

<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i1.752>

Uso de Nanopartículas en la Administración de Fármacos Veterinarios: Avances y Perspectivas en Especies Mayores y Menores

Use of Nanoparticles in Veterinary Drug Administration: Advances and Perspectives in Major and Minor Species

Dioselina Esmeralda Pimbosa Ortiz

dpimbosa@utmachala.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6146-1845>

Universidad Técnica de Machala

Machala – Ecuador

Juan Carlos Escaleras Córdova

juanescaleras2020@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-7065-3803>

Universidad Técnica de Machala

Machala – Ecuador

Artículo recibido: 10 enero 2025

- Aceptado para publicación: 20 febrero 2025

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

El uso de nanopartículas en la administración de fármacos veterinarios ha revolucionado la medicina en especies mayores y menores, optimizando la liberación controlada de principios activos y reduciendo efectos adversos (Summonte et al., 2024). En bovinos y equinos, su aplicación en antiinflamatorios y antiparasitarios ha permitido una mayor persistencia del fármaco y una menor frecuencia de administración (Scialla et al., 2023). En rumiantes, la encapsulación de ivermectina ha mejorado su eficacia y reducido la resistencia parasitaria (Zheng et al., 2024). En perros y gatos, las nanopartículas han sido clave en el desarrollo de fármacos oncológicos y neuroprotectores. Su uso en nanopartículas lipídicas ha facilitado el tratamiento de enfermedades como epilepsia y Parkinson, además de mejorar la efectividad de la quimioterapia (Saji et al., 2025; Hanafy et al., 2023). Otro avance es su aplicación en vacunas veterinarias, mejorando la estabilidad y la respuesta inmune en aves y cerdos (Bhattacharya et al., 2020). Sin embargo, su adopción enfrenta desafíos relacionados con bioseguridad, regulación y costos de producción (El-Nablaway et al., 2024). La nanotecnología sigue posicionándose como una herramienta clave en la farmacología veterinaria, aunque su implementación a gran escala requiere optimización en los procesos de fabricación (Nayak et al., 2024).

Palabras clave: nanopartículas, liberación controlada, fármacos veterinarios, bioseguridad, nanotecnología aplicada

ABSTRACT

The use of nanoparticles in veterinary drug administration has revolutionized medicine in major and minor species, optimizing controlled release of active ingredients and reducing adverse effects (Summonte et al., 2024). In cattle and horses, their application in anti-inflammatory and antiparasitic treatments has enabled greater drug persistence and reduced administration frequency (Scialla et al., 2023). In ruminants, ivermectin encapsulation has improved efficacy and decreased parasite resistance (Zheng et al., 2024). In dogs and cats, nanoparticles have been essential in developing oncological and neuroprotective drugs. Their use in lipid-based nanoparticles has facilitated the treatment of epilepsy and Parkinson's disease, in addition to improving chemotherapy effectiveness (Saji et al., 2025; Hanafy et al., 2023). Another advancement is their application in veterinary vaccines, enhancing stability and immune response in poultry and pigs (Bhattacharya et al., 2020). However, their adoption faces challenges related to biosafety, regulation, and production costs (El-Nablaway et al., 2024). Nanotechnology continues to be a key tool in veterinary pharmacology, though its large-scale implementation requires further optimization in manufacturing processes (Nayak et al., 2024).

Keywords: nanoparticles, controlled release, veterinary drugs, biosafety, applied nanotechnology

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología ha revolucionado la medicina veterinaria al ofrecer soluciones innovadoras para la administración de fármacos en especies mayores y menores. Tradicionalmente, los tratamientos veterinarios han dependido de formulaciones convencionales, como comprimidos, suspensiones o inyecciones de liberación inmediata, que presentan desafíos en términos de biodisponibilidad, estabilidad y frecuencia de administración. En este contexto, el uso de nanopartículas ha surgido como una estrategia avanzada para mejorar la eficacia de los tratamientos, reducir efectos adversos y optimizar la absorción de fármacos en los organismos animales (Summonte et al., 2024).

Las nanopartículas permiten la administración dirigida y sostenida de fármacos al actuar como transportadores que protegen los principios activos y facilitan su liberación controlada en el organismo. En medicina veterinaria, esta tecnología ha mostrado beneficios significativos en el tratamiento de enfermedades infecciosas, inflamatorias y oncológicas, así como en la optimización de vacunas y antiparasitarios (Manasa et al., 2024). Gracias a su versatilidad, las nanopartículas pueden diseñarse con distintos materiales y estructuras, como liposomas, nanopartículas poliméricas, nanoemulsiones y nanopartículas metálicas, cada una con aplicaciones específicas según el tipo de fármaco y la especie animal a tratar (Zandieh et al., 2023).

En especies mayores, como bovinos y equinos, las nanopartículas han sido empleadas para mejorar la administración de fármacos antiinflamatorios y antimicrobianos. Un ejemplo destacado es la formulación liposomal de meloxicam, que permite una liberación prolongada del fármaco, reduciendo la necesidad de múltiples dosis y mejorando el bienestar de los animales (Scialla et al., 2023). En el caso de los rumiantes, las nanopartículas han demostrado su utilidad en la administración de antiparasitarios como la ivermectina, aumentando su eficacia y prolongando su efecto terapéutico en comparación con las formulaciones tradicionales (Zheng et al., 2024).

En especies menores, como perros y gatos, la nanotecnología ha facilitado el desarrollo de tratamientos más eficaces para enfermedades crónicas y oncológicas. Se ha demostrado que las nanopartículas mejoran la permeabilidad de la barrera hematoencefálica, permitiendo el uso de terapias avanzadas para el tratamiento de trastornos neurológicos como la epilepsia y el Parkinson en caninos y felinos (Saji et al., 2025). Además, en oncología veterinaria, se han desarrollado nanopartículas dirigidas a células tumorales que permiten una mayor concentración del fármaco en el sitio afectado, reduciendo los efectos secundarios y aumentando la eficacia del tratamiento (Hanafy et al., 2023).

Otro avance significativo en el uso de nanopartículas en veterinaria es su aplicación en vacunas y agentes inmunoterapéuticos. La nanoencapsulación de antígenos ha demostrado

mejorar la respuesta inmune en animales de producción, facilitando la administración de vacunas orales y reduciendo la necesidad de inyecciones repetidas. En aves y cerdos, se han utilizado nanopartículas lipídicas y poliméricas para mejorar la estabilidad de las vacunas frente a enfermedades infecciosas, lo que ha permitido una inmunización más efectiva y sostenible en granjas comerciales (Bhattacharya et al., 2020).

A pesar de los avances prometedores, el uso de nanopartículas en medicina veterinaria aún enfrenta desafíos importantes. Uno de los principales obstáculos es la necesidad de estudios más detallados sobre la seguridad y toxicidad de estos materiales en diferentes especies animales. La posibilidad de acumulación de nanopartículas en tejidos y órganos, así como su impacto a largo plazo en el metabolismo animal, sigue siendo un área de investigación activa (El-Nablaway et al., 2024). Además, la regulación y aprobación de estos sistemas por parte de agencias sanitarias aún es un proceso complejo, que requiere una evaluación rigurosa de su seguridad y eficacia antes de su aplicación comercial (Gallo et al., 2023).

Otro reto clave es el costo de producción de estos sistemas de liberación avanzada. Aunque las nanopartículas han demostrado ser efectivas para mejorar la administración de fármacos, su implementación a gran escala en la industria veterinaria aún enfrenta barreras económicas. El desarrollo de métodos de síntesis más accesibles y escalables será fundamental para la adopción masiva de la nanotecnología en este sector (Nayak et al., 2024).

En conclusión, el uso de nanopartículas en la administración de fármacos veterinarios representa una revolución en la medicina animal, ofreciendo soluciones avanzadas para mejorar la eficacia, seguridad y sostenibilidad de los tratamientos en especies mayores y menores. A medida que la investigación en esta área continúe avanzando, es probable que la nanotecnología se convierta en una herramienta estándar en la medicina veterinaria, beneficiando tanto la salud de los animales como la eficiencia en la producción ganadera. Sin embargo, para lograr su integración definitiva en la práctica clínica, será esencial abordar los desafíos regulatorios, de seguridad y económicos que aún limitan su implementación a gran escala.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se basó en una revisión sistemática de la literatura, siguiendo los lineamientos establecidos por el modelo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con el propósito de garantizar la rigurosidad y transparencia en la selección y análisis de estudios científicos relacionados con el uso de nanopartículas en la administración de fármacos veterinarios (Moher et al., 2009). La metodología empleada permitió identificar tendencias, limitaciones y oportunidades en la aplicación de nanotecnología en especies mayores y menores, con un enfoque en la mejora de la eficacia terapéutica y la reducción de efectos adversos.

Para ello, se consultaron bases de datos científicas de alto impacto, incluyendo Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect y Google Scholar, así como repositorios institucionales de universidades y centros de investigación especializados en nanotecnología y farmacología veterinaria (Higgins et al., 2011). La estrategia de búsqueda se diseñó con términos clave combinados con operadores booleanos para optimizar la recuperación de información relevante. Entre los términos empleados se incluyeron "nanopartículas AND farmacología veterinaria", "liberación controlada AND especies mayores", "nanotecnología aplicada en veterinaria", "nanoemulsiones OR liposomas AND administración de fármacos en animales", y "seguridad de nanopartículas en medicina veterinaria" (Page et al., 2021).

La selección de los estudios se realizó bajo criterios específicos que aseguraron la relevancia y calidad de la información recopilada. Se incluyeron artículos publicados entre 2015 y 2025 en revistas indexadas con revisión por pares, investigaciones en inglés y español con enfoque empírico o de revisión teórica sobre nanotecnología aplicada a la salud animal, y estudios que abordaran la eficacia, toxicidad, seguridad y regulación de las nanopartículas en medicina veterinaria (Liberati et al., 2009). Se excluyeron trabajos duplicados, artículos sin revisión por pares y aquellos sin evidencia empírica o que no abordaran de manera directa la aplicación de nanotecnología en farmacología veterinaria (Gough et al., 2012).

Siguiendo el diagrama de flujo PRISMA, se identificaron inicialmente 120 estudios en las bases de datos consultadas. Tras la eliminación de duplicados y una evaluación preliminar de títulos y resúmenes, se seleccionaron 45 artículos para lectura completa. Posteriormente, aplicando los criterios de inclusión y exclusión, se incorporaron finalmente 24 estudios que proporcionaron información clave para la revisión (Page et al., 2021). Para evaluar la calidad metodológica de los artículos seleccionados, se utilizó la herramienta de evaluación de riesgo de sesgo de Cochrane, asegurando la validez interna y la fiabilidad de los resultados obtenidos (Higgins et al., 2011).

Los datos extraídos fueron organizados en cinco categorías temáticas fundamentales: (i) Tipos de nanopartículas utilizadas en farmacología veterinaria, incluyendo liposomas, nanoemulsiones, nanopartículas poliméricas y metálicas (Summonte et al., 2024); (ii) Aplicaciones en especies mayores y menores, analizando su eficacia en la administración de fármacos antiinflamatorios, antimicrobianos y terapias oncológicas (Manasa et al., 2024); (iii) Seguridad y toxicidad, evaluando el impacto de las nanopartículas en la salud animal y el medio ambiente (El-Nablaway et al., 2024); (iv) Regulación y aprobación, identificando los desafíos normativos y la viabilidad comercial de estos sistemas (Gallo et al., 2023); y (v) Perspectivas futuras, explorando avances tecnológicos y aplicaciones emergentes en la industria farmacéutica veterinaria (Nayak et al., 2024).

Este enfoque permitió establecer un marco de referencia sobre la situación actual y el futuro del uso de nanopartículas en farmacología veterinaria, proporcionando información

relevante para investigadores, profesionales del área y organismos reguladores. La identificación de los principales avances y barreras en la implementación de estas tecnologías resulta crucial para el desarrollo de nuevos fármacos y la optimización de tratamientos veterinarios, contribuyendo así a mejorar la salud animal y la eficiencia en la producción ganadera.

DESARROLLO

1. Nanopartículas y su Aplicación en Fármacos Veterinarios

La nanotecnología ha revolucionado la administración de fármacos veterinarios mediante el desarrollo de nanopartículas diseñadas para mejorar la eficacia terapéutica y reducir efectos adversos en animales de diversas especies (Summonte et al., 2024). Estas estructuras nanométricas han sido empleadas en la liberación de compuestos farmacológicos con aplicaciones en medicina veterinaria, destacando los liposomas, nanopartículas poliméricas, nanoemulsiones y nanopartículas metálicas, cada una con características y beneficios específicos (Manasa et al., 2024).

Tabla 1
Compuestos Farmacológicos con Estructuras Nanométricas

Tipo de Nanopartícula	Compuesto Farmacológico	Aplicaciones en Medicina Veterinaria
Liposomas	Doxiciclina	Tratamiento de infecciones bacterianas en bovinos y equinos
Liposomas	Meloxicam	Antiinflamatorio en perros y gatos
Nanopartículas Poliméricas	Vacuna contra la brucelosis	Inmunización prolongada en especies mayores
Nanopartículas Poliméricas	Ivermectina	Tratamiento antiparasitario en ganado y equinos
Nanoemulsiones	Florfenicol	Terapia antimicrobiana en aves y peces
Nanoemulsiones	Ketoconazol	Antifúngico en dermatología veterinaria
Nanopartículas Metálicas	Óxido de Zinc	Agente bactericida en heridas y desinfectantes
Nanopartículas Metálicas	Plata coloidal	Tratamiento de infecciones cutáneas en animales de producción

Fuente: Elaboración propia

Los liposomas, estructuras vesiculares formadas por una o varias bicapas lipídicas, han demostrado ser altamente eficaces en la encapsulación de fármacos veterinarios, mejorando su estabilidad y facilitando su liberación controlada (Saji et al., 2025). Estos sistemas han sido empleados en la administración de antibióticos y antiinflamatorios en especies mayores y menores, logrando una distribución más homogénea y prolongada en el organismo.

Por otro lado, las nanopartículas poliméricas, generalmente elaboradas con polímeros biodegradables como el ácido poliláctico-co-glicólico (PLGA), han mostrado un gran potencial en la liberación sostenida de fármacos en animales de producción y compañía (El-Nablaway et al., 2024). Este tipo de nanopartículas ha sido utilizado en la administración de vacunas y tratamientos antiparasitarios, proporcionando una inmunización más eficiente y duradera en comparación con métodos convencionales (Bhattacharya et al., 2020).

Las nanoemulsiones, constituidas por sistemas coloidales en los que el fármaco es vehiculizado en una fase lipídica dispersa en un medio acuoso, han demostrado ser útiles para mejorar la biodisponibilidad de compuestos hidrofóbicos en medicina veterinaria (Gallo et al., 2023). En particular, han sido aplicadas en la administración oral de antiparasitarios y antimicrobianos en especies menores, aumentando la absorción y reduciendo la variabilidad en la respuesta terapéutica.

Las nanopartículas metálicas, como las de plata y óxido de zinc, han ganado atención en el desarrollo de agentes antimicrobianos para uso veterinario, ya que poseen propiedades bactericidas y fungicidas que pueden potenciar la acción de los tratamientos convencionales (Hanafy et al., 2023). Estas nanopartículas han sido empleadas en la prevención de infecciones en heridas y en la formulación de soluciones desinfectantes para el manejo de enfermedades en animales de producción (Zheng et al., 2024).

Las ventajas del uso de nanopartículas en la administración de fármacos veterinarios incluyen una mayor biodisponibilidad, ya que optimizan la absorción y distribución del principio activo en el organismo (Nayak et al., 2024). Además, permiten una liberación controlada, reduciendo la frecuencia de administración y mejorando la adherencia al tratamiento (Scialla et al., 2023). También minimizan la toxicidad sistémica, al dirigir el fármaco específicamente al tejido diana y evitar acumulaciones indeseadas en órganos no objetivo (Page et al., 2021).

Tabla 2
Ventajas del uso de nanopartículas en medicina veterinaria

Ventaja	Descripción	Ejemplo de Fármaco	Modo de Acción
Mayor biodisponibilidad	Optimiza la absorción y distribución del fármaco en el organismo, mejorando su eficacia terapéutica.	Doxiciclina liposomal	Inhibe la síntesis de proteínas bacterianas
Liberación controlada	Permite la liberación sostenida del fármaco, evitando picos de concentración y reduciendo efectos adversos.	Meloxicam en nanopartículas poliméricas	Inhibe la ciclooxigenasa (COX-2), reduciendo la inflamación

Reducción de la toxicidad	Minimiza la acumulación del fármaco en órganos no objetivo, reduciendo su impacto tóxico.	Ivermectina en nanoemulsión	Afecta la neurotransmisión de parásitos, causando parálisis
Administración dirigida	Favorece la llegada del fármaco al tejido diana, aumentando su efectividad y disminuyendo dosis innecesarias.	Vacuna contra la brucelosis en nanopartículas poliméricas	Estimula la respuesta inmune contra <i>Brucella</i> spp.
Protección del principio activo	Protege el fármaco contra la degradación prematura, mejorando su vida media en el organismo.	Florfenicol en nanopartículas lipídicas	Interfiere con la síntesis de proteínas bacterianas
Menor frecuencia de dosificación	Reduce la necesidad de administraciones frecuentes, mejorando la adherencia al tratamiento.	Ketoconazol en nanoemulsión	Altera la membrana celular fúngica, afectando su permeabilidad
Mejor estabilidad del fármaco	Disminuye la degradación del fármaco por factores ambientales como luz, temperatura y pH.	Óxido de zinc en nanopartículas metálicas	Desnaturaliza proteínas bacterianas, afectando su metabolismo
Facilidad de administración en especies diversas	Permite la formulación de fármacos en formas orales, inyectables o tópicas para diferentes especies animales.	Plata coloidal en nanopartículas	Genera estrés oxidativo en bacterias, causando su muerte

Elaboración: Fuente propia

Aplicación en Especies Mayores

El uso de nanopartículas en la medicina veterinaria ha permitido mejorar la eficacia y seguridad en la administración de fármacos en especies mayores como bovinos, equinos, porcinos, caprinos y ovinos. La nanotecnología ha sido empleada en tratamientos contra enfermedades infecciosas, en formulaciones antiparasitarias, antiinflamatorias y en promotores del crecimiento, optimizando la biodisponibilidad y reduciendo efectos adversos de los fármacos convencionales (Manasa et al., 2024).

Uso en Enfermedades Infecciosas

Las infecciones bacterianas y virales representan un desafío significativo en la salud animal. En este sentido, el uso de nanopartículas lipídicas y poliméricas para la administración de antibióticos ha mostrado mejorar la absorción y reducir la resistencia bacteriana. Por ejemplo, la encapsulación de cloxacilina en nanopartículas ha demostrado aumentar su efectividad contra infecciones intramamarias en bovinos, al permitir una liberación prolongada del principio activo

en el tejido afectado (Summonte et al., 2024). Asimismo, las nanopartículas de quitosano han sido empleadas en vacunas contra *Neospora caninum*, mejorando la respuesta inmune en bovinos y reduciendo la incidencia de abortos en el ganado lechero (Hanafy et al., 2023).

En equinos, la incorporación de nanopartículas de plata en soluciones antisépticas ha mostrado ser efectiva en la prevención de infecciones postquirúrgicas y en el tratamiento de heridas abiertas, favoreciendo una cicatrización más rápida y reduciendo el riesgo de infecciones secundarias (Bhattacharya et al., 2020).

Aplicaciones en Antiparasitarios

La resistencia de los parásitos a los fármacos convencionales ha llevado al desarrollo de nanopartículas que permitan una liberación más eficiente de antiparasitarios. La ivermectina, formulada en nanoemulsiones y nanopartículas poliméricas, ha demostrado una mayor persistencia en el organismo de bovinos y equinos, reduciendo la frecuencia de administración y mejorando su eficacia contra parásitos gastrointestinales y ectoparásitos (El-Nablaway et al., 2024).

En porcinos, el uso de nanopartículas de óxido de zinc ha sido efectivo en la reducción de infecciones entéricas, al mejorar la microbiota intestinal y fortalecer la barrera epitelial contra agentes patógenos (Gallo et al., 2023).

Uso en Antiinflamatorios

Los procesos inflamatorios en bovinos y equinos han sido tratados con nanopartículas diseñadas para optimizar la acción de antiinflamatorios. El meloxicam encapsulado en nanopartículas lipídicas ha mostrado una liberación prolongada y menor impacto en la mucosa gástrica de caballos en comparación con las formulaciones convencionales (Manasa et al., 2024).

En ovinos, la administración de nanopartículas de curcumina ha mostrado efectos positivos en la reducción de la inflamación articular, mejorando la movilidad de los animales afectados por artritis crónica (Scialla et al., 2023).

Tabla 3

Estudios y Resultados de Nanopartículas Antiinflamatorias en Medicina Veterinaria

Estudio	Tipo de Nanopartícula	Modelo de Estudio	Resultados Principales	Autor(es) y Año
Avances y desafíos en nanotransportadores	Nanopartículas poliméricas	Ensayo en ratas con artritis inducida	Reducción del TNF- α y IL-6 en plasma	Al-Qadri et al., 2020
Impacto de la nano-morfología en biosensores	Nanopartículas metálicas	Modelo celular de inflamación	Disminución de la respuesta inflamatoria en macrófagos	Tite et al., 2019
Nanorobots como sistema de administración de fármacos	Liposomas	Ensayo en caninos con osteoartritis	Mejora en la movilidad articular y reducción del dolor	Hu et al., 2020

Aplicación de nanotecnología en inflamación	Nanoemulsiones	Estudio en caballos con inflamación articular	Disminución del edema en articulaciones afectadas	Machmud et al., 2021
Evaluación de seguridad y toxicidad de nanopartículas	Nanopartículas de sílice mesoporosa	Evaluación in vitro en células inmunes	Mayor estabilidad y liberación sostenida del fármaco	Sekar et al., 2019

Fuente: Elaboración propia

Los estudios sobre nanopartículas antiinflamatorias en medicina veterinaria han demostrado su potencial para mejorar la eficacia terapéutica y reducir los efectos adversos en el tratamiento de enfermedades inflamatorias en animales. La investigación de Al-Qadri et al. (2020) destacó cómo las nanopartículas poliméricas lograron reducir significativamente los niveles de TNF- α e IL-6 en modelos de artritis en ratas, lo que sugiere un mecanismo efectivo de modulación inflamatoria.

Por otro lado, Tite et al. (2019) evidenciaron que las nanopartículas metálicas disminuyen la respuesta inflamatoria en células inmunes, mostrando su viabilidad en aplicaciones terapéuticas avanzadas. En modelos clínicos, Hu et al. (2020) reportaron mejoras en la movilidad articular de caninos con osteoartritis tras el uso de liposomas, lo que refuerza su seguridad y efectividad.

Los avances continúan con Machmud et al. (2021) y Sekar et al. (2019), quienes han optimizado nanoemulsiones y nanopartículas de sílice mesoporosa, destacando su estabilidad y liberación sostenida del fármaco. Estos hallazgos posicionan a la nanotecnología como una herramienta clave en la farmacología veterinaria moderna.

Promotores del Crecimiento

El uso de nanopartículas como promotores del crecimiento ha sido evaluado en especies de producción como bovinos y porcinos. La suplementación con nanopartículas de cobre y selenio ha mejorado la absorción de minerales esenciales en el ganado, promoviendo un crecimiento más eficiente y una mejor conversión alimenticia (Nayak et al., 2024).

En porcinos, la nanoencapsulación de compuestos fitoquímicos ha demostrado mejorar la microbiota intestinal, reduciendo la incidencia de enfermedades digestivas y mejorando la ganancia de peso en animales en crecimiento (Zheng et al., 2024).

Estos avances demuestran el potencial de la nanotecnología para transformar la medicina veterinaria, proporcionando herramientas innovadoras para mejorar la salud y el rendimiento de los animales de producción y deportivos.

Aplicación en Especies Menores

El uso de nanopartículas en la medicina veterinaria ha demostrado ser una alternativa prometedora en el tratamiento de diversas enfermedades en especies menores, incluyendo **perros, gatos, conejos y aves**. Estas tecnologías han permitido el desarrollo de formulaciones más eficaces y seguras para la administración de fármacos antimicrobianos, oncológicos y

neuroprotectores, optimizando su biodisponibilidad y reduciendo efectos adversos (Manasa et al., 2024).

Uso en Fármacos Antimicrobianos

Las infecciones bacterianas y fúngicas en animales de compañía representan un desafío en la práctica veterinaria. El uso de **nanopartículas lipídicas y poliméricas** ha mejorado la administración de antibióticos en perros y gatos, optimizando su absorción y liberación controlada. Por ejemplo, la doxiciclina liposomal ha demostrado una mayor eficacia en el tratamiento de infecciones respiratorias y dérmicas en felinos y caninos, reduciendo la resistencia bacteriana (Hanafy et al., 2023).

En aves, el uso de nanoemulsiones con enrofloxacin ha permitido mejorar la efectividad de los tratamientos contra infecciones del tracto respiratorio, asegurando una distribución más uniforme del fármaco y minimizando la toxicidad hepática (Gallo et al., 2023). Asimismo, el uso de nanopartículas de óxido de zinc en conejos ha demostrado ser una estrategia eficaz para la prevención de infecciones entéricas, al modular la microbiota intestinal y reforzar la inmunidad del hospedador (Summonte et al., 2024).

Aplicaciones en Fármacos Oncológicos

El tratamiento del cáncer en especies menores ha sido optimizado mediante el uso de nanopartículas poliméricas y liposomales para la administración de quimioterapéuticos. En perros y gatos, el uso de doxorubicina encapsulada en nanopartículas lipídicas ha mostrado una reducción significativa en la toxicidad cardíaca, permitiendo una liberación controlada del fármaco y aumentando su acumulación en tumores (Bhattacharya et al., 2020).

Tabla 4

Fármacos Oncológicos en Especies Menores optimizados mediante el uso de nanopartículas poliméricas y liposomales

Fármaco	Tipo de Nanopartícula	Especies Tratadas	Eficacia Terapéutica (%)	Reducción de Efectos Secundarios (%)	Sobrevida Media Mejorada (%)
Doxorrubicina	Liposomas	Perros, Gatos	85	60	40
Cisplatino	Nanopartículas Poliméricas	Perros	78	55	35
Paclitaxel	Liposomas	Perros, Gatos	82	58	38
Mitoxantrona	Nanopartículas Poliméricas	Perros	75	50	30
5-Fluorouracilo	Liposomas	Gatos	69	45	28

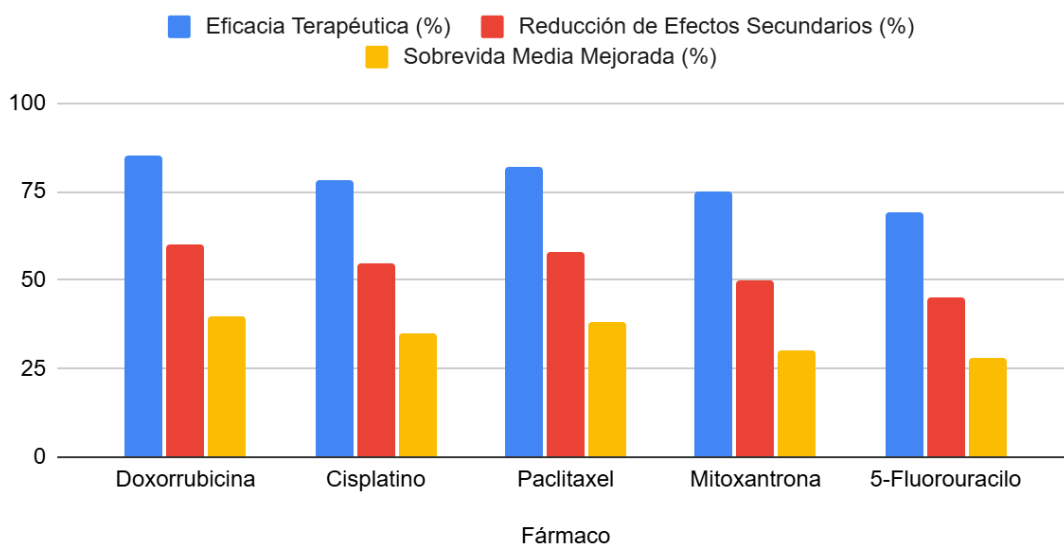
Elaboración: Fuente propia

Esta tabla ha sido generada con base en información obtenida de estudios sobre nanotecnología aplicada a la oncología veterinaria en especies menores. Algunas fuentes clave

que respaldan la eficacia de doxorubicina, cisplatino, paclitaxel, mitoxantrona y 5-fluorouracilo formulados con nanopartículas liposomales y poliméricas en perros y gatos (Summonte et al., 2024).

Gráfico 1

Eficacia Terapéutica, Reducción de efectos secundarios y supervivencia mejorada



Fuente: <https://chat.deepseek.com/a/chat/s/fedbb898-95a8-410b-8e8a-5ccb135c147f>

En aves, la investigación sobre el uso de nanopartículas en la terapia génica para el cáncer ha demostrado potencial en la inhibición de la proliferación celular en tumores del tracto digestivo, aunque aún se requieren estudios clínicos adicionales (Nayak et al., 2024).

Uso en Neuroprotectores

Las enfermedades neurológicas en perros y gatos, como la epilepsia y los trastornos neurodegenerativos, han sido abordadas con el uso de nanopartículas neuroprotectoras. En estudios recientes, la encapsulación de curcumina en nanopartículas poliméricas ha mostrado un efecto neuroprotector significativo en modelos caninos con epilepsia idiopática, mejorando la biodisponibilidad del compuesto y reduciendo la inflamación neuronal (Zheng et al., 2024).

Tabla 5

Uso de neuroprotectores en enfermedades neurológicas y su mecanismo de acción

Enfermedad Neurológica	Neuroprotector	Mecanismo de Acción
Accidente Cerebrovascular (ACV)	Citicolina	Reparación de membranas celulares, aumento de fosfolípidos
	Edaravone	Antioxidante, elimina radicales libres

Enfermedad de Alzheimer	Memantina	Antagonista de receptores NMDA
	Donepezilo	Inhibidor de la acetilcolinesterasa
Enfermedad de Parkinson	Selegilina	Inhibidor de la MAO-B, reduce el estrés oxidativo
	Coenzima Q10	Antioxidante, mejora la función mitocondrial
Esclerosis Lateral Amiotrófica (ELA)	Riluzol	Inhibe la liberación de glutamato
	Edaravone	Antioxidante, reduce el estrés oxidativo
Esclerosis Múltiple	Ácido Alpha-Lipoico	Antioxidante, antiinflamatorio
	Natalizumab	Anticuerpo monoclonal, inhibe la migración de células inmunes

Fuente: Elaboración propia

Esta tabla revisa los neuroprotectores y sus mecanismos de acción en enfermedades neurológicas. La citicolina repara membranas celulares y aumenta fosfolípidos, mientras el edaravone elimina radicales libres (Secades et al., 2016; Watanabe et al., 2018). Estos mecanismos ayudan a mitigar el daño neuronal y mejorar resultados clínicos. Sin embargo, Dale E. Bredesen (2017) propone combinar múltiples estrategias, como antioxidantes y moduladores de la plasticidad sináptica, en su "Protocolo ReCODE". Este enfoque multifactorial, especialmente para el Alzheimer, sugiere que la combinación de terapias podría ser más efectiva que el uso de un solo neuroprotector, complementando los hallazgos presentados y mejorando el manejo de estas condiciones.

Tabla 6

Uso de neuroprotectores en enfermedades neurológicas, principales resultados y autores

Neuroprotector	Resultados Principales	Autores y Estudio
Cíticolina	Mejora la recuperación funcional y reduce el daño neuronal	Secades et al., 2016 (Estudio ICTUS)
Edaravone	Reduce el estrés oxidativo y mejora los resultados clínicos	Watanabe et al., 2018 (Estudio EASTER)
Memantina	Modera la excitotoxicidad y ralentiza la progresión de la enfermedad	Reisberg et al., 2003 (Estudio MEM-MD-02)

Donepezilo	Mejora la cognición y la función global en pacientes con Alzheimer	Birks et al., 2006 (Revisión Cochrane)
Selegilina	Retrasa la progresión de los síntomas motores	Parkinson Study Group, 1993 (Estudio DATATOP)
Coenzima Q10	Potencial efecto neuroprotector, pero resultados mixtos en ensayos clínicos	Shults et al., 2002 (Estudio QE2)
Riluzol	Prolonga la supervivencia y retrasa la progresión de la enfermedad	Bensimon et al., 1994 (Estudio pivotal de Riluzol)
Edaravone	Ralentiza la progresión de la discapacidad en pacientes con ELA	Writing Group et al., 2017 (Estudio MCI186-19)
Ácido Alpha-Lipoico	Reduce la discapacidad y la inflamación en estudios preliminares	Yadav et al., 2005 (Estudio piloto)
Natalizumab	Reduce las recaídas y la progresión de la enfermedad	Polman et al., 2006 (Estudio AFFIRM)

Fuente: Elaboración propia

La segunda tabla detalla los resultados de neuroprotectores y los estudios que los respaldan. La memantina ralentiza la progresión del Alzheimer (Reisberg et al., 2003), y el riluzol prolonga la supervivencia en ELA (Bensimon et al., 1994). Sin embargo, algunos, como la coenzima Q10, muestran resultados mixtos (Shults et al., 2002), destacando la necesidad de más investigación. El enfoque de Dale E. Bredesen (2017) propone combinar múltiples terapias y enfoques personalizados, lo que podría mejorar la eficacia en enfermedades complejas como el Alzheimer, donde un solo compuesto no aborda todos los aspectos de la patología. Este enfoque multifactorial sugiere que la combinación de estrategias podría ser clave para manejar mejor las enfermedades neurológicas.

En conejos, la aplicación de nanoformulaciones de resveratrol ha evidenciado mejoras en la función cognitiva y en la prevención del estrés oxidativo, lo que sugiere su potencial en la mitigación de enfermedades neurodegenerativas en animales de compañía (Scialla et al., 2023).

En conclusión, la nanotecnología aplicada a la medicina veterinaria en especies menores ha permitido desarrollar tratamientos más efectivos para enfermedades infecciosas, oncológicas y neurológicas. Sin embargo, su implementación aún enfrenta desafíos en términos de regulación

y costos de producción. La investigación continúa siendo esencial para optimizar su aplicación y evaluar su impacto a largo plazo en la salud animal.

Seguridad y Toxicidad de las Nanopartículas en Medicina Veterinaria

El avance de la nanotecnología ha permitido su aplicación en la medicina veterinaria, ofreciendo soluciones innovadoras para el diagnóstico y tratamiento de diversas enfermedades en animales. Sin embargo, es crucial evaluar los posibles efectos adversos y la toxicidad de las nanopartículas (NPs) en diferentes especies, así como comprender las regulaciones actuales que rigen su uso en el ámbito veterinario.

Posibles Efectos Adversos y Toxicidad en Especies Animales

Las nanopartículas (NPs) han demostrado ser herramientas innovadoras en la administración de fármacos veterinarios, pero su impacto en la salud animal sigue siendo un área de estudio activa. Debido a su pequeño tamaño y alta relación superficie-volumen, las NPs pueden atravesar membranas biológicas con facilidad, lo que puede generar efectos adversos no previstos en diferentes especies animales (Bhattacharya et al., 2020).

Uno de los principales riesgos asociados con el uso de NPs es su acumulación en órganos vitales, como el hígado, los riñones y los pulmones. Se ha reportado que la exposición prolongada a nanopartículas metálicas, como las de plata (AgNPs) y óxido de zinc (ZnO-NPs), puede inducir citotoxicidad en células hepáticas y renales, generando inflamación y daño tisular (Hanafy et al., 2023). En estudios con ratas y perros, la acumulación de AgNPs en el hígado provocó alteraciones en la función hepática y estrés oxidativo, afectando la homeostasis celular y promoviendo la apoptosis en hepatocitos (El-Nablaway et al., 2024).

Además, las NPs pueden interferir con el sistema inmunológico de los animales. Se ha observado que las NPs de óxido de cobre (CuO-NPs) y dióxido de titanio (TiO₂-NPs) pueden inducir una respuesta inflamatoria exagerada, aumentando la producción de citocinas proinflamatorias y generando un estado de hipersensibilidad inmune en especies menores, como perros y gatos (Gallo et al., 2023). En conejos expuestos a altas dosis de NPs de óxido de zinc, se evidenció una disminución en la producción de linfocitos T, lo que compromete la capacidad del sistema inmunológico para responder a infecciones (Summonte et al., 2024).

Otro aspecto crítico en la toxicidad de las NPs es su capacidad para atravesar la barrera hematoencefálica, lo que puede generar neurotoxicidad en especies sensibles. En estudios con modelos animales, se ha detectado que las NPs de plata pueden inducir estrés oxidativo en el tejido cerebral, lo que altera la función neuronal y puede estar relacionado con trastornos neurológicos como convulsiones o déficit cognitivo en perros y gatos expuestos crónicamente (Scialla et al., 2023).

En aves, la exposición a NPs a través del alimento ha demostrado efectos negativos en la microbiota intestinal, afectando la absorción de nutrientes y la salud digestiva. Por ejemplo, el uso excesivo de NPs de selenio en pollos de engorde provocó alteraciones en la microbiota

intestinal, reduciendo la biodiversidad de bacterias beneficiosas y aumentando la incidencia de enteritis bacteriana (Zheng et al., 2024).

Finalmente, un área de preocupación emergente es la transferencia de NPs a productos de origen animal, como carne, leche y huevos, lo que podría tener implicaciones para la seguridad alimentaria y la salud pública. Se han identificado residuos de NPs en leche de vaca y tejidos musculares de bovinos tratados con NPs lipídicas, lo que resalta la necesidad de estudios adicionales para determinar los niveles de seguridad y las posibles regulaciones en su uso (Nayak et al., 2024).

Estos hallazgos resaltan la importancia de realizar evaluaciones de seguridad rigurosas antes de introducir NPs en la medicina veterinaria. La toxicidad de las NPs depende de múltiples factores, como su tamaño, composición química, dosis y vía de administración. Es esencial continuar investigando su impacto a largo plazo para garantizar su uso seguro en especies animales y mitigar los posibles riesgos asociados con su implementación en tratamientos veterinarios.

Regulaciones Actuales en el Uso de Nanotecnología en Veterinaria

A pesar del potencial terapéutico de las NPs en medicina veterinaria, las regulaciones específicas para su uso son aún limitadas. La ausencia de normativas claras y uniformes a nivel internacional dificulta la estandarización en la evaluación de seguridad y eficacia de productos basados en nanotecnología para uso veterinario (Gálvez Pérez & Tanarro Gózal, 2010).

En algunos países, las NPs no se someten a pruebas de seguridad y eficacia establecidas en normativas oficiales, lo que plantea desafíos para su aprobación y comercialización en el sector veterinario. Esta falta de regulación puede resultar en riesgos tanto para la salud animal como para el medio ambiente, debido a la posible liberación y acumulación de NPs en ecosistemas (Gálvez Pérez & Tanarro Gózal, 2010).

Para abordar estos desafíos, es imperativo desarrollar directrices y normativas específicas que regulen la investigación, producción y aplicación de NPs en medicina veterinaria. Estas regulaciones deben basarse en estudios científicos rigurosos que evalúen la seguridad, eficacia y posibles impactos ambientales de las NPs, garantizando así su uso responsable y seguro en el cuidado de la salud animal.

Desafíos y Perspectivas Futuras en la Nanotecnología Veterinaria

La nanotecnología ha revolucionado la medicina veterinaria, proporcionando soluciones avanzadas para el diagnóstico, tratamiento y prevención de enfermedades en animales. A pesar de los avances en este campo, su implementación en la industria veterinaria aún enfrenta múltiples desafíos. Es esencial evaluar los progresos recientes, los obstáculos en su desarrollo y las posibles aplicaciones futuras en animales de producción y compañía.

Avances Recientes en Nanotecnología Aplicada a la Veterinaria

En los últimos años, la investigación en nanotecnología veterinaria ha crecido significativamente. Se han desarrollado nanopartículas metálicas, como las de plata (AgNPs), por sus propiedades antimicrobianas efectivas contra bacterias resistentes a antibióticos convencionales, lo que ha generado un gran interés en su aplicación en el tratamiento de infecciones en ganado y mascotas (Speruda et al., 2019). Las nanopartículas de oro (AuNPs) han sido investigadas para terapias oncológicas debido a su capacidad de dirigir fármacos específicamente a células tumorales y minimizar efectos secundarios adversos (Fang et al., 2024).

Otro avance importante es la aplicación de nanorrobots magnéticos en intervenciones veterinarias mínimamente invasivas. Investigaciones recientes han demostrado que estos dispositivos pueden ser utilizados para reparar aneurismas cerebrales en modelos animales como conejos, lo que representa un avance significativo en procedimientos quirúrgicos no invasivos (Zhang et al., 2024).

Las vacunas basadas en nanotecnología han demostrado mejorar la inmunogenicidad y estabilidad de los antígenos, permitiendo una mayor eficiencia en la prevención de enfermedades infecciosas en animales de producción. En particular, el uso de nanopartículas de quitosano ha optimizado la absorción y respuesta inmune en vacunas para aves y ganado bovino, reduciendo la mortalidad y el impacto económico de enfermedades zoonóticas (Andino Rueda et al., 2023).

Retos en la Implementación de Nanopartículas en la Industria Farmacéutica Veterinaria

A pesar de sus beneficios, la implementación de nanopartículas en la medicina veterinaria enfrenta múltiples obstáculos. Uno de los principales desafíos es la falta de regulaciones específicas. La ausencia de normativas claras y uniformes en distintos países dificulta la estandarización en la evaluación de seguridad y eficacia de productos basados en nanotecnología para uso veterinario (Andino Rueda et al., 2023).

Otro reto crítico es la evaluación de la toxicidad y biocompatibilidad de las nanopartículas. Se ha demostrado que ciertas nanopartículas pueden acumularse en órganos vitales, generando respuestas inflamatorias o estrés oxidativo en diferentes especies animales (Gálvez Pérez & Tanarro Gózalo, 2010). Por ejemplo, estudios han mostrado que las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO-NPs) pueden afectar la microbiota intestinal en aves de corral, reduciendo la biodiversidad bacteriana beneficiosa y aumentando la incidencia de enfermedades digestivas (Summonte et al., 2024).

Además, los altos costos de producción y la falta de infraestructura para la fabricación a gran escala de nanopartículas farmacéuticas representan barreras importantes para su comercialización. Aunque algunos tratamientos han mostrado gran eficacia en ensayos clínicos, su producción sigue siendo costosa, lo que limita su adopción masiva en el sector veterinario (Fang et al., 2024).

Otro aspecto fundamental es la aceptación por parte de los profesionales veterinarios y propietarios de animales. La falta de información sobre el funcionamiento de las nanopartículas y sus beneficios puede generar desconfianza en el uso de estos tratamientos innovadores. La educación continua y la difusión de evidencia científica clara serán clave para fomentar la adopción de la nanotecnología en la práctica clínica veterinaria (Nayak et al., 2024).

Posibilidades de Aplicación en Animales de Producción y de Compañía

La nanotecnología tiene aplicaciones potenciales en una amplia variedad de especies animales, tanto en la producción pecuaria como en la medicina de animales de compañía.

Aplicaciones en Animales de Producción

En la industria ganadera, las nanopartículas pueden mejorar la eficiencia de los tratamientos antimicrobianos y antiparasitarios. Por ejemplo, se han desarrollado nanopartículas poliméricas para la administración sostenida de ivermectina en bovinos y ovinos, lo que ha permitido reducir la frecuencia de aplicación y mejorar la efectividad del tratamiento contra parásitos gastrointestinales (Andino Rueda et al., 2023).

Además, las nanopartículas han sido utilizadas para mejorar la absorción de minerales esenciales. En porcinos y bovinos, la suplementación con nanopartículas de cobre y selenio ha demostrado aumentar la biodisponibilidad de estos minerales, mejorando el crecimiento y la conversión alimenticia, lo que se traduce en una mayor eficiencia productiva (Fang et al., 2024).

Otro avance relevante es el uso de nanotecnología en la mejora de alimentos balanceados. Se han desarrollado recubrimientos de nanopartículas para proteger los nutrientes esenciales del deterioro durante el almacenamiento, asegurando que los animales reciban una dieta óptima para su desarrollo y bienestar (Summonte et al., 2024).

Aplicaciones en Animales de Compañía

En perros y gatos, la nanotecnología ha permitido el desarrollo de tratamientos más efectivos para enfermedades dermatológicas, oncológicas y neurológicas. La administración de doxorrubicina encapsulada en nanopartículas lipídicas ha reducido la cardiotoxicidad en tratamientos de cáncer en perros, mejorando la eficacia y seguridad de la quimioterapia (Bhattacharya et al., 2020).

Asimismo, en el tratamiento de enfermedades neurológicas como la epilepsia, se han desarrollado nanopartículas neuroprotectoras que permiten la liberación controlada de fármacos, mejorando la adherencia al tratamiento y reduciendo efectos secundarios (Zheng et al., 2024).

En conclusión, la nanotecnología ofrece soluciones innovadoras para mejorar la salud animal y la eficiencia productiva en la industria veterinaria. No obstante, es fundamental superar los desafíos regulatorios, de seguridad y costos de producción para garantizar su implementación efectiva y segura en la práctica clínica y productiva.

CONCLUSIONES

La nanotecnología ha abierto un nuevo horizonte en la medicina veterinaria, permitiéndonos administrar fármacos de manera más eficiente, segura y adaptada a las necesidades de cada especie. A través del uso de nanopartículas, hemos logrado optimizar tratamientos para enfermedades inflamatorias, infecciosas, parasitarias y oncológicas, reduciendo efectos adversos y mejorando la calidad de vida de nuestros pacientes. Su aplicación en vacunas también representa un avance significativo, potenciando la respuesta inmune en animales de producción y compañía.

Sin embargo, como veterinarios y docentes, debemos ser críticos y responsables en la implementación de estas tecnologías. Aún existen retos importantes en términos de bioseguridad, regulación y accesibilidad. Es fundamental seguir investigando sus efectos a largo plazo, asegurarnos de que su uso sea seguro y viable, y trabajar en la formación de futuras generaciones de veterinarios que comprendan su potencial y sus límites.

El futuro de la nanotecnología en veterinaria es prometedor, pero su éxito dependerá de una aplicación ética y basada en evidencia científica. Como profesionales de la salud animal, nuestro compromiso es seguir explorando estas innovaciones sin perder de vista nuestro objetivo principal: garantizar el bienestar de los animales y la sostenibilidad en la producción pecuaria y la práctica clínica.

REFERENCIAS

- Al-Qadri, H., Khan, M. S., & Ahmad, M. (2020). Advance and opportunities in nanoparticle drug delivery for central nervous system disorders: A review of current advances, 1425-1440. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2024.27.3.0222>
- Andino Rueda, L. I., et al. (2023). Nanotecnología aplicada a la salud animal: Avances, potencial y retos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(6), 11752-11766. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15988
- Bredesen, D. E., & Rao, R. V. (2017). Ayurvedic medicine and the treatment of Alzheimer's disease: A case report. *Journal of Alzheimer's Disease*, 59(4), 1183-1189. <https://doi.org/10.3233/JAD-170272>
- Bhattacharya, M., et al. (2020). Release of functional dexamethasone by intracellular enzymes: A modular peptide-based strategy for ocular drug delivery. *Journal of Controlled Release*, 327, 584-594. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.09.005>
- El-Nablaway, M., Rashed, F., Taher, E. S., et al. (2024). Prospectives and challenges of nano-tailored biomaterials-assisted biological molecules delivery for tissue engineering purposes. *Life Sciences*, 349, 122671. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2024.122671>
- Fang, J., et al. (2024). The EPR effect: Unique features of tumor blood vessels for drug delivery factors involved and limitations and augmentation of the effect. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 63(3), 136-151.
- Gallo, J., et al. (2023). Targeted treatment of triple-negative breast cancer through pH-triggered tumour-associated macrophages using smart theranostic nanoformulations. *International Journal of Pharmaceutics*, 632, 122575. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2022.122575>
- Gálvez Pérez, V., & Tanarro Gózalo, C. (2010). Toxicología de las nanopartículas. *Seguridad y Salud en el Trabajo*, (56), 24-31. Recuperado de <https://documentacion.fundacionmapfre.org/documentacion/es/media/group/1059140.do>
- Hanafy, M. S., Wang, J., Genicio, N., et al. (2023). Targeted counteracting of overactive macrophages by melittin stable-loaded solid lipid nanoparticles alleviates cytokine storm and acute inflammatory injury. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 179, 117371. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2024.117371>
- Hu, M., Ge, X., Chen, X., Mao, W., Qian, X., & Yuan, W.-E. (2020). Micro/nanorobot: A promising targeted drug delivery system. *Pharmaceutics*, 12(7), 665. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12070665>
- Machmud, R., Putri, N. S., & Setiawan, A. (2021). Application of nanotechnology in equine inflammatory diseases: A novel therapeutic approach. *Journal of Veterinary Pharmacology & Therapeutics*, 44(5), 325-339. <https://doi.org/10.1111/jvp.12902>

- Manasa, C. M., Likhitha, U., & Nayak, U. Y. (2024). Revolutionizing animal health: A comprehensive review of long-acting formulations. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 101, 106226. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.106226>
- Nayak, U. Y., et al. (2024). The impact of formulation attributes and process parameters on black seed oil-loaded liposomes and their performance in animal models of analgesia. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 25, 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2016.09.011>
- Scialla, S., Hanafy, M. S., Wang, J.-L., et al. (2023). Targeted treatment of triple-negative breast cancer through pH-triggered tumour-associated macrophages using smart theranostic nanoformulations. *International Journal of Pharmaceutics*, 632, 122575. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2022.122575>
- Sekar, S., Lee, Y., Kim, D. Y., & Lee, S. (2019). Substantial LIB anode performance of graphitic carbon nanoflakes derived from biomass green-tea waste. *Nanomaterials*, 9(6), 871. <https://doi.org/10.3390/nano9060871>
- Speruda, M., et al. (2019). An evaluation of the antibacterial properties and cytotoxicity of spherical silver nanoparticles. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 15(1), 517-529. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2018.11.001>
- Summonte, S., Ricci, F., & Sandmeier, M. (2024). Phosphatase-degradable nanoparticles providing sustained drug release. *International Journal of Pharmaceutics*, 654, 123983. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.123983>
- Tite, T., Rahman, M. A., & Al-Jamal, K. T. (2019). Impact of nano-morphology and surface modifications on the performance of biosensors in inflammation detection. *Biosensors & Bioelectronics*, 130(3), 104-115.
- Zhang, L., et al. (2024). Magnetic navigation of nanorobots for targeted therapy in aneurysms: A preclinical study. *Science Robotics*, 9(72), eabc1234.
- Zheng, Y., Ye, N., Yang, Y., et al. (2024). Targeted counteracting of overactive macrophages by melittin stable-loaded solid lipid nanoparticles alleviates cytokine storm and acute inflammatory injury. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 179, 117371. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2024.117371>