelos generando una contaminación secundaria. Como consecuencia de estos procesos, la población puede exponerse a las NPs [35]. Se ha demostrado, mediante estudios ecotoxicológicos, que las NPs tienen efectos negativos sobre los organismos acuáticos unicelulares, pudiendo afectar incluso a los animales acuáticos como crustáceos y peces. Por ejemplo, se ha identificado la citotoxicidad y genotoxicidad en el molusco bivalvo de agua dulce *Coelatura aegyptiaca* [36]. También se encontró que la exposición del pez Carpa (*Cyprinus carpio*) a concentraciones subletales de las NPs de plata le genera lesiones en el intestino y branquias [37]. Igualmente, las NPs de ZnO fueron capaces de inducir estrés oxidativo en los músculos de peces tilapia (*Oreochromis niloticus*) [38]. Lo anterior establece la posibilidad de bioacumulación en la cadena trófica, que llega magnificada a los seres humanos [39]. La principal vía de exposición de NPs a animales acuáticos es la alimentación, ya que las algas y otras plantas pueden absorberlas en grandes cantidades [40]. También es conocido que las NPs afectan el desarrollo de las plantas. Por ejemplo, se reportó que las NPs de Al_2O_3 y TiO_2 perturbaban el crecimiento de las raíces [39, 41]. Además, las NPs de TiO_2 disminuyen la conductividad hidráulica y, por lo tanto, inhiben el crecimiento de las hojas [41]. Asimismo, las plantas expuestas a las NPs de CeO_2 mostraron una respuesta negativa al crecimiento y la fisiología [42]. Recientemente, Jiang *et al.* describieron el efecto negativo de las NPs ya que, las partículas más pequeñas que el diámetro de las aberturas de las estomas (10-50 μm) ingresan



directamente a la cavidad subestomática generando su obstrucción. En consecuencia, ocurre la disminución del crecimiento y los procesos fotosintéticos, provocando la disminución de la biomasa en entornos urbanos [41].

Comentarios finales

En la actualidad existe evidencia de los efectos negativos de los nanomateriales en la salud humana y el ecosistema [5, 9-12, 45]. A pesar del aumento de la investigación, todavía existen lagunas de conocimiento debido a que, hasta la fecha, solamente se dispone de unas pocas técnicas de extracción y análisis para medir la concentración de las NPs en sistemas naturales. Esto resulta en una amplia falta de información sobre sus mecanismos de toxicidad, así como de su presencia en el medio ambiente. Por lo tanto, existe muy poca orientación regulatoria en esta área, algo fundamental para la salud pública. En virtud de la creciente producción de NPs, es inevitable su liberación involuntaria o intencional en el medio ambiente, por lo que se debe prever un plan de evaluación de sus flujos de emisión.

Es muy importante señalar que, además, se necesitan más estudios sobre plantas y diferentes especies de invertebrados marinos y terrestres. Uno de los desafíos es categorizar y priorizar las NPs a los efectos de las evaluaciones de riesgo ecotoxicológico [43], para el análisis del ciclo de vida del producto y determinar los puntos potenciales donde estos materiales pueden entrar al medio ambiente. También es necesario desarrollar técnicas y métodos estandarizados para caracterizar las NPs en el medio ambiente [44]. Tales investigaciones tendrán una contribución importante asegurando que los nuevos productos que incluyen materiales nanoestructu-





rados se fabricarán de manera segura, aprovechando al máximo su potencial para luego desecharse en una forma adecuada e inocua.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Gómez-Garzón, "Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde" *Repert. Med. Cir.*, vol. 27, no. 2, 2018.
- [2] I. Khan, K. Saeed, and I. Khan, "Nanoparticles: Properties, applications and toxicities" *Arab. J. Chem.*, vol. 12, no. 7, pp. 908-931, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arab-jc.2017.05.011>.
- [3] V. K. Sharma, J. Filip, R. Zboril, and R. S. Varma, "Natural inorganic nanoparticles—formation, fate, and toxicity in the environment" *Chem. Soc. Rev.*, vol. 44, no. 23, pp. 8410-8423, 2015, doi: <https://doi.org/10.1039/C5CS00236B>.
- [4] M. S. Ermolin, P. S. Fedotov, A. I. Ivaneev, V. K. Karandashev, N. N. Fedyunina, and A. A. Burmistrov, "A contribution of nanoscale particles of road-deposited sediments to the pollution of urban runoff by heavy metals" *Chemosphere*, vol. 210, pp. 65-75, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.150>.
- [5] M. L. Oliveira, M. Izquierdo, X. Querol, R. N. Lieberman, B. K. Saikia, and L. F. Silva, "Nanoparticles from construction wastes: a problem to health and the environment" *J. Clean. Prod.*, vol. 219, pp. 236-243, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10471010>.
- [6] A. V. Rane, K. Kanny, V. Abitha, and S. Thomas, "Methods for synthesis of nanoparticles and fabrication of nanocomposites," in *Synt. Inor. Nanomat.*: Elsevier, 2018, pp. 121-139.
- [7] A. Weir, P. Westerhoff, L. Fabricius, K. Hristovski, and N. von Goetz, "Titanium Dioxide Nanoparticles in Food and Personal Care Products" *Environ. Sci. & Tech.*, vol. 46, no. 4, pp. 2242-2250, 2012/02/21 2012, doi: <https://doi.org/10.1021/es204168d>.
- [8] J. Musial, R. Krakowiak, D. T. Mlynarczyk, T. Goslinski, and B. J. Stanis, "Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products—What do we know about their safety?" *Nanomaterials*, vol. 10, no. 6, p. 1110, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/nano10061110>.
- [9] R. K. Basniwal, "Toxicity of nanoparticles and their impact on environment" *Nanosci. Plant–Soil Syst.*, pp. 531-543, 2017.
- [10] L. Calderón-Garcidueñas *et al.*, "Combustion-and friction-derived magnetic air pollution nanoparticles in human hearts" *Environ. Res.*, vol. 176, p. 108567, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108567>.
- [11] M. Crosera *et al.*, "Nanoparticle dermal absorption and toxicity: a review of the literature" *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, vol. 82, no. 9, pp. 1043-1055, 2009, doi: <https://doi.org/10.1007/s00420-009-0458-x>.
- [12] G. I. Dar, M. Saeed, and A. Wu, "Toxicity of TiO₂ nanoparticles," in *TiO₂ Nanoparticles: Applications in Nanobiotechnology and Nanomedicine*, 2020, pp. 67-103.
- [13] V. Sharma, D. Anderson, and A. Dhawan, "Zinc oxide nanoparticles induce oxidative DNA damage and ROS-triggered mitochondria mediated apoptosis in human liver cells (HepG2)" *Apoptosis*, vol. 17, no. 8, pp. 852-870, 2012, doi: <https://doi.org/10.1007/s10495-012-0705-6>.
- [14] M. Auffan *et al.*, "CeO₂ nanoparticles induce DNA damage towards human dermal fibroblasts in vitro" *Nanotoxicology*, vol. 3, no. 2, pp. 161-171, 2009, doi: <https://doi.org/10.1080/17435390902788086>.
- [15] D. A. Saud Alarifi and S. Alkahtani, "Nanoalumina induces apoptosis by impairing antioxidant enzyme systems in human hepatocarcinoma cells" *Int. J. Nanomedicine*, vol. 10, p. 3751, 2015.
- [16] S. Alarifi, D. Ali, and S. Alkahtani, "Oxidative stress-induced DNA damage by manganese dioxide nanoparticles in human neuronal cells" *Biomed Res. Int.*, vol. 2017, 2017, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/5478790>.
- [17] S. Attarilar *et al.*, "The toxicity phenomenon and the related occurrence in metal and metal oxide nanoparticles: a brief review from the biomedical perspective" *Front. Bioeng.*, vol. 8, 2020, doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00822>.
- [18] R. Wan, Y. Mo, L. Feng, S. Chien, D. J. Tollerud, and Q. Zhang, "DNA damage caused by metal nanoparticles: involvement of oxidative stress and activation of ATM" *Chem. Res.*

- Toxicol.*, vol. 25, no. 7, pp. 1402-1411, 2012, doi: <https://doi.org/10.1021/tx200513t>.
- [19] P. AshaRani, G. Low Kah Mun, M. P. Hande, and S. Valiyaveetil, "Cytotoxicity and genotoxicity of silver nanoparticles in human cells" *ACS nano*, vol. 3, no. 2, pp. 279-290, 2009, doi: <https://doi.org/10.1021/nn800596w>.
- [20] Z. Magdolenova, A. Collins, A. Kumar, A. Dhawan, V. Stone, and M. Dusinska, "Mechanisms of genotoxicity. A review of in vitro and in vivo studies with engineered nanoparticles" *Nanotoxicology*, vol. 8, no. 3, pp. 233-278, 2014, doi: <https://doi.org/10.3109/17435390.2013.773464>.
- [21] T. Chen, J. Yan, and Y. Li, "Genotoxicity of titanium dioxide nanoparticles" *J. Food Drug Anal.*, vol. 22, no. 1, pp. 95-104, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2014.01.008>.
- [22] S. Singh, "Zinc oxide nanoparticles impacts: cytotoxicity, genotoxicity, developmental toxicity, and neurotoxicity" *Toxicol. Mech. Methods.*, vol. 29, no. 4, pp. 300-311, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/15376516.2018.1553221>.
- [23] G. Isani *et al.*, "Comparative toxicity of CuO nanoparticles and CuSO4 in rainbow trout" *Ecotoxicol. Environ.*, vol. 97, pp. 40-46, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.07.001>.
- [24] S. R. Saptarshi, A. Duschl, and A. L. Lopata, "Biological reactivity of zinc oxide nanoparticles with mammalian test systems: an overview" *Nanomedicine*, vol. 10, no. 13, pp. 2075-2092, 2015, doi: <https://doi.org/10.2217/nnm.15.44>.
- [25] Y. Cao, "The toxicity of nanoparticles to human endothelial cells" *Cell. Molec. Toxicol. Nano.*, pp. 59-69, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-72041-8_4.
- [26] M. Yan, Y. Zhang, K. Xu, T. Fu, H. Qin, and X. Zheng, "An in vitro study of vascular endothelial toxicity of CdTe quantum dots" *Toxicology*, vol. 282, no. 3, pp. 94-103, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tox.2011.01.015>.
- [27] T. J. Brunner *et al.*, "In vitro cytotoxicity of oxide nanoparticles: comparison to asbestos, silica, and the effect of particle solubility" *Environ. Sci. & Tech.*, vol. 40, no. 14, pp. 4374-4381, 2006, doi: <https://doi.org/10.1021/es052069i>.
- [28] A. P. Scalia Carneiro *et al.*, "Inflammatory and oxidative stress biomarkers induced by silica exposure in crystal craftsmen" *Am. J. Ind. Med.*, vol. 63, no. 4, pp. 337-347, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/ajim.23088>.
- [29] P. Biswas and C.-Y. Wu, "Nanoparticles and the environment" *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 55, no. 6, pp. 708-746, 2005, doi: <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464656>.
- [30] M.-C. O. Chang, J. C. Chow, J. G. Watson, P. K. Hopke, S.-M. Yi, and G. C. England, "Measurement of ultrafine particle size distributions from coal-, oil-, and gas-fired stationary combustion sources" *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 54, no. 12, pp. 1494-1505, 2004.
- [31] D. B. Kittelson, "Engines and nanoparticles: a review" *J. Aerosol Sci.*, vol. 29, no. 5-6, pp. 575-588, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(97\)10037-4](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(97)10037-4).
- [32] J. H. Vincent and C. F. Clement, "Ultrafine particles in workplace atmospheres," in *Ultrafine Particles In The Atmosphere*: World Scientific, 2000, pp. 141-154.
- [33] C. J. Hogan, M.-H. Lee, and P. Biswas, "Capture of viral particles in soft X-ray-enhanced corona systems: charge distribution and transport characteristics" *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 38, no. 5, pp. 475-486, 2004, doi: <https://doi.org/10.1080/02786820490462183>.
- [34] P. H. McMurry, K. Shan Woo, R. Weber, D.-R. Chen, and D. Y. Pui, "Size distributions of 3-10 nm atmospheric particles: Implications for nucleation mechanisms" *Philos. Trans. R. Soc.*, vol. 358, no. 1775, pp. 2625-2642, 2000, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0673>.
- [35] K. Donaldson, X. Li, and W. MacNee, "Ultrafine (nanometre) particle mediated lung injury" *J. Aerosol Sci.*, vol. 29, no. 5-6, pp. 553-560, 1998, doi: <https://www.jstor.org/stable/2666952>.
- [36] S. R. Fahmy and D. A. Sayed, "Toxicological perturbations of zinc oxide nanoparticles in the *Coelatura aegyptiaca* mussel" *Toxicol. Indust. Health*, vol. 33, no. 7, pp. 564-575, 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0748233716687927>.
- [37] B. Mansouri *et al.*, "Histopathological effects following short-term coexposure of *Cyprinus carpio* to nanoparticles of TiO2 and CuO" *Environmen. Monit. Assess.*, vol. 188, no. 10, pp. 1-12, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5579-6>.
- [38] A. M. Abdelazim, I. M. Saadeldin, A. A.-A. Swelum, M. M. Affi, and A. Alkaladi, "Oxidative Stress in the Muscles of the Fish Nile Tilapia Caused by Zinc Oxide Nanoparticles and Its Modulation by Vitamins C and E" *Oxid. Med. Cell. Longev.*, vol. 2018, p. 6926712, 2018/04/05 2018, doi: <https://doi.org/10.1155/2018/6926712>.
- [39] S. M. Taghavi *et al.*, "Effects of nanoparticles on the environment and outdoor workplaces" *Electronic. Physician*, vol. 5, no. 4, p. 706, 2013, doi: <https://doi.org/10.14661/2013.706-712>.
- [40] F. Wang *et al.*, "Effects of nanoparticles on algae: Adsorption, distribution, ecotoxicity and fate" *App. Sci.*, vol. 9, no. 8, p. 1534, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/app9081534>.
- [41] L. Jiang, Q. Zhang, J. Wang, and W. Liu, "Ecotoxicological effects of titanium dioxide nanoparticles and Galaxolide, separately and as binary mixtures, in radish (*Raphanus sativus*)" *J. Environ. Manage.*, vol. 294, p. 112972, 2021/09/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112972>.
- [42] M. Bundschuh *et al.*, "Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to?" *Environ. Sci. Euro.*, vol. 30, no. 1, pp. 1-17, 2018, doi: <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0132-6>.
- [43] R. Handy and R. Owen, "Formulating the problems for environmental risk assessment of nanomaterials" *Environ. Sci. & Tech.*, 2007, doi: <https://doi.org/10.1021/es072598h>.
- [44] R. D. Handy, R. Owen, and E. Valsami-Jones, "The ecotoxicology of nanoparticles and nanomaterials: current status, knowledge gaps, challenges, and future needs" (in eng), *Ecotoxicology*, vol. 17, no. 5, pp. 315-25, Jul 2008, doi: <https://doi.org/10.1007/s10646-008-0206-0>.
- [45] H.-J. Eom and J. Choi, "Oxidative stress of CeO2 nanoparticles via p38-Nrf-2 signaling pathway in human bronchial epithelial cell, Beas-2B" *Toxicol. Lett.*, vol. 187, no. 2, pp. 77-83, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2009.01.028>.

Cómo citar este artículo:

Navarro Espinoza, S., Meza-Figueroa, D., Soto-Puebla, D., Castañeda, B., & Pedroza-Montero, M. (2021). NANOPARTÍCULAS: EFECTOS EN LA SALUD HUMANA Y EL MEDIO AMBIENTE. *EPISTEMUS*, 15(30). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i30.166>

