

BENEFICIOS Y RETOS DE LA INTEGRACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LA MEDICINA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

BENEFITS AND CHALLENGES OF INTEGRATING NANOTECHNOLOGY IN MEDICINE: A SYSTEMATIC REVIEW

Ysac S. Flores^{1*}, Q'oriantka S. Abarca¹, Yahaira P. Aquije¹, Katheryn M. Flores¹, Jonathan Aroni², Edgar H. Capquequi³, César A. Peñaranda³

¹ Universidad Autónoma de Ica, medicina humana, Ica, Perú.

² Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Ica- Perú.

³ Universidad Privada San Juan Bautista, Ica, Perú.

(Recibido: agto./2024. Aceptado: ene./2025)

Resumen

La medicina nanotecnológica ha propiciado progresos importantes, proporcionando soluciones revolucionarias para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, aunque aún existen retos, como asegurar su seguridad y escalabilidad. Esta revisión metódica examina las últimas aplicaciones de la nanotecnología en la medicina personalizada, centrándose en su habilidad para elaborar tratamientos de acuerdo con las particularidades de cada individuo. Las nanopartículas se distinguen por incrementar la exactitud en la administración de medicamentos, disminuyendo los efectos adversos, particularmente en terapias para el cáncer. Adicionalmente, tecnologías tales como biosensores y dispositivos de imagen a nanoescala mejoran los diagnósticos, aumentando las oportunidades de éxito en el ámbito clínico. En el ámbito de la regeneración e ingeniería de tejidos, los nanomateriales, al replicar la matriz extracelular, promueven la regeneración celular y la creación de órganos sintéticos. No obstante, todavía persisten preocupaciones respecto a la biocompatibilidad

de estos materiales, dado que aún no se ha entendido completamente su interacción con los sistemas biológicos ni los posibles impactos en el futuro. La producción y supervisión de la calidad de los nanomateriales son costosas y técnicamente complicadas, lo que obstaculiza su accesibilidad y escalabilidad. Además, la ausencia de normativas definidas demora la puesta en marcha de estas innovaciones. Esta revisión no solo aspira a reunir éxitos fundamentales, sino también a impulsar la propagación del saber en América Latina, donde el acceso a datos científicos especializados es restringido, impactando a alumnos e investigadores. Con más estudios sobre interacciones biológicas y normalización de procesos, la nanotecnología podría establecerse como un instrumento de cambio en la medicina, mejorando los tratamientos y potenciando la salud pública en la región.

Palabras clave: nanotecnología, nanopartículas, nanomedicina, nano-terapia, bio-medicina.

Abstract

Nanotechnology-based medicine has driven significant progress, providing revolutionary solutions for the diagnosis and treatment of diseases, although challenges remain, such as ensuring safety and scalability. This systematic review examines the latest applications of nanotechnology in personalized medicine, focusing on its ability to develop treatments tailored to the specific characteristics of each individual. Nanoparticles stand out for enhancing the accuracy of drug delivery, reducing side effects, particularly in cancer therapies. Additionally, technologies such as biosensors and nanoscale imaging devices improve diagnostics, increasing success rates in clinical settings. In the field of tissue regeneration and engineering, nanomaterials, by replicating the extracellular matrix, promote cell regeneration and the creation of synthetic organs. Nevertheless, concerns persist regarding the biocompatibility of these materials, as their interaction with biological systems has yet to be fully understood, raising questions about potential future impacts. The

production and quality control of nanomaterials are costly and technically complex, hindering their accessibility and scalability. Furthermore, the lack of defined regulations delays the implementation of these innovations. This review not only aims to consolidate key achievements but also to promote the dissemination of knowledge in Latin America, where access to specialized scientific data is limited, affecting students and researchers. With more studies on biological interactions and process standardization, nanotechnology could become a transformative tool in medicine, improving treatments and enhancing public health in the region.

Keywords: nanotechnology, nanoparticles, nanomedicine, nano-therapy, biomedicine.

Introducción

Durante la última década, la nanotecnología se ha convertido en uno de los logros científicos más revolucionarios y ha tenido un enorme impacto en los campos de la medicina y la biotecnología. Este artículo de revisión se centra en analizar los beneficios y desafíos de la integración de la nanotecnología en la medicina, abarcando sus aplicaciones recientes, como la administración dirigida de fármacos, la regeneración de tejidos, y la mejora de diagnósticos.

El procesamiento de materiales a escala nanométrica ha abierto nuevas posibilidades para diagnosticar y tratar enfermedades para las que hasta hace poco no existían soluciones eficaces. Este enfoque innovador permite el desarrollo de terapias más precisas y personalizadas, reduciendo los efectos secundarios y aumentando la eficacia de los procedimientos médicos.

Avances en la liberación controlada de fármacos y regeneración celular con nanopartículas

El uso de nanopartículas ha logrado avances significativos en áreas como la liberación controlada de fármacos, la detección temprana de patologías y la regeneración celular. El potencial de la nanotecnología sigue creciendo, y con él la promesa de cambiar

radicalmente la forma en que entendemos y solucionamos nuestros problemas médicos más complejos, de cara a un futuro en el que los tratamientos sean más eficaces y se adapten a las necesidades de cada paciente. Por ejemplo, F. J. Tang Yan [1] estudió los ejercicios de rehabilitación en pacientes con reimplantación de extremidades y el uso de trasplantes de nanohueso, lo cual demostró una mejora significativa en la recuperación funcional.

Nanocápsulas de curcumina y su eficacia en modelos animales de artritis

Los hallazgos indican una destrucción selectiva de células malignas. También, en modelos animales de artritis, J. Sun *et al.* [2] crearon nanocápsulas de goma tragacanto y gelatina con nanocrystalles de curcumina que demostraron una notable disminución del dolor y la inflamación. S. Fraissinet *et al.* [3] examinaron cómo los microplásticos y los nanoplásticos se distribuyen en los tejidos de los mejillones; destacaron la importancia de administrar adecuadamente los nanomateriales. La integración ósea y la estabilidad en pacientes con pérdida ósea periimplantaria han sido mejoradas por los implantes de titanio modificados con nanotubos de titanio anodizado en odontología. Utilizando péptidos penetrantes de células mejoradas para la entrega de microRNA, investigaron la modulación de la inflamación y la regeneración en el disco intervertebral; demostraron su capacidad para interactuar con múltiples ácidos nucleicos y tener efectos particulares.

Al crear un sistema de nanomedicina biomimético que tiene efectos antiinflamatorios y antiosteoporóticos, J. Li *et al.* [4] mejoraron la eficacia terapéutica del síndrome nefrótico resistente a esteroides. Nuevas opciones terapéuticas para los pacientes con esta condición fueron sugeridas por los resultados de su estudio, que mostraron una disminución significativa de la inflamación renal y una mejora en la función renal. En el campo de la oncología, diversos autores han avanzado significativamente en el desarrollo de aquellos tratamientos basados en las nanopartículas y nano-plataformas, demostrando su potencial para mejorar la eficacia terapéutica y la reducción de efectos secundarios [5].

Nanoplataformas multimodales para el tratamiento del cáncer cervical

Se investigaron nanopartículas de poli (2-alquil cianoacrilato) cargadas con cabazitaxel, evaluando su eficacia y seguridad en los modelos preclínicos de cáncer [6]. Y. Wang *et al.* también diseñaron nano plataformas para la imagenología multimodal y en el tratamiento dirigido del cáncer cervical, mostrando su efectividad en terapias fotodinámicas, fototérmicas y quimio-dinámicas [7].

Nanosistemas “core-shell” para el tratamiento del carcinoma hepatocelular

Además, desarrollaron un nanosistema “core-shell” con ácido ursólico y polifenoles, siendo así la modificación de aptámero EpCAM, demostrando buenas actividades anticancerígenas y la baja toxicidad en carcinoma hepatocelular [8]. Por otro lado, para evaluar su eficacia en inmunoterapia y quimioterapia sinérgicas, utilizaron un sistema de entrega basado en nanopartículas para combinar un nanoherba y CRISPR [9]. Por último, han creado nanopartículas dirigidas al tumor que combinan ácido 5-aminolevulínico y 131I-fulvestrant, demostrando una alta eficacia en el tratamiento dirigido del cáncer de mama positivo para el receptor de estrógeno.

Nanopartículas orales para el tratamiento de enfermedades inflamatorias intestinales

Para tratar la enfermedad inflamatoria intestinal, C. Zhang *et al.* analizaron la eficacia y la seguridad de una nanopartícula de polifenol oral[10]. Además, tenemos a S. Lee *et al.*[11], quien usó ratones para aplicar xenoinjertos con tumores pulmonares, con el fin de evaluar modelos de cáncer de pulmón con células A549. Por otro lado, S. Çitoğlu *et al.*[12], nos elaboró nanopartículas cúbicas de óxido de hierro recubiertas de DMSA como posibles agentes terapéuticos. Con el fin de mejorar el tratamiento de convulsiones epilépticas, M. Marquez-Chin *et al.*[13], también investigaron nanopartículas de hidróxidos dobles en capas cargadas con fenitoína para su administración intranasal[14].

Avances en nanotecnología para reimplantación de extremidades y empleo de nanopartículas de kaempferol para la pancreatitis aguda severa

El uso de tecnologías tiene un gran potencial para mejorar la recuperación y el tratamiento de varias enfermedades médicas, según los avances recientes en el campo de los trasplantes [15]. En una investigación, se examinó a pacientes sometidos a reimplantación de extremidades, incluyendo a aquellos que recibieron trasplantes de nano-hueso compuestos y participaron en un programa de rehabilitación con ejercicios de masajes (Wang *et al.*, 2024). Los resultados mostraron una mejora significativa en la funcionalidad de las extremidades reimplantadas, destacando la eficacia de estas intervenciones combinadas. Asimismo, se exploró el uso de nanopartículas de kaempferol dirigidas a las mitocondrias en estudios preclínicos con animales que padecen pancreatitis aguda severa [16], demostrando su efectividad en la reducción de la inflamación y el daño pancreático, sugiriendo una nueva vía terapéutica prometedora [17].

Modulación de nanopartículas y señuelos de macrófagos en tejidos vivos

Otro método de aplicación es el empleado por A. S. Piotrowski-Daspit *et al.*, [18] que mejora la orientación a células y tejidos vivos mediante la modulación de nanopartículas de polímeros y señuelos de macrófagos. Cabe añadir el enfoque SERS sin etiquetas basado en proteínas de baja abundancia para la detección de alta precisión del cáncer de hígado en diferentes etapas dado por [19].

Uso de exosomas derivados de células madre en regeneración, cicatrización y tratamiento de la epilepsia en el lóbulo temporal

El uso de exosomas derivados de células madre [20] vía ERK/MAPK ha mostrado resultados prometedores en diversos campos médicos, especialmente en el tratamiento de enfermedades neurológicas y la cicatrización de heridas. Estos exosomas pueden

transferir proteínas, lípidos y ARN entre las células. Este proceso favorece notablemente la regeneración y reparación de los tejidos [21], mejorando así la recuperación en pacientes con heridas de difícil cicatrización [22], como las relacionadas con la diabetes [23–25]. El uso de exosomas de pacientes con epilepsia del lóbulo temporal también fue objeto de otro estudio. Los investigadores identificaron marcadores vinculados al efecto terapéutico de la decocción Chaihu (Bupleurum planta-analgésica), Longgu (Huesos de dragón) y Muli (Concha de perla), una combinación de hierbas utilizada en la medicina tradicional china, a través de un perfil proteómico. Al encontrar proteínas específicas en los exosomas que mediaban los beneficios de este tratamiento herbal, se logró una comprensión más profunda de los mecanismos de acción, lo que permite el desarrollo de terapias personalizadas y efectivas para la epilepsia del lóbulo temporal [26].

Nanotecnología para el tratamiento del cáncer y la hiperoxaluria

El tratamiento de diversas afecciones, como el cáncer y la hiperoxaluria, ha experimentado avances significativos en el campo de la nanomedicina [27]. Un grupo de investigadores ha buscado prevenir la hiperoxaluria, que es causada por una excreción urinaria excesiva de oxalato, lo cual puede causar cálculos y daño renales crónico [28]. Para prevenir esta afección, han creado el nanomaterial Se SiO₂ [29]. A través de métodos nanotecnológicos sofisticados, estos nanocomuestos se distinguen por sus características antioxidantes [30]. Los ratones fueron divididos en varios grupos experimentales en estudios preclínicos: un grupo de control, otro grupo que recibió ácido glicólico monohidrato (GAM) para simular la hiperoxaluria y un tercero, que recibió solo nanocomuesto de Se SiO₂ [31]. Para evaluar la concentración de oxalato en los riñones de los ratones mediante espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente, los hallazgos demostraron que los nanocomuestos disminuyen la formación de cálculos renales y el daño oxidativo en las células renales [32]. Para mejorar tanto el tratamiento como el diagnóstico del cáncer, se ha creado una nano-plataforma sensible al pH [33]. Esta nano-plataforma

responde a los cambios de pH en el microambiente tumoral y permite una liberación precisa y controlada de agentes terapéuticos directamente en el sitio del tumor [34]. Esta tecnología ha mejorado significativamente la fototerapia del cáncer y el diagnóstico de metástasis pulmonares en estudios preclínicos [35]. La combinación de habilidades diagnósticas y terapéuticas en la dualidad de la plataforma posibilita tratamientos más precisos, lo que reduce los efectos secundarios y aumenta la eficacia de las terapias [9]. Para lograr una sinergia entre quimioterapia e immunoterapia en modelos tumorales, se ha creado un sistema de administración basado en nanopartículas que combina nanomedicina y CRISPR [36]. El tratamiento responde específicamente al microambiente del tumor gracias a este enfoque multifuncional. El propósito de las nanopartículas es estimular la respuesta inmunitaria contra las células cancerosas al liberar agentes inmunomoduladores y quimioterápicos directamente en el tumor [37]. Los estudios preclínicos en modelos animales han demostrado que este sistema de administración aumenta significativamente la eficacia de la quimioterapia y fomenta una respuesta inmunitaria fuerte. Esto abre una nueva perspectiva para el tratamiento del cáncer con mayor precisión y menor toxicidad.

Nanopartículas y vesículas extracelulares en el tratamiento de enfermedades crónicas

Se desarrollaron diversas tecnologías basadas en nanopartículas y vesículas extracelulares con aplicaciones en el tratamiento de enfermedades, como la epilepsia, la enfermedad inflamatoria intestinal, el cáncer y condiciones vasculares isquémicas [38]. Las nanopartículas de hidróxidos dobles en capas que contienen fenitoína mostraron un mejor control de las convulsiones en modelos preclínicos [14]. Similarmente, las nanopartículas funcionalizadas con dexametasona mejoraron la inflamación intestinal, mientras que las de quitosano aumentaron la biodisponibilidad de compuestos neuro-protectores en enfermedades como Alzheimer [39]. En cáncer, se investigaron nanopartículas magnéticas para la administración dirigida de fármacos [40], aumentando la eficacia del tratamiento y reduciendo los efectos secundarios [41]. Además,

se utilizó un nanosistema “*core-shell*” para la inmunoterapia del carcinoma hepatocelular [42], demostrando una respuesta inmune robusta[43]. Por otro lado, se investigaron la administración de fármacos de la nariz al cerebro y las propiedades fisicoquímicas de los nanosistemas mediante análisis y estudios de correlación de datos presentes en la literatura científica [44, 45]. Por último, las vesículas extracelulares derivadas de células madre favorecieron la angiogénesis en enfermedades isquémicas. Estos enfoques subrayan el potencial innovador de las nanopartículas y vesículas en mejorar tratamientos médicos, ofreciendo opciones más eficientes y menos invasivas.

Nanopartículas de quitosano y sulfato para tratamientos oculares y hepatitis B

Otros autores, como S. R. Pardeshi *et al.*, [46] aplicaron la nanotecnología, en el desarrollo de nanopartículas de quitosano y sulfato para la administración ocular de dorzolamida contra el glaucoma, mientras que H. Okada *et al.*, [47] usaron ratones infectados de hepatitis B para la evaluación de nanopartículas lipídicas. Se diseñaron nanopartículas específicas para tumores que combinan fulvestrant y el radionúclido 131I [48], proporcionando un enfoque terapéutico tri-modal para el cáncer de mama que incluye terapia endocrina, radioterapia y fototerapia [49], mejorando significativamente la eficacia del tratamiento [50]. Por otra parte, también están el desarrollo de nano-vacunas que coadministran adyuvantes y antígenos para inducir respuestas inmunológicas robustas contra el virus de Epstein-Barr, potenciando tanto la inmunidad humoral como la celular [51]. Ambos estudios subrayan el potencial de las tecnologías basadas en nanopartículas y nano-vacunas para ofrecer tratamientos más efectivos y específicos contra el cáncer y las infecciones virales[52].

Realizamos esta revisión sistemática para analizar la investigación existente sobre nanotecnología, centrándonos en sus aplicaciones recientes y su impacto en campos como la medicina y la biotecnología. Durante nuestro análisis, notamos una falta de publicaciones en español que expliquen este tema de manera clara y detallada, lo cual es especialmente relevante en el contexto

latinoamericano, donde la accesibilidad a la información científica especializada es inherentemente limitada. La falta de recursos ha impedido que muchos profesionales, estudiantes e investigadores accedan y se beneficien de los avances de la nanotecnología. En esta revisión, nuestro objetivo no es sólo recopilar los logros más importantes sino también proponer una herramienta que apoye el acceso a este conocimiento, ayudando a promover una mejor comprensión y aplicación de la nanotecnología en América Latina.

MATERIAL Y METODOS

En los meses de junio a julio de 2024, se llevó a cabo una revisión bibliográfica en inglés y portugués, utilizando las bases de datos Scopus y PubMed. Solo se tomaron en cuenta los primeros artículos científicos publicados entre 2019 y 2024. La búsqueda se realizó con las siguientes palabras clave en inglés: “Nanotechnology”, “Medicine”, “Nanomedicine” y “Nanoparticles”. Hasta mayo de 2024, se encontraron 11 367 artículos en la búsqueda inicial. Sin embargo, después de emplear filtros específicos en función de la fecha y el tipo de publicación, la cantidad de artículos se redujo a 557. Después de revisar los resúmenes y evaluar su relevancia según las variables del estudio, se seleccionaron 100 artículos que cumplían con los objetivos de la investigación, con un enfoque en el uso efectivo de la nanotecnología para mejorar el rendimiento humano.

En el campo de las ciencias de la salud, existen definiciones precisas de las palabras “nanotecnología”, “nanomedicina”, “nanopartículas” y su equivalente “nanotecnología en medicina”. Además, se decidió incluir las bases de datos Scopus, Mendeley y SCImagoJr en la búsqueda bibliográfica.

RESULTADOS

En este apartado se presenta un análisis completo de los estudios que investigan la nanotecnología como una herramienta efectiva para mejorar la nanomedicina en el personal sanitario. La Figura 1 ilustra el proceso de selección y filtrado de los artículos analizados. La Tabla 1 resume los resultados de la búsqueda por autor,

año de publicación, área temática, tamaño de la muestra y entorno geográfico del estudio. La Tabla 2 presenta las principales conclusiones de los artículos seleccionados.



FIGURA 1. Representación del proceso de búsqueda y selección de artículos para la revisión sistemática.

Recopilación las muestras de los veinte artículos más relevantes

Estudios de la aplicación de la nanotecnología en la medicina en el desarrollo de fármacos, tratamiento de cánceres, uso de nanopartículas, tratamiento de enfermedades neuro-degenerativas y operaciones. Ver tabla 1.

Recopilación de los veinte resultados más relevantes

Estudios de la aplicación de la nanotecnología en la medicina en el desarrollo de fármacos, tratamiento de cánceres, uso de nanopartículas, tratamiento de enfermedades neuro-degenerativas y operaciones. Ver tabla 2.

Discusión

1. Aplicaciones oncológicas de la nanotecnología

Esta revisión demuestra que las nanopartículas son altamente efectivas en el tratamiento del cáncer, proporcionando una administración precisa de fármacos y minimizando los efectos secundarios. Al comparar nuestros hallazgos con el estudio

Autor(es)	Área temática	Muestra/ Contexto g
Ahmad <i>et al.</i> (2019)	Topical Nano-emulgel for Skin Disorders: Formulation Approach and Characterization.	El estudio determinó la solubilidad del timol en diferentes aceites mediante un método que involucraba la adición de exceso de timol, agitación y equilibrio. Se seleccionaron los aceites con mayor solubilidad para el timol. La concentración de timol en el aceite se cuantificó utilizando un espectrofotómetro UV a una longitud de onda máxima de 278 nm.
Barcellona <i>et al.</i> (2024)	Modulation of Inflammation and Regeneration in the Intervertebral Disc Using Enhanced Cell-Penetrating Peptides for MicroRNA Delivery.	Este estudio se centró en dos péptidos penetrantes de células (CPPs) altamente eficientes en la entrega de carga a tejidos musculoesqueléticos: RALA y FLR. Estos CPPs sintéticos son compatibles con diversos ácidos nucleicos y FLR, en particular, presenta un dominio de unión a heparina que facilita su dirección hacia áreas ricas en GAG.
Barolo <i>et al.</i> (2024)	Ferritin nanocage-enabled detection of pathological tau in living human retinal cells.	Se estudió la relación entre la concentración y la fluorescencia de la sonda en dos medios diferentes: DMSO y Hepes 20 mM, pH 7.4. Se utilizó un fluorímetro para medir la fluorescencia de la sonda en un rango de concentraciones, utilizando una longitud de onda de excitación de 520 nm y un rango de emisión de 530 a 700 nm.
Reyhane <i>et al.</i> (2024)	Nanotechnology-based diagnostics and therapeutics in acute lymphoblastic leukemia: a systematic review of preclinical studies.	Este estudio examinó los beneficios y desventajas recientes de las nanomedicinas, los avances en la administración de fármacos y los enfoques de diagnóstico modernos.
Bezerra-Souza <i>et al.</i> (2019)	Repurposing butenafine as an oral nanomedicine for visceral leishmaniasis.	Se realizaron estudios con los B-SNEDDS líquidos que fueron optimizados utilizando el diseño de experimentos, y luego se secaron por aspersión sobre soportes porosos de sílice coloidal para producir sólido-B-SNEDDS con propiedades de flujo mejoradas y estabilidad del fármaco. Líquido óptimo B-SNEDDS consistía en Butenafina: Capryol90: Peceol:Labras.

TABLA 1. Recopilación de las muestras de los cien artículos

de E. Wen *et al.* [17], observamos que el desarrollo de nanohidroxiapatita esférica cargada con radionúclidos ^{223}Ra y $^{99\text{m}}\text{Tc}$ para el tratamiento de tumores óseos ha mostrado resultados prometedores, aunque su aplicación está restringida a un tipo específico de cáncer. Nuestro análisis adopta una perspectiva más amplia, abarcando tipos como el cáncer de mama y cervical, y destaca la versatilidad de las nanopartículas en diversas aplicaciones oncológicas, en contraste con el enfoque más limitado propuesto por Y. Wang *et al.* [54].

Por otro lado, el estudio de Yuanyuan *et al.* investiga la integración de la nanomedicina con la tecnología CRISPR en el contexto de terapias inmunológicas y quimioterapéuticas sinérgicas,

Autor(es)/ año de publicación	Resultados significativos
Ahmad <i>et al.</i> (2019)	Se encontró que la nanoemulsión cargada con timol optimizada era $13,60 \pm 0,117$ nm con PDI $0,197 \pm 0,008$. Las nanoemulsiones proporcionarán una enorme superficie para una mejor penetración del agente terapéutico en la región pilosebácea, lo que resulta en una mejor eficacia.
Almutleb <i>et al.</i> (2024)	En el cocultivo nocturno con células epiteliales primarias y epitelio corneal bovino, se observó agregación de patógenos y fragmentación del ADN. Las bacterias resistentes (<i>K. pneumoniae</i> y <i>S. aureus</i>) causaron agregación y muerte celulares, evidenciada por desintegración nuclear y necrosis, mientras que las bacterias no resistentes mostraron una menor lisis de la membrana plasmática y necrosis celular.
Barcellona <i>et al.</i> (2024)	En el estudio RALA y FLR exhibieron grados similares de internalización eficiencia respecto al control lipofectamina, alcanzando valores de casi el 90% inmediatamente después de la transfección.
Bezerra-Souza <i>et al.</i> (2019)	Se probó la solubilidad de butenafina en cuatro excipientes diferentes (Peceol, Capryol 90, Labrasol y Labrafil M1944CS), comúnmente utilizados en el desarrollo de formulaciones a base de lípidos y que han mostrado eficacia contra la leishmaniasis.
Reyhane <i>et al.</i> (2024)	Este estudio examinó los beneficios y desventajas recientes de las nanomedicinas, los avances en la administración de fármacos y los enfoques de diagnóstico modernos [53].

TABLA 2. Recopilación de las resultados más relevantes de los cien artículos

destacando la capacidad de las nanopartículas para influir y regular el microambiente tumoral. Nuestros resultados concuerdan con los de este equipo en cuanto a las ventajas de emplear nanopartículas en tratamientos multimodales contra el cáncer. Sin embargo, Yuanyuan *et al.* subrayan ciertos desafíos inherentes, especialmente en relación con la toxicidad a largo plazo y los riesgos de seguridad asociados al uso de CRISPR, aspectos que también consideramos de vital importancia para su eventual aplicación clínica generalizada [9].

2. Uso de nanotecnología en enfermedades inflamatorias

La actividad antiinflamatoria de las nanopartículas ha sido investigada extensamente en varios estudios revisados. En

particular, [2] utilizaron nanocápsulas de curcumina en modelos animales de artritis, demostrando una disminución notable tanto del dolor como de la inflamación. Estos hallazgos son congruentes con los resultados obtenidos en nuestra revisión, donde se evidencia la eficacia de las nanopartículas como agentes antiinflamatorios y promotores de la regeneración tisular. No obstante, nuestra revisión trasciende los estudios preclínicos, incorporando también un análisis exhaustivo de ensayos clínicos, lo que proporciona una perspectiva más amplia sobre su viabilidad y seguridad en aplicaciones humanas.

De igual manera, el estudio de C. Zhang *et al.* [10], que examina el uso de nanopartículas basadas en polifenoles para el tratamiento de enfermedades inflamatorias intestinales, confirma el potencial de estas partículas en la mitigación de la inflamación. Aunque los resultados obtenidos por Zhang *et al.* son alentadores, nuestra revisión incorpora un análisis más crítico en torno a la escalabilidad y accesibilidad de estas tecnologías, factores fundamentales para su implementación a gran escala, los cuales no fueron abordados de manera exhaustiva en el trabajo original.

3. Regeneración y reparación de tejidos

En lo que respecta a la regeneración y la ingeniería de tejidos, nuestro análisis se enfoca en una variedad de aplicaciones biomédicas. Un ejemplo destacado es el trabajo de Barcellona *et al.*, que emplea péptidos penetrantes de células (CPPs) para la administración de microARN, demostrando una mejora prometedora en la regeneración del disco intervertebral. Nuestra revisión reafirma la efectividad de los nanomateriales en la regeneración de tejidos, abarcando no solo la matriz extracelular, sino también la promoción de la regeneración celular [38].

Asimismo, la capacidad de los nanomateriales para imitar estructuras biológicas y promover la reparación tisular ha sido confirmada en estudios como el de Zhao *et al.* (2024), donde se investigaron las vesículas extracelulares derivadas de células madre en el contexto de la regeneración tisular y la cicatrización de heridas. Si bien nuestros hallazgos respaldan el prometedor uso de

la nanotecnología en estas aplicaciones, también subrayamos la necesidad de una mayor estandarización en los métodos utilizados, así como de estudios más exhaustivos sobre su seguridad a largo plazo.

4. Desafíos regulatorios y escalabilidad

Un aspecto clave discutido en esta revisión es la urgente necesidad de un marco regulatorio definido y estandarizado. A diferencia de muchos estudios que se enfocan predominantemente en la eficacia de los nanomateriales, nuestra revisión destaca los retos regulatorios y de escalabilidad como barreras críticas para su integración en la práctica clínica. Aunque estudios como los de Wang *et al.* [55] y Sun *et al.* demuestran la eficacia de diversas nanopartículas, la ausencia de normativas claras y la complejidad en la producción con estándares de calidad representan obstáculos significativos que deben ser superados para que estos tratamientos lleguen a los pacientes.

Conclusión

En conjunto, estos estudios demuestran el potencial de la nanotecnología para mejorar la entrega y eficacia de los agentes terapéuticos en diversas áreas de la medicina, destacando la necesidad de continuar con investigaciones en este campo para optimizar y ampliar su uso clínico. La revisión sistemática demuestra que la nanotecnología tiene un enorme potencial transformador en el campo de la medicina, destacándose en aplicaciones como la administración dirigida de fármacos, la regeneración de tejidos y el diagnóstico precoz. Las nanopartículas permiten una mayor precisión en los tratamientos, mejorando la eficacia terapéutica y reduciendo los efectos secundarios, lo que es especialmente relevante en el tratamiento del cáncer y las enfermedades inflamatorias.

A pesar de los avances, los desafíos relacionados con la biocompatibilidad, la toxicidad y la falta de regulaciones claras siguen siendo obstáculos significativos. Es crucial que se realicen estudios más exhaustivos sobre las interacciones biológicas a nivel

nanométrico, así como la estandarización de los procesos de producción y control de calidad de los nanomateriales.

Referencias

- [1] Y. Tang and J. Fu, *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2022**, 1 (2022).
- [2] J. Sun, J. Du, and et al., *J. Nanobiotechnol.* **22**, 270 (2024).
- [3] S. Fraissinet and et al., *Commun. Earth Environ.* **5**, 128 (2024).
- [4] J. Li and et al., *J. Nanobiotechnol.* **19**, 417 (2021).
- [5] R. Valsalakumari and et al., *Int. J. Nanomedicine* **19**, 3009 (2024).
- [6] Y. Wang and et al., *Int. J. Nanomedicine* **19**, 5837 (2024).
- [7] B. Zhang and et al., *Acta Pharm. Sinica B* **11**, 246 (2021).
- [8] L. Giloteaux and et al., *J. Extracell. Vesicles* **13**, 12403 (2024).
- [9] Y. Jia and et al., *J. Nanobiotechnol.* **22**, 346 (2024).
- [10] C. Zhang and et al., *Acta Biomaterialia* **169**, 422 (2023).
- [11] S. Lee and et al., *Int. J. Nanomedicine* **19**, 4893 (2024).
- [12] S. Çitoğlu and et al., *Nanomedicine* **16**, 925 (2021).
- [13] M. Marquez-Chin and et al., *Biomed. Eng. Online* **23**, 10 (2024).
- [14] J. Zhang and et al., *J. Nanobiotechnol.* **22**, 144 (2024).
- [15] D. Guha and et al., *Viruses* **16**, 72 (2024).
- [16] T. Nazia and et al., *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **108**, 203 (2024).
- [17] E. Wen and et al., *J. Nanobiotechnol.* **22**, 148 (2024).
- [18] A. S. Piotrowski-Daspit and et al., *Nat. Commun.* **15**, 4247 (2024).
- [19] T. Sun and et al., *Anal. Chim. Acta* **1304**, 342518 (2024).
- [20] Z. Huang and et al., *Nanomedicine* **19**, 1525 (2024).
- [21] F. Han and et al., *J. Nanobiotechnol.* **21**, 113 (2023).
- [22] M. Boushra and et al., *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* **49**, 632 (2019).
- [23] C. Yang and et al., *Heliyon* **10**, e22802 (2024).
- [24] P. Siwaponanan and et al., *Clin. Cardiol.* **46**, 1326 (2023).

- [25] N. J. Hunt and et al., *Adv. Drug. Deliv. Rev.* **190**, 114537 (2022).
- [26] P. Yang, Y. Huang, and et al., *J. Ethnopharmacol.* **318**, 116928 (2024).
- [27] G. Hosseini Torshizi and et al., *Cancer Nanotechnol.* **15**, 7 (2024).
- [28] V. Mohylyuk and et al., *AAPS PharmSciTech* **21**, 3 (2020).
- [29] C. Ye and et al., *Transl. Androl. Urol.* **13**, 526 (2024).
- [30] H. Weng and et al., *Nat. Commun.* **15**, 6058 (2024).
- [31] G. Chen, *JCPSP* **35**, 728 (2022).
- [32] X. Huang and et al., *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* **98**, 105823 (2024).
- [33] A. Merolla and et al., *Nat. Commun.* **15**, 5609 (2024).
- [34] C. L. Nawijn and et al., *Ultrasound Med. Biol.* **50**, 1099 (2024).
- [35] Z. Li and et al., *Drug Delivery* **28**, 700 (2021).
- [36] M. Yuan and et al., *J. Nanobiotechnol.* **22**, 180 (2024).
- [37] J. J. Chang and et al., *Int. J. Nanomedicine* **19**, 2395 (2024).
- [38] M. N. Barcellona and et al., *Adv. Nanobiomed. Res.* **4**, 2300112 (2024).
- [39] C. Lu and et al., *Nat. Commun.* **15**, 5000 (2024).
- [40] J. M. M. Mohamed and et al., *Cancer Nanotechnol.* **15** (2024).
- [41] A. Bezerra-Souza and et al., *Pharmaceutics* **11**, 353 (2019).
- [42] K. M. Hosny and et al., *Drug Delivery* **28**, 115 (2021).
- [43] Y. Venzhik and et al., *Plants* **13**, 1261 (2024).
- [44] A. Bonaccorso and et al., *Int. J. Nanomedicine* **19**, 5619 (2024).
- [45] Q. Li and et al., *J. Colloid Interface Sci.* **655**, 634 (2024).
- [46] S. R. Pardeshi and et al., *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* **86**, 104719 (2023).
- [47] H. O. et al., *Mol. Ther. Methods Clin. Dev.* **32**, 101289 (2024).
- [48] L. Zhi and et al., *J. Nanobiotechnol.* **22**, 107 (2024).
- [49] S. Hua and et al., *Biomaterials* **268** (2021).
- [50] J. Sapienza Passos and et al., *Int. J. Pharm.* **635**, 122681 (2023).

-
- [51] X. Ma and et al., PLOS Negl. Trop. Dis. **18**, e0012107 (2024).
 - [52] L. Zhong and et al., Nat. Commun. **15**, 5310 (2024).
 - [53] J. Feng and et al., Regen. Biomater. **10**, rbad036 (2023).
 - [54] M. Oveysi and et al., J. Drug Deliv. Sci. Technol. **98**, 105776 (2024).
 - [55] Y. Wang and et al., Nanomedicine **19**, 1557 (2024).