

Sección: Hot Science

Contaminación ambiental por el desgaste de neumáticos: un problema químico invisible

Environmental pollution from tire wear: an invisible chemical problem

María Fernanda Ramírez-Manjarrez¹

Israel Castro-Ramírez²

Omar Cruz-Santiago^{2*}

¹Posgrado en Biociencias, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, 36500, Km. 9.0 Carretera Irapuato-León, Irapuato, Guanajuato, Mexico.

²Departamento de Ciencias Ambientales. División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, 36500, Km. 9.0 Carretera Irapuato-León, Irapuato, Guanajuato, Mexico.

*Autor para la correspondencia: o.cruz@ugto.mx

RESUMEN

El impacto ambiental derivado del desgaste de neumáticos ha sido estudiado en años recientes, debido a sus efectos sobre organismos acuáticos y terrestres, como resultado de la dispersión de compuestos químicos presentes en estos productos. Entre ellos destacan el antioxidante 6PPD y su producto de transformación, el 6PPD-Q, considerados contaminantes emergentes asociados con efectos de toxicidad ambiental. A pesar de los avances por comprender su comportamiento ambiental, el conocimiento disponible es limitado, especialmente en países como México, subrayando la necesidad de continuar investigando sus efectos biológicos y los riesgos asociados a la exposición prolongada para la salud ambiental y humana.

Palabras clave: 6PPD, contaminantes emergentes, toxicidad ambiental.

SUMMARY

Environmental impact derived from tire wear has been studied in recent years, due to its effects on aquatic and terrestrial organisms, resulting from the dispersion of chemical compounds present in these products. Among them, the antioxidant 6PPD and its transformation product, 6PPD-Q, stand out as emerging contaminants associated with environmental toxic effects. Despite advances in understanding the environmental behavior, the available knowledge remains limited, particularly in countries such as Mexico, highlighting the need to continue investigating their biological effects and the risks associated with prolonged exposure to environmental and human health.

Keywords: 6PPD, emerging contaminants, environmental toxicity.

Introducción

La mayoría de las personas nos hemos percatado del problema ambiental que representan los neumáticos, al verlos acumulados en los alrededores de zonas viales, abandonados en parques o perturbando el paisaje. Sin embargo, existe un impacto que ha sido invisible durante años derivado al uso y desgaste: diminutas partículas que contienen residuos químicos potencialmente tóxicos que terminan contaminando el suelo y el agua (Figura 1).

La incorporación de diversos químicos durante la manufactura de los neumáticos se realiza para aumentar su durabilidad, su resistencia al desgaste y evitar su envejecimiento prematuro. Entre ellos destaca el antioxidante 6PPD [N-(1,3-dimetilbutil)-N'-fenil-p-fenilendiamina] el cual ha despertado la preocupación de la comunidad científica, debido a su alta capacidad de transformarse en 6PPD-Q (6PPD-Quinona), un contaminante encontrado en 2020 como el causante de la muerte masiva de salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*), y que se ha catalogado como un contaminante de

presencia universal en las zonas de alto tráfico vehicular, pues ha sido detectado incluso en polvo de áreas recreativas y polvo de interiores [1, 3].

A partir de este hallazgo, se han realizado numerosas investigaciones para comprender el comportamiento de estos compuestos en el ambiente, revelando su presencia en cuerpos de agua, escorrentía, suelo, polvo y en la atmósfera. Además, estas investigaciones evidencian los efectos provocados por la exposición al 6PPD y el 6PPD-Q en diversos organismos acuáticos y terrestres, como algunas especies de peces y ratones, respectivamente [2, 3].

Sin embargo, pese al conocimiento adquirido sobre el 6PPD y el 6PPD-Q en años recientes, la información disponible sigue siendo limitada. En este contexto, resulta indispensable continuar realizando investigaciones con el fin de comprender plenamente el comportamiento ambiental de estos contaminantes emergentes, nombrados así ya que su presencia en el ambiente ha sido detecta-

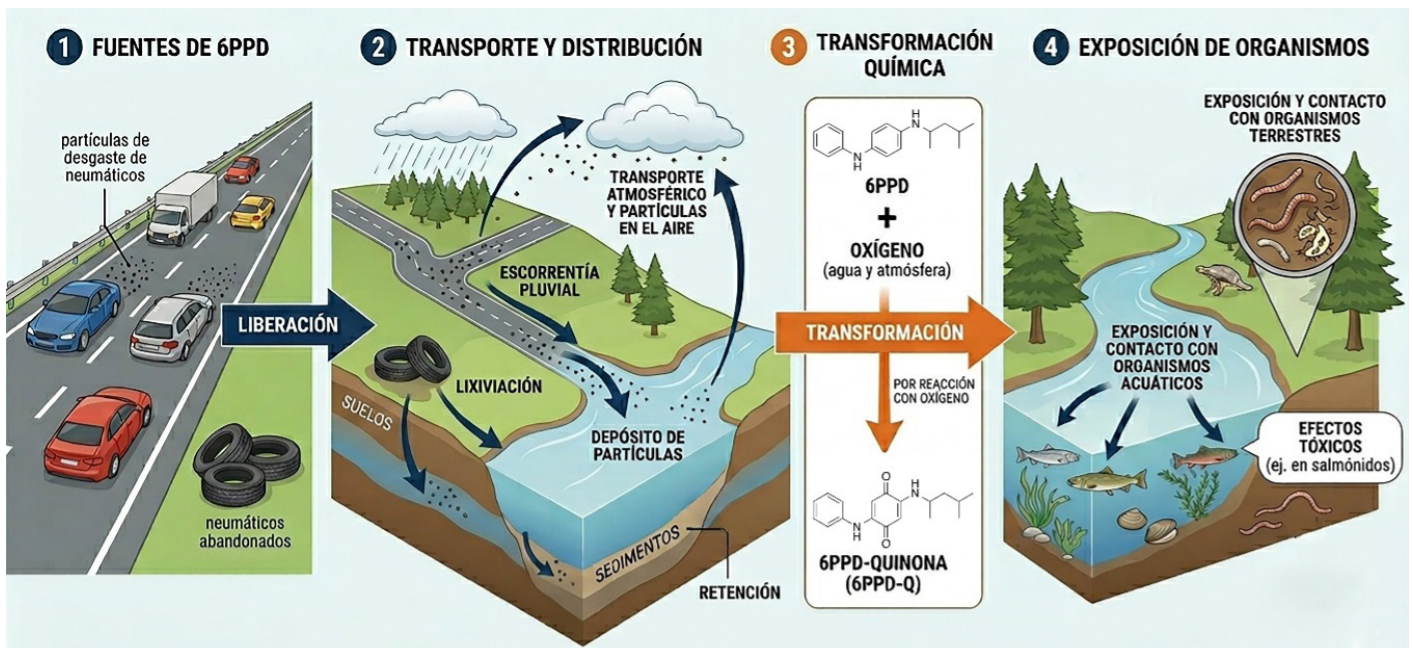


Figura 1. Comportamiento ambiental del 6PPD: fuentes, distribución, transformación y exposición. Ilustración creada con Google Gemini 3 Flash basado en Tian et al. [1] y Zhao et al. [3].

da recientemente, por lo que no se conocía su potencial tóxico ni sus efectos, y como consecuencia, no cuentan con ningún tipo de regulación. Además, conocer su potencial tóxico y los impactos a la salud humana derivados de la exposición constante debe convertirse en prioridad, dado que esta problemática surge debido a nuestras actividades cotidianas. Por su parte, la difusión sobre el panorama actual y las perspectivas futuras de estos compuestos sirven de base para la realización de más investigaciones científicas en países como el nuestro.

¿Qué es el 6PPD y por qué preocupa?

El aditivo 6PPD es un químico usado desde la década de 1960 en la industria de los neumáticos de caucho actuando como una capa protectora ante la abrasión. Entre sus propiedades fisicoquímicas destaca su potencial para adherirse a lípidos, lo que puede significar una alta tendencia de permanecer en tejidos grasos como el hígado en caso de exposición y acumularse. Además, el 6PPD posee gran afinidad por la materia orgánica, lo que le confiere un comportamiento para ser retenido en suelos o sedimentos. No obstante, a pesar de que sus propiedades facilitan su permanencia en el ambiente, y que el 6PPD ha resultado comprometer el bienestar de diversos organismos, debido a su liberación ambiental prolongada, la mayor preocupación sobre la presencia de este compuesto en los ecosistemas es debido a su alta reactividad con el oxígeno [4].

Esta característica permite la transformación del 6PPD, al reaccionar con el oxígeno atmosférico o presente en el agua, en un contaminante con mayor potencial tóxico, el 6PPD-Quinona o 6PPD-Q (Figura 1). Se ha reportado que el 6PPD-Q se vuelve más estable en el ambiente, lo que aumenta su tiempo de vida media, es decir, el tiempo que tarda el contaminante en reducir su concentración a

la mitad. Debido a esto, puede permanecer durante más tiempo en el ambiente. Además, los cambios en su composición química alteran sus propiedades, y, en consecuencia, este contaminante produce mayores efectos a la salud a menores concentraciones, es decir, es más tóxico [5].

¿Qué se sabe hasta el momento?

Se han publicado diversas investigaciones realizadas en Norteamérica, Europa y Asia, en las cuales se han detectado concentraciones traza (nanogramo o microgramo por litro) de estos compuestos en la escorrentía urbana, cuerpos de agua cercanos a zonas con alta densidad vehicular, así como en sedimentos, suelos urbanos y polvo atmosférico, demostrando la amplia presencia ambiental de ambos contaminantes, así como su capacidad de movilizarse y distribuirse en los ecosistemas, lo que conlleva al aumento de rutas de exposición para los organismos [2].

Uno de los estudios más destacados, en el que se identificó al 6PPD-Q como el principal responsable de la mortalidad masiva del salmón coho (*Oncorhynchus kisutch*, Figura 2), fue registrado en el noreste del Pacífico de Estados Unidos en 2020 [1]. Este caso demostró la gravedad de la presencia de estos compuestos en el ambiente, porque resultó ser letal



Figura 2. Salmón coho adulto (*Oncorhynchus kisutch*). Fotografía de Bureau of Land Management Oregon and Washington (2015). Utilizada bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0)

incluso en concentraciones extremadamente pequeñas: apenas 9.5 partes por trillón, equivalentes a unos cuantos nanogramos en un litro de agua. Mostrando así una evidencia de que sustancias prácticamente invisibles para nosotros pueden tener consecuencias graves para la vida acuática.

Además, resulta necesario analizar no solamente su distribución ambiental, por ello se han publicado artículos enfocados en comprender su toxicocinética, es decir, qué ocurre cuando estos contaminantes ingresan al organismo. Bioensayos realizados con pez cebra (*Danio rerio*) han demostrado que la exposición de ambos compuestos se da principalmente a través de la respiración branquial y se acumulan en el organismo, aunque presentan distintos patrones de distribución. Por su parte el 6PPD tiende a concentrarse mayormente en el hígado, mientras que la afinidad del 6PPD-Q predomina en el cerebro, confiriéndole potencial neurotóxico [2]. Por otro lado, en organismos terrestres se ha evidenciado también tener impactos negativos como alteraciones en la actividad fisiológica, lo que repercute a especies de relevancia para la dinámica de los suelos, como las lombrices de tierra (*Eisenia andrei*), cuya participación es fundamental para el ciclo de nutrientes y la descomposición de materia orgánica [6].

Estos datos indican que la disponibilidad del 6PPD y, en especial, del 6PPD-Q en el ambiente permite la exposición constante de diversos organismos vivos, los cuales son susceptibles a sufrir efectos tóxicos a distintas escalas biológicas. Sin embargo, gran parte de esta información es derivada de estudios realizados en zonas específicas y bajo condiciones controladas, lo que resalta la necesidad de desarrollar bioensayos e investigaciones en diferentes contextos ambientales para construir un entendimiento completo del comportamiento de estos contaminantes emergentes.

Del ambiente al ser humano: ¿qué se sabe sobre la exposición humana?

La presencia del 6PPD y el 6PPD-Q en diversos ecosistemas también ha despertado el interés por evaluar el posible riesgo para la salud humana. Un estudio realizado en 2022 en tres regiones del sur de China reportó la detección de ambos contaminantes en muestras de orina recolectadas de habitantes de estas zonas (los grupos poblacionales estudiados fueron adultos, niños y mujeres embarazadas). Los análisis demostraron concentraciones significativamente mayores de 6PPD-Q que las de 6PPD, lo que resalta el potencial de exposición de estos compuestos y la urgencia de realizar evaluaciones de riesgo integrales para la salud humana ante exposiciones prolongadas [7].

Aunque todavía no se conocen con precisión las consecuencias de esta exposición para la salud humana, la presencia de ambos compuestos en muestras biológicas indica que pueden ingresar al organismo a través de diferentes rutas, como la inhalación de partículas suspendidas de aire, el consumo de agua o alimentos contaminados, y el contacto con ambientes urbanos [4]. Subrayando así, la necesidad de desarrollar estudios toxicológicos más detallados en seres humanos, sobre todo porque los patrones de exposición pueden variar entre la población general y los grupos vulnerables, como niños, adultos mayores y mujeres embarazadas, que pueden presentar mayor sensibilidad.

Perspectivas: limitaciones y desafíos

A pesar de los avances en el estudio del 6PPD y el 6PPD-Q, aún existen importantes desafíos para comprender de forma integral su comportamiento e implicaciones ambientales. Las propiedades fisicoquímicas de ambos compuestos dificulta predecir cómo se transportan, transforman y acumulan en los ecosistemas, por lo que todavía existen incer-

tidumbres sobre su destino final, así como sus efectos a largo plazo.

Otro de los principales desafíos surge debido a que la información disponible proviene de estudios bajo condiciones controladas de laboratorio o en regiones con condiciones ambientales específicas. Aunque diversos estudios han resultado fundamentales para identificar rutas de exposición y mecanismos de toxicidad, aún resulta necesario ampliar las investigaciones en ecosistemas reales, donde factores como la temperatura, las lluvias, la presencia de otros contaminantes y las actividades humanas pueden modificar la exposición y los efectos observados.

Además, en futuros estudios se deberían tomar en cuenta la evaluación de la toxicidad de ambos compuestos en poblaciones humanas. Aunque ya se ha demostrado la exposición al 6PPD y al 6PPD-Q, aún se requiere investigar sus posibles efectos en poblaciones vulnerables, como niños y mujeres embarazadas, así como en trabajadores relacionados con la fabricación, reciclaje y manejo de neumáticos.

En México, el panorama es aún más incierto. Hasta el momento no existen reportes publicados que documenten la presencia o los efectos del 6PPD y el 6PPD-Q en ecosistemas nacionales, lo que limita la evaluación de riesgos ambientales y para la salud humana. Frente a esto, resulta fundamental impulsar programas de monitoreo ambiental, estudios ecotoxicológicos y estrategias de gestión que permitan comprender si existe una problemática, y la magnitud de esta.

Conclusiones

El descubrimiento de la toxicidad del 6PPD-Q reveló una fuente de contaminación que por muchos años pasó desapercibida: el desgaste cotidiano de los neumáticos. La presencia de este contaminante tanto en los eco-

sistemas acuáticos como terrestres demuestra que sus efectos pueden ser más amplios de lo que se pensaba.

Por ello, es necesario continuar investigando sus impactos ambientales, sobre todo en países en vías de desarrollo como México. Esto puede realizarse fortaleciendo el monitoreo y promoviendo soluciones que permitan reducir los riesgos asociados al uso masivo de neumáticos.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo otorgado por la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) a Manjarrez-Ramírez (Becaria No. 2145478). Se declara que se utilizó Microsoft 365 Copilot únicamente como apoyo para la corrección ortográfica y mejora de la redacción en algunas secciones del texto, sin comprometer la originalidad del manuscrito.

Referencias

- [1] Tian, Z., Zhao, H., Peter, K. T., Gonzalez, M., Wetzel, J., Wu, C., Hu, X., Prat, J., Mudrock, E., Hettinger, R., Cortina, A. E., Biswas, R. G., Kock, F. V. C., Soong, R., Jenne, A., Du, B., Hou, F., He, H., Lundeen, R., ... Kolo-dziej, E. P. (2021). A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon. *Science*, 371(6525), 185–189. <https://doi.org/10.1126/science.abd6951>
- [2] Ding, Y., y Wang, W.-X. (2026). Tissue-specific bioaccumulation and hepatotoxicity of 6PPD and 6PPD-Quinone in zebrafish. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 8, 307–318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.11.029>
- [3] Zhao, H. N., Thomas, S. P., Zylka, M. J., Dorrestein, P. C., y Hu, W. (2023). Urine Excretion, Organ Distribution, and Placental Transfer of 6PPD and 6PPD-Quinone in Mice and Potential Developmental Toxicity through Nuclear Receptor Pathways. *Environmental*

Science and Technology, 57(36), 13429–13438. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05026>

[4] Ihenetu, C.S., Xu, Q., Fang, L., Azeem, M., Li, G. y Enyoh, E.C. (2025). 6PPD and 6PPD-Quinone in the Urban Environment: Assessing Exposure Pathways and Human Health Risks. *Urban Science*, 9(228). <https://doi.org/10.3390/urbansci9060228>

[5] Jiao, F., Zhao, Y., Yue, Q., Wang, Q., Li, Z., Lin, W., Han, L., y Wei, L. (2025). Chronic toxicity mechanisms of 6PPD and 6PPD-Quinone in zebrafish. *Environmental Science and Ecotechnology*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2025.100567>

[6] Masset, T., Breider, F., Renaud, M., Müller, J., Bergmann, A., Vermeirssen, E., Dufey, W., Schirmer, K. y Ferrari, B.J.D. (2025). Effects of tire particles on earthworm (*Eisenia andreii*) fitness and bioaccumulation of tire-related chemicals. *Environmental Pollution*, 368. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.12578>

[7] Du, B., Liang, B., Li, Y., Shen, M., Liu, L.-Y., & Zeng, L. (2022). First Report on the Occurrence of N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) and 6PPD-Quinone as Pervasive Pollutants in Human Urine from South China. *Environmental Science & Technology Letters*, 9(12), 1056–1062. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00821>