
Nanotecnología en Ortopedia y Traumatología.

Revisión del tema

Nanotechnology in Orthopaedic and Traumatology.

Update review

Alejandro Alvarez-López^{1 *} <https://orcid.org/0000-0001-8169-2704>

Eric Urbina-Santibañez² <https://orcid.org/0009-0003-2754-3355>

Tuan Nguyen-Pham³ <https://orcid.org/0000-0002-2810-8502>

¹ Universidad de Ciencias Médicas. Hospital Pediátrico Provincial Dr. Eduardo Agramonte Piña. Departamento de Ortopedia y Traumatología. Camagüey, Cuba.

² Escuela de Kinesiología. Facultad de salud. Universidad de Santo Tomas. Chile, Chile.

³ Hospital de Amistad entre Vietnam y Cuba. Dong Hoy, Vietnam.

***Autor para la correspondencia:** aal.cmw@infomed.sld.cu

RESUMEN

Introducción: La nanotecnología es la parte de la ciencia que estudia de forma individual, controlada y manipulada los átomos y moléculas de 1 a 100 nanómetros, esta modalidad es empleada en varias áreas entre ellas la salud.

Objetivo: Actualizar los conocimientos en relación al uso de la nanotecnología en la especialidad de Ortopedia y Traumatología.

Métodos: La búsqueda y análisis de la información se realizó en un periodo de tres meses (primero de marzo de 2025 al 31 de mayo de 2025) y se emplearon las siguientes palabras: *nanotechnology, nanomecine, nanotechnology AND Orthopedics*. A partir de la información obtenida se realizó una revisión bibliográfica de un total de 172 artículos publicados en las bases de datos Pub-Med, Hinari, SciELO y Medline mediante el gestor de búsqueda y administrador de referencias EndNote, de ellos se utilizaron 30 citas seleccionadas para realizar la revisión, de ellas 28 de los

últimos cinco años.

Resultados: Se mencionan los componentes esenciales utilizados en la nanotecnología. Se describen las aplicaciones de esta modalidad en la columna vertebral, Oncología Ortopédica, en los materiales anticancerosos, artroplastia, cartílago articular, adherencias de los tendones, trastornos en la consolidación ósea, infecciones y el transporte de antimicrobianos.

Conclusiones: La nanotecnología ofrece una alternativa prometedora ante algunos de los problemas actuales de la especialidad. Sin embargo, los efectos a largo plazo en humanos son desconocidos, estudios preliminares reportan toxicidad en el cerebro y pulmón, inflamación sistémica y estrés oxidativo. Las investigaciones sobre este tema costarán billones de dólares y la producción en masa será muy difícil debido a la complejidad de estas estructuras.

DeCS: NANOTECNOLOGÍA; ORTOPEDIA; TRAUMATOLOGÍA; COLUMNA VERTEBRAL; CARTÍLAGO ARTICULAR.

ABSTRACT

Introduction: Nanotechnology is a branch of science that studies atoms and molecules from 1 to 100 nanometers in size, individually controlled and manipulated.

Objective: To update knowledge on the use of nanotechnology in the specialty of Orthopedics and Traumatology.

Methods: The search and analysis of information was conducted over three months (March 1st, 2025, to May 31st, 2025) using the keywords "nanotechnology", "nanomedicine", "nanotechnology", and "orthopedics" Based on the obtained information, a bibliographic review of 172 articles published in PubMed, Hinari, SciELO, and Medline databases was conducted using the EndNote search and reference manager. Thirty selected citations were used for the review, 28 of which were published within the last five years.

Results: The essential components used in nanotechnology are mentioned. The applications of this technology are described in spine and orthopedic oncology, as well as in anticancer materials, arthroplasty, articular cartilage, tendon adhesions, bone consolidation disorders, infections, and the transport of antimicrobials.

Conclusions: Nanotechnology offers a promising alternative to some of the specialty's current problems. However, the long-term effects on humans are unknown. Preliminary studies report toxicity in the brain and lungs, as well as systemic inflammation and oxidative stress. Research on this topic will be costly, and mass production will be difficult due to the complexity of these structures.

DeCS: NANOTECHNOLOGY; ORTHOPEDICS; TRAUMATOLOGY; SPINE; CARTILAGE, ARTICULAR.

Recibido:03/06/2025

Aprobado:15/01/2026

Ronda: 1

INTRODUCCIÓN

Las reacciones químicas e interacciones moleculares que tienen lugar en el cuerpo humano involucran materia de 4 a 400 átomos que son medidos en nanómetro (nm) según plantean Sullivan et al.⁽¹⁾ La nanotecnología es la parte de la ciencia que estudia de forma individual, controlada y manipulada los átomos y moléculas de 1 a 100 nm.

Richard Freyman en el año 1959 fue el primero en mencionar el término nanotecnología y sus amplias aplicaciones en la ciencia, donde las leyes clásicas de la física no son aplicables por tener un comportamiento nuevo y diferente.^(2,3,4)

Los campos de aplicación de la nanotecnología son amplios e incluyen entre otros, la producción de alimentos, cosméticos, electrónica, filtración de agua y la medicina, conocida esta última modalidad como nanomedicina.^(5,6)

El uso de la nanotecnología en la medicina es amplio, en especial en la especialidad de Ortopedia y Traumatología donde su aplicación se extiende a dar respuesta a problemas existentes en los siguientes campos de la especialidad como: la medicina deportiva, tumores, traumatismos, articulaciones y columna vertebral.^(7,8)

La aplicación fundamental está relacionada con la condrogénesis, regeneración de tejidos como los tendones, ligamentos y el tejido nervioso, la prevención y tratamiento de las infecciones en especial las artroplastias, consolidación de las fracturas, diagnóstico temprano y tratamiento de los tumores óseos y osteointegración de los implantes quirúrgicos.^(9,10)

Debido a la importancia de este tema en el futuro de la especialidad de Ortopedia y Traumatología y la escasa publicación de artículos sobre este tema en la literatura nacional, los autores de la investigación tienen como objetivo actualizar en las aplicaciones de la nanotecnología.

MÉTODOS

La búsqueda y análisis de la información se realizó en un periodo de tres meses (primero de marzo de 2025 al 31 de mayo de 2025) y se emplearon las siguientes palabras: *nanotechnology*, *nanomedicine*, *nanotechnology AND orthopedics*. A partir de la información obtenida se realizó una revisión bibliográfica narrativa de un total de 172 artículos publicados en las bases de datos PubMed [<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>], Hinari [<https://www.who.int/hinari/es/>], SciELO

[<https://scielo.org/es/>] y Medline [<https://medlineplus.gov/spanish/>] mediante el gestor de búsqueda y administrador de referencias EndNote, de ellos se utilizaron 30 citas seleccionadas para realizar la revisión, de ellas 28 de los últimos cinco años, este elemento no constituyó un criterio de selección.

Se consideraron todos los estudios sobre la nanotecnología en la especialidad de Ortopedia y Traumatología en humanos, de tipo experimental, en idioma inglés y español.

DESARROLLO

Componentes esenciales: para el mejor entendimiento de la nanotecnología se necesita conocer sus componentes esenciales (cuadro 1),⁽¹¹⁾ (figura 1).⁽¹¹⁾

Cuadro 1 Componentes esenciales en la nanotecnología según Jaimes et al. ⁽¹¹⁾

Componentes	Características
Nanopartículas	Son partículas con un diámetro entre 1 a 1000 nm, que puede ser nanoesfera o nanocápsula.
Micelas poliméricas (Figura 1A)	Están formadas por uniones de polímeros, tienen la capacidad de encarcelar moléculas como: lípidos, antimicrobianos, antioxidantes y vitaminas.
Liposomas (Figura 1B)	Son vesículas artificiales, individuales o multilaminares en escala nanométrica formada por la hidratación de fosfolípidos.
Dendrimeros (Figura 1C)	Son estructuras poliméricas, pero a diferencia de las micelas, sus unidades de transporte no se encuentran en el centro, sino que están conformados por sistema de ramificaciones perfectas, que permiten tener una mayor capacidad de carga. Debido a su capacidad de transporte es útil para la oncología, como un medio de transporte para contraste y elementos radioterapéuticos.
Nanotubos	Estructuras tubulares compuestas por átomos de carbono de diámetro nanométrico, pueden ser monocapa (un solo tubo) o multicapa (varios tubos). Los nanotubos pueden ser empleados como: Nanopinzas: La unión de dos nanotubos que se someten a cambios de voltaje genera una modificación estructural que, según su disposición crea movimiento de apertura y cierre, lo que da la opción de modificar partículas a nanoescala con pinzas. Nanoestructuras: debido a las características físicas generadas por los nanotubos, se ha logrado el desarrollo de materiales como mallas, materiales quirúrgicos de alta resistencia y durabilidad, bajo la manipulación y unión de nanotubos.
Quantum dots	Son cristales fluorescentes que pertenecen a la escala nanométrica y producen luz cuando son excitados, debido a estas características son útiles como marcadores biológicos.
Partículas SERS (Surface-Enhanced Raman Scattering)	Las partículas SERS son nanopartículas útiles para la identificación tumoral <i>in vivo</i> , basadas principalmente en oro coloidal.

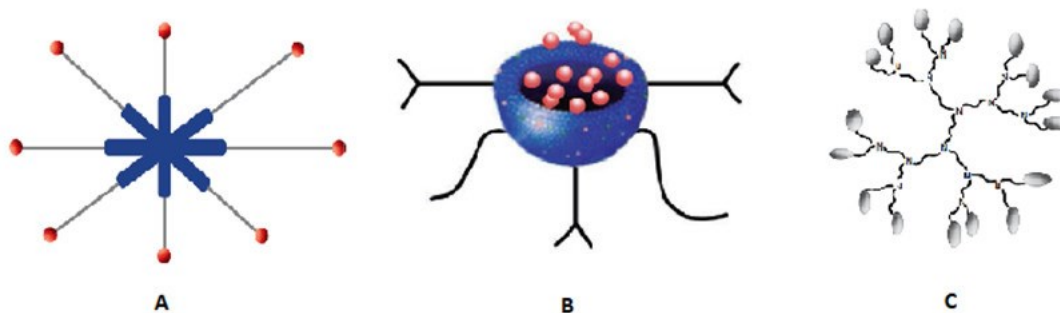


Figura 1. Representación gráfica de algunas nanoestructuras. A- Micelas poliméricas, B- Liposoma con medicamentos, C-Dendrimeros. Tomado y modificado de: Jaimes et al. ⁽¹¹⁾

Aplicaciones de la nanotecnología según regiones y entidades que sufre el enfermo: en esa sección se especifica la aplicación de la nanotecnología.

La nanotecnología es aplicable en la columna vertebral en las áreas de la regeneración tisular y los implantes. Con relación a la primera incluye la regeneración del disco intervertebral, los andamios nanofibrosos donde reposan células regenerativas y factores de crecimiento es empleado en la regeneración de neuronas mediante nanotubos de carbono, que promueven el crecimiento axonal. Los implantes espinales se benefician de la nanotecnología, ya que facilita la fusión espinal y evita las complicaciones derivadas del uso de la proteína morfogenética, modifica la superficie de los implantes espinales mediante la asociación de nanopartículas de óxido de titanio y zirconio, que favorecen la formación de hueso. Además, las nanopartículas de nitrato de silicona en los espaciadores intervertebrales ofrecen múltiples ventajas biomecánicas. Por otra parte, induce a una mayor angiogénesis y osteogénesis, al favorecer la osteointegración implante-hueso. ^(12,13,14)

En relación a la aplicación en la Oncología Ortopédica su indicación es amplia e incluye la aplicación terapéutica, en los materiales anticancerosos y el diagnóstico. La aplicación terapéutica de la nanotecnología es superior a los citostáticos con menor toxicidad, resistencia y efectos secundarios. El citostático es cargado en una nanopartícula, la cual se une a un anticuerpo monoclonal que a su vez se adosa a la célula tumoral, de esta forma se reduce la toxicidad colateral y el daño a las células no tumorales. ^(15,16)

Los materiales anticancerosos en especial los implantes de *nanoselenium* inhiben el crecimiento de células tumorales. Por otra parte, las partículas con aleación de magnesio en los implantes tienen propiedades anti-tumorales, en especial contra las células presentes en el osteosarcoma. ^(16,17)

Las aplicaciones de la nanotecnología en el diagnóstico de la Oncología Pediátrica, consiste en unir nanopartículas complejas que permiten detectar las células tumorales en cualquier parte del organismo mediante exámenes imagenológicos, además ayuda a identificar metástasis de forma precoz. ^(16,18)

El uso de la nanotecnología en la artroplastia, se basa en la nanotextura de la superficie del implante, que favorece el crecimiento de osteoblastos e incrementa la osteointegración. Los nanotubos son muy útiles en el componente acetabular de la artroplastia total de cadera.

Por otra parte, el cemento óseo empleado en la artroplastia cuando se asocia a antimicrobianos tiene un tiempo de acción corto, la nanotecnología permite mediante nanopartículas lípicas y de silicio una liberación más lenta del antimicrobiano. Se pueden aplicar otros compuestos no antimicrobianos en el cemento óseo para el control y prevención de la infección como el citosan y la plata. El cemento óseo convencional provoca respuesta inmune, lo que puede producir fallo del implante por encapsulación e inflamación. ^(19,20,21)

El cartílago articular dañado tiene escasa posibilidad de reparación por sí mismo y evoluciona a la artrosis secundaria. La nanotecnología favorece la condrogénesis mediante el uso de andamios sintéticos que permiten una regeneración natural sin los efectos secundarios de toxicidad de los andamios actuales. Con el uso de la nanotecnología se puede recuperar hasta un 70 % del defecto del cartílago. ^(22,23,24)

La formación de adherencias después de la cirugía de los tendones es un problema común, la nanotecnología favorece la cicatrización intrínseca y extrínseca mediante nanopartículas de hidrosol que a su vez inhiben las adherencias posoperatorias. El empleo de andamios está en estudio e investigación, pero prometen resultados favorables en la formación de colágeno de gran viabilidad y estabilidad. ^(25,26)

Los trastornos de la consolidación ósea son un problema actual, el empleo de andamios de nanofibras favorecen la consolidación y la formación de hueso, esta aplicación se extiende a pacientes que tienen pseudoartrosis mediante injertos sintéticos muy semejantes al hueso (nanosilicatos). Los nanosilicatos han demostrado buena fortaleza, porosidad y mineralización ósea. ^(27,28)

Las infecciones establecidas del sistema osteomioarticular constituyen un verdadero problema en la actualidad, las bacterias situadas debajo de una capa de *biofilm* son 100 veces más resistentes a los antimicrobianos, de ahí que el uso de anti-*biofilms* por nanotecnología con incorporación de vancomicina permiten la liberación de este antimicrobiano por 100 horas más. Las gasas con nanotecnología de plata disminuyen el crecimiento bacteriano y favorecen la cicatrización. La cobertura con tornillos de titanio con nanopartículas de plata impide la formación de los *biofilms*. ^(6,29)

De acuerdo con Cancela,⁽³⁰⁾ la nanotecnología aplicada a la transportación de antimicrobianos promete ser un arma fundamental para el tratamiento de las infecciones óseas. Esta modalidad de forma teórica hasta la actualidad presenta grandes ventajas farmacocinéticas y farmacodinámicas.

CONCLUSIONES

La nanotecnología ofrece una alternativa prometedora ante algunos de los problemas actuales de la especialidad de Ortopedia y Traumatología. Sin embargo, los efectos a largo plazo en humanos son desconocidos, estudios preliminares reportan toxicidad en el cerebro y pulmón, inflamación sistémica y estrés oxidativo. Las investigaciones sobre este tema costarán billones de dólares y la producción en masa será muy difícil debido a la complejidad de estas estructuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sullivan MP, McHale KJ, Parvizi J, Mehta S. Current concepts in Orthopaedic surgery and future directions. Bone Joint J [Internet]. 2014 [citado 29 May 2025];96(5):569-573. Disponible en: <https://doi.org/10.1302/0301-620X.96B5.33606>
2. Abaszadeh F, Ashoub MH, Khajouie G, Amiri M. Nanotechnology development in surgical applications: recent trends and developments. Eur J Med Res [Internet]. 2023 [citado 29 May 2025];28(1):537. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40001-023-01429-4>
3. Chelly JE, Goel SK, Kearns J, Kopac O, Sadhasivam S. Nanotechnology for pain management. J Clin Med [Internet]. 2024 [citado 29 May 2025];13(9):2611. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/jcm13092611>
4. Han J, Dong H, Zhu T, Wei Q, Wang Y, Wang Y; et al. Biochemical hallmarks-targeting antineoplastic nanotherapeutics. Bioact Mater [Internet]. 2024 [citado 29 May 2025]; 36:427-454. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2024.05.042>
5. Li Z, Zhang W, Zhang Z, Gao H, Qin Y. Cancer bone metastases and nanotechnology-based treatment strategies. Expert Opin Drug Deliv [Internet]. 2022 [citado 29 May 2025];19(10):1217-1232. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/17425247.2022.2093856>
6. Topsakal A, Ekren N, Kilic O, Oktar FN, Mahirogullari M, Ozkan O; et al. Synthesis and characterization of antibacterial drug loaded β -tricalcium phosphate powders for bone engineering applications. J Mater Sci Mater Med [Internet]. 2020 [citado 29 May 2025];31(2):16. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10856-019-6356-1>
7. Chen L, Zhou C, Jiang C, Huang X, Liu Z, Zhang H; et al. Translation of nanotechnology-based implants for orthopedic applications: current barriers and future perspective. Front Bioeng Biotechnol [Internet]. 2023 [citado 29 May 2025];11:1206806. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1206806>
8. Jeong GJ, Castels H, Kang I, Aliya B, Jang YC. Nanomaterial for skeletal muscle regeneration. Tissue Eng Regen Med [Internet]. 2022 [citado 29 May 2025];19(2):253-261. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13770-022-00446-4>

9. Güven E. Nanotechnology-based drug delivery systems in Orthopedics. *Jt Dis Relat Surg* [Internet]. 2021 [citado 29 May 2025];32(1):267-273. Disponible en: <https://doi.org/10.5606/ehc.2021.80360>
10. Lawson TB, Mäkelä JTA, Klein T, Snyder BD, Grinstaff MW. Nanotechnology and osteoarthritis; part 1: Clinical landscape and opportunities for advanced diagnostics. *J Orthop Res* [Internet]. 2021 [citado 29 May 2025];39(3):465-472. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jor.24817>
11. Jaimes S, González A, Granados C, Alvarez D, Espitia E. Nanotecnología: avances y expectativas en cirugía. *Rev Colomb Cir* [Internet]. 2012 [citado 29 May 2025];27:158-166. Disponible en: <https://www.revistacirugia.org/index.php/cirugia/article/view/210>
12. Deng Y, Zhou C, Fu L, Huang X, Liu Z, Zhao J ; et al. A mini-review on the emerging role of nano technology in revolutionizing orthopedic surgery: challenges and the road ahead. *Front Bioeng Bio technol* [Internet]. 2023 [citado 29 May 2025];11:1191509. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1191509>
13. Kumar S, Nehra M, Kedia D, Dilbaghi N, Tankeshwar K, Kim KH. Nanotechnology-based bio materials for orthopaedic applications: Recent advances and future prospects. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* [Internet]. 2020 [citado 29 May 2025];106:110154. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110154>
14. Yin P, Liang W, Han B, Yang Y, Sun D, Qu X; et al. Hydrogel and nanomedicine-based multimodal therapeutic strategies for spinal cord injury. *Small Methods* [Internet]. 2024 [citado 29 May 2025];8(1): e2301173. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/smt.202301173>
15. Hao X, Jiang B, Wu J, Xiang D, Xiong Z, Li C; et al. Nanomaterials for bone metastasis. *J Control Release* [Internet]. 2024 [citado 29 May 2025]; 373:640-651. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2024.07.067>
16. Frączek W, Kotela A, Kotela I, Grodzik M. Nanostructures in Orthopedics: advancing diagnostics, targeted therapies, and tissue regeneration. *Materials (Basel)* [Internet]. 2024 [citado 29 May 2025];17(24):6162. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma17246162>
17. Wang SY, Hu HZ, Qing XC, Zhang ZC, Shao ZW. Recent advances of drug delivery nanocarriers in osteosarcoma treatment. *J Cancer* [Internet]. 2020 [citado 29 May 2025];11(1):69-82. Disponible en: <https://doi.org/10.7150/jca.36588>
18. Lin C, Huang X, Xue Y, Jiang S, Chen C, Liu Y; et al. Advances in medical devices using nano materials and nanotechnology: Innovation and regulatory science. *Bioact Mater* 2025 [citado 29 May 2025]; 48:353-369. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.02.017>
19. Jha G, Malasani S, Barakat A, Sola SC, Gera K, Gupta G. Innovative nanotechnological approaches in trauma and orthopaedic surgery: a comprehensive review. *Cureus* [Internet]. 2024 [citado 29 May 2025];16(11):e72838. Disponible en: <https://doi.org/10.7759/cureus.72838>

20. Chen MQ. Recent advances and perspective of nanotechnology-based implants for orthopedic applications. *Front Bioeng Biotechnol* [Internet]. 2022 [citado 29 May 2025];10:878257. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.878257>
21. Liang W, Zhou C, Bai J, Zhang H, Long H, Jiang B; et al. Current developments and future perspectives of nanotechnology in orthopedic implants: an updated review. *Front Bioeng Biotechnol* [Internet]. 2024 [citado 29 May 2025]; 12:1342340. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1342340>
22. Han Y, Cao L, Li G, Zhou F, Bai L, Su J. Harnessing nucleic acids nanotechnology for bone/cartilage regeneration. *Small* [Internet]. 2023 [citado 29 May 2025];19(37):e2301996. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/smll.202301996>
23. Lawson TB, Mäkelä JTA, Klein T, Snyder BD, Grinstaff MW. Nanotechnology and osteoarthritis. Part 2: Opportunities for advanced devices and therapeutics. *J Orthop Res* [Internet]. 2021 Mar [citado 29 May 2025];39(3):473-484. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jor.24842>
24. Xiao L, Cui J, Sun Z, Liu Y, Zheng J, Dong Y. Therapeutic potential of nanotechnology-based approaches in osteoarthritis. *Front Pharmacol* [Internet]. 2022 [citado 29 May 2025]; 13:920824. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.920824>
25. Jahanmard F, Baghban Eslaminejad M, Amani-Tehran M, Zarei F, Rezaei N, Croes M; et al. In corporation of F-MWCNTs into electrospun nanofibers regulates osteogenesis through stiffness and nanotopography. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* [Internet]. 2020 [citado 29 May 2025]; 106:110163. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110163>
26. Ruan WJ, Xu SS, Xu DH, Li ZP. Orthopedic revolution: The emerging role of nanotechnology. *World J Orthop*. 2024 [citado 29 May 2025];15(10):932-938. Disponible en: <https://doi.org/10.5312/wjo.v15.i10.932>
27. Lyons JG, Plantz MA, Hsu WK, Hsu EL, Minardi S. Nanostructured biomaterials for bone regeneration. *Front Bioeng Biotechnol* [Internet]. 2020 [citado 29 May 2025]; 8:922. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00922>
28. Yang J, Shang J, Yang L, Wei D, Wang X, Deng Q; et al. Nanotechnology-based drug delivery systems for honokiol: enhancing therapeutic potential and overcoming limitations. *Int J Nanomedicine* [Internet]. 2023 [citado 29 May 2025]; 18:6639-6665. Disponible en: <https://doi.org/10.2147/IJN.S431409>
29. Zare EN, Jamaledin R, Naserzadeh P, Afjeh-Dana E, Ashtari B, Hosseinzadeh M; et al. Metal-based nanostructures/PLGA nanocomposites: antimicrobial activity, cytotoxicity, and their biomedical applications. *ACS Appl Mater Interfaces* [Internet]. 2020[citado 29 May 2025];12(3):3279-3300. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b19435>
30. Cancela Vila N. Nanotecnología aplicada a la transportación de antibióticos en Ortopedia y

Acta Ortop Mex [Internet]. 2020 [citado 29 May 2025];34(3):249-253. Disponible en:
<https://dx.doi.org/10.35366/97560>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflicto de intereses.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Alejandro Álvarez-López (Conceptualización. Curación de datos. Análisis formal. Investigación. Metodología. Administración del proyecto. *Software*. Supervisión. Validación. Redacción– borrador original. Redacción–revisión y edición).

Eric Urbina-Santibañez (Conceptualización. Curación de datos. Análisis formal. Investigación. Administración del proyecto. *Software*. Visualización. Redacción-borrador original. Redacción-revisión y edición).

Tuan Nguyen-Pham (Conceptualización. Curación de datos. Metodología. Supervisión. Validación. Visualización).