

**NANOTECNOLOGIA APLICADA AO COMBATE À *Pseudomonas aeruginosa*: UMA
REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA**

Ana Júlia Melo de Vasconcelos Arruda¹;

¹Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/5406648571330642>

Maísa Santos Moraes²;

²Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/2836200269622413>

Letícia Nicolle Evangelista de Brito Gonçalves³;

³Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/3418656539713346>

Joanna Meireles Marques⁴;

⁴Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/3412000164612790>

Maria Vitória de Souza Barros Macedo⁵;

⁵Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/6189491263369924>

Maressa Rocha do Nascimento⁶;

⁶Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/2656127890749158>

Yasmim Fernandes Ramos⁷;

⁷Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/3412000164612790>

Natália de Medeiros Fiorentino⁸;

⁸Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/1551823648927432>

Laila Cristine da Mota Aragão⁹;

⁹Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/5714494850015962>

Agda Maria da Silva¹⁰;

¹⁰Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/7938281549940511>

Nicolly Magalhães de Oliveira¹¹;

¹¹Programa de Pós-Graduação de Biologia Celular e Molecular Aplicada (PPGBCMA), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/5295305905930492>

Carolina Maria da Silva¹².

¹²Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/0118362487473134>

RESUMO: *Pseudomonas aeruginosa* é um importante patógeno oportunista frequentemente associado às Infecções Relacionadas à Assistência à Saúde, destacando-se por elevada capacidade de desenvolver resistência antimicrobiana (RAM) e formar biofilmes, fatores que dificultam o tratamento e favorecem a persistência das infecções. Nesse contexto, a nanotecnologia surge como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de novas abordagens terapêuticas. O estudo objetivou analisar as aplicações da nanotecnologia no combate às infecções causadas por *P. aeruginosa*. Realizou-se uma revisão integrativa da literatura nas bases LILACS-BVS, PubMed e SpringerLink, considerando artigos experimentais, publicados nos últimos cinco anos e com acesso completo gratuito. Foram selecionados 19 estudos que atenderam aos critérios de inclusão. Os resultados evidenciaram predominância das nanopartículas de prata, as quais demonstraram expressiva atividade antibacteriana e antibiofilme, especialmente contra cepas multidroga-resistentes. Além disso, observou-se capacidade de modulação de fator de virulência, interferência nos sistemas de *quorum sensing* e efeito sinérgico com antibióticos convencionais. Os principais mecanismos de ação envolveram desorganização da membrana celular, estresse oxidativo e interação com DNA e proteínas. Conclui-se que as nanopartículas representam uma alternativa terapêutica promissora, embora sejam necessários mais estudos in vivo e ensaios clínicos para validar sua segurança e eficácia.

PALAVRAS-CHAVE: Nanopartículas. Resistência bacteriana. Biotecnologia.

NANOTECHNOLOGY APPLIED TO COMBATING *Pseudomonas aeruginosa*: AN INTEGRATIVE LITERATURE REVIEW

ABSTRACT: *Pseudomonas aeruginosa* is an important opportunistic pathogen associated with healthcare-associated infections, characterized by a high ability to develop antimicrobial resistance and form biofilms, factors that complicate treatment and favor infection persistence. In this context, nanotechnology emerges as a promising strategy for developing new therapeutic approaches. This study aimed to analyze the applications of nanotechnology in the fight against *P. aeruginosa* infections. An integrative literature review was conducted in the LILACS-BVS, PubMed, and SpringerLink databases, including experimental studies published in the last five years with full free access. Nineteen studies that met the inclusion criteria were selected. The results showed a predominance of silver nanoparticles, which demonstrated strong antibacterial and antibiofilm activity, especially against multidrug-resistant strains. In addition, evidence of virulence factor modulation, interference in quorum-sensing systems, and synergistic effects with conventional antibiotics was observed. The main mechanisms of action involved cell membrane disruption, oxidative stress, and interactions with DNA and proteins. It is concluded that nanoparticles represent a promising therapeutic alternative; however, further in vivo studies and clinical trials are necessary to validate their safety and efficacy.

KEYWORDS: Nanoparticles. Bacterial resistance. Biotechnology.

INTRODUÇÃO

Pseudomonas aeruginosa é um bacilo Gram-negativo, aeróbio, não fermentador e amplamente distribuído no ambiente. Sua elevada versatilidade metabólica e capacidade adaptativa permitem a sobrevivência em condições ambientais adversas, favorecendo processos de colonização persistente em ambientes clínicos e hospitalares (Yehya *et al.*, 2025).

Reconhecida como um dos principais patógenos oportunistas de importância médica e frequentemente está associada às Infecções Relacionadas à Assistência à Saúde (IRAS), sendo responsável por quadros como pneumonia associada à bacteremia, infecções urinárias, sepse, queimaduras infectadas e infecções pulmonares crônicas (Murray *et al.*, 2022).

A espécie apresenta elevada capacidade de desenvolver resistência antimicrobiana por mecanismos intrínsecos e adquiridos, conferindo resistência a diversas classes de antibióticos, incluindo penicilinas, cefalosporinas, carbapenêmicos, fluoroquinolonas, aminoglicosídeos e polimixinas, o que limita significativamente as opções terapêuticas disponíveis. Além disso, sua capacidade de formar biofilmes bacterianos aumenta a tolerância aos antimicrobianos e favorece a persistência das infecções, dificultando a erradicação do microrganismo (Thi *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a nanotecnologia emerge como uma das estratégias mais promissoras no desenvolvimento de novas abordagens antimicrobianas, devido às suas propriedades físico-químicas diferenciadas, maior área superficial, elevada reatividade e capacidade de interação seletiva com estruturas celulares bacterianas. Dentre as principais aplicações biomédicas, destacam-se nanopartículas metálicas (MNPs), especialmente nanopartículas de prata, ouro, cobre e óxido de zinco, além de nanocarreadores lipídicos e matrizes poliméricas capazes de encapsular fármacos e promover sistemas de liberação controlada e direcionada (Rai *et al.*, 2022).

Estudos recentes têm demonstrado que nanomateriais apresentam mecanismos antimicrobianos multifatoriais capazes de atuar simultaneamente sobre diferentes estruturas bacterianas, incluindo desestabilização da membrana celular, geração de espécies reativas de oxigênio (EROs), dano oxidativo ao DNA, inibição de enzimas essenciais ao metabolismo bacteriano e interferência direta na formação e manutenção de biofilmes. Essa atuação múltipla reduz significativamente a probabilidade de desenvolvimento de resistência adaptativa quando comparada aos antimicrobianos convencionais, tornando a nanotecnologia uma ferramenta estratégica no enfrentamento de infecções bacterianas complexas (Slavić *et al.*, 2023).

Tendo em vista os avanços na aplicabilidade da nanotecnologia frente a patogenicidade de *P. aeruginosa* e sua elevada capacidade de desenvolver mecanismos de resistência antimicrobiana, esse trabalho busca reunir e analisar publicações disponíveis acerca dessa temática, visando compreender o potencial dos recursos nanotecnológicos e identificar as lacunas existentes na área, contribuindo para futuras pesquisas e usos terapêuticos.

OBJETIVO

Analisar as principais aplicações da nanotecnologia no combate às infecções causadas por *P. aeruginosa*, destacando o potencial das nanopartículas (NPs) como alternativas terapêuticas frente aos mecanismos de resistência antimicrobiana, bem como sua capacidade de promover atividade bactericida, inibir a formação de biofilmes e potencializar a ação de antimicrobianos convencionais.

METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, com abordagem qualitativa e caráter exploratório-descritivo, conduzida em maio de 2026. Para o gerenciamento do material bibliográfico, remoção de trabalhos duplicados e organização das citações, utilizou-se o *software* Mendeley como ferramenta de apoio.

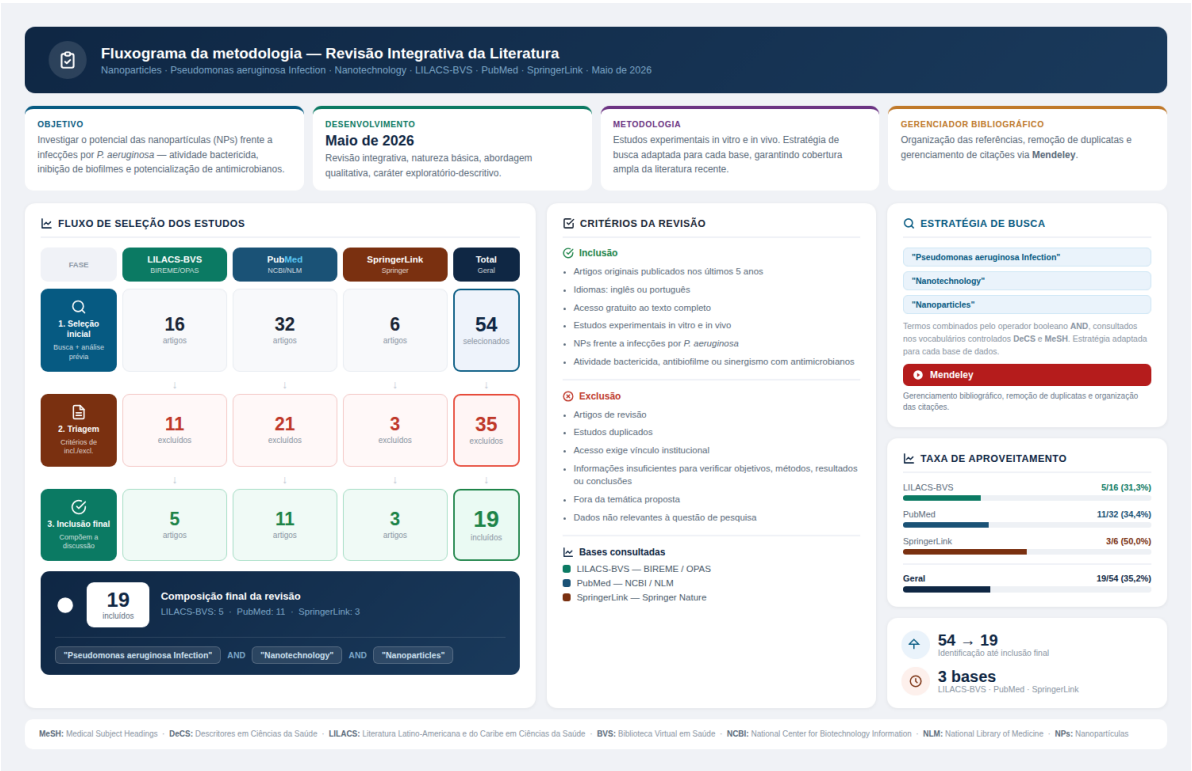
A busca foi conduzida nas bases de dados LILACS-BVS, PubMed e SpringerLink, utilizando descritores na língua inglesa consultados nos Descritores em Ciências da Saúde (DeCS) e no Medical Subject Headings (MeSH). Foram empregados os termos: “*Pseudomonas aeruginosa* Infection”, “Nanotechnology” e “Nanoparticles”, combinados entre si pelo operador booleano “AND”. A estratégia para a busca foi adaptada para cada base de dados, a fim de garantir uma cobertura ampla da literatura recente.

Foram adotados como critérios de inclusão artigos originais, publicados nos últimos cinco anos, em inglês e português com acesso gratuito ao texto completo. Foram incluídos exclusivamente estudos experimentais conduzidos em modelos *in vitro* e *in vivo* que abordassem o potencial de NPs como alternativas terapêuticas inovadoras frente às infecções causadas por *P. aeruginosa*.

Para os critérios de exclusão, foram descartados artigos de revisão, estudos duplicados, publicações que exigissem acesso institucional para leitura do texto completo, assim como trabalhos que apresentavam informações insuficientes para a verificação dos objetivos, métodos, resultados ou conclusões. Também foram excluídos estudos que não atendiam à temática proposta ou que não forneciam dados relevantes para responder à questão de pesquisa estabelecida.

A avaliação quantitativa dos dados foi conduzida com base no número total de estudos selecionados na revisão, calculando-se as proporções de cada variável analisada a partir de sua frequência de ocorrência em relação ao conjunto final de artigos selecionados.

Figura 1: Representação em fluxograma da metodologia.



Fonte: Imagem gerada a partir da utilização de Inteligência Artificial Claude (Anthropic) seguindo o modelo descrito na metodologia com o seguinte prompt: assim como a metodologia aplicada na revisão, crie um um fluxograma ilustrativo e didático sobre a temática.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a aplicação dos critérios de elegibilidade e das etapas de triagem, foram selecionados 19 estudos para compor esta revisão, sendo cinco provenientes da LILACS-BVS, 11 do PubMed e três do SpringerLink. A caracterização dos estudos incluídos encontra-se apresentada no Quadro 1.

Quadro 1: Caracterização dos estudos incluídos na revisão (n=19).

Autor (ano)	Tipo de NP	Principais resultados	Interpretação
Abo Kamer et al. (2024); Azimzadeh et al. (2025); Campos-Beleño et al. (2022)	AgNPs	Atividade antimicrobiana e antibiofilme contra cepas MDR.	Elevado potencial bactericida das AgNPs.
De Celis et al. (2022); Santos et al. (2022); Li et al. (2024)	Óxidos metálicos (ZnO, TiO ₂)	Estresse oxidativo, alterações metabólicas e degradação de biofilmes.	Ação oxidativa relevante no controle bacteriano.
Kamel et al. (2022); Kumar et al. (2025)	Sistemas híbridos e nanoestruturados	Maior eficiência na destruição de biofilmes maduros.	Estratégias mais avançadas e multifuncionais.

Gajera et al. (2023); Mahmood et al. (2024); Mohammed et al. (2022)	AgNPs	Redução de fatores de virulência (piocianina, elastase).	Atenuação da patogenicidade bacteriana.
Mohammed et al. (2022); Campos-Beleño et al. (2022)	AgNPs	Interferência nos sistemas de quorum sensing (las e rhl).	Comprometimento da comunicação bacteriana.
Korolev et al. (2025); Aldujaily et al. (2025)	AgNPs	Aumento da sobrevivência e melhora da cicatrização em modelos <i>in vivo</i> .	Potencial translacional promissor.
Azimzadeh et al. (2025); Ridha et al. (2025)	AgNPs	Sinergismo com antibióticos e redução da CIM.	Possível reversão parcial da resistência.
De Celis et al. (2022); Santos et al. (2022); Kumar et al. (2025)	AgNPs, ZnO-NPs, TiO ₂ -NPs, NPs híbridas e nanocarregadores lipídicos/poliméricos	Mecanismos: estresse oxidativo, dano de membrana, ação em DNA/proteínas.	Ação multifatorial e difícil adaptação bacteriana.

Abreviações: AgNPs, nanopartículas de prata; ZnO, óxido de zinco; TiO₂, dióxido de titânio; TiO₂-NPs, nanopartículas de dióxido de titânio; NPs, nanopartículas; MDR, multidroga-resistente; CIM, Concentração Inibitória Mínima; las, Sistema de quorum sensing *las* de *P. aeruginosa*; rhl, Sistema de quorum sensing *rhl* de *P. aeruginosa*.

Fonte: Autores, 2026.

Tipos de NPs avaliadas

Entre os materiais analisados, houve predominância de nanopartículas de prata (AgNPs), presentes em 73,7% dos estudos (n=14), com destaque para os trabalhos de Abo Kamer *et al.* (2024), Azimzadeh *et al.* (2025) e Campos-Beleño *et al.* (2022), os quais demonstraram forte atividade antimicrobiana contra cepas MDRs de *P. aeruginosa*.

Nanopartículas de óxidos metálicos, como ZnO e TiO₂, foram identificadas em 15,8% dos estudos (n=3), sendo abordadas principalmente por De Celis *et al.* (2022) e Santos *et al.* (2022), que evidenciaram efeitos oxidativos e alterações metabólicas bacterianas. Em sistemas híbridos ou funcionalizados, presentes em 10,5% (n=2), como os descritos por Kamel *et al.* (2022) e Kumar *et al.* (2025), demonstraram maior eficiência na destruição de biofilmes maduros por mecanismos físicos e oxidativos combinados.

Esses resultados reforçam que as AgNPs ainda constituem o principal foco da nanotecnologia antimicrobiana, devido à sua ampla eficácia contra *P. aeruginosa* e à ação multifatorial envolvendo efeitos bactericidas e antibiofilme. Entretanto, há um aumento gradual no interesse por sistemas híbridos, que buscam maior especificidade, estabilidade e redução de toxicidade, indicando uma tendência de evolução para plataformas nanoestruturadas mais complexas e funcionais.

Efeito antibacteriano das NPs

Todos os estudos analisados, 100% (n=19) demonstraram atividade antimicrobiana contra *P. aeruginosa*, evidenciando o amplo potencial bactericida das NPs. Em especial, Abo Kamer et al. (2024) e Ridha et al. (2025) destacaram redução significativa da viabilidade de cepas MDRs após exposição a AgNPs biossintetizadas, reforçando sua eficácia mesmo em perfis clínicos mais resistentes. Segundo Gajera et al. (2023), mesmo em concentrações subletais, as NPs provocam alterações metabólicas importantes, interferindo em vias vitais de sobrevivência, o que reforça sua superioridade frente a antibióticos convencionais de alvo único.

Esses achados evidenciam que o efeito antimicrobiano das nanopartículas não se limita à redução da viabilidade bacteriana, mas envolve uma ação ampla e multifatorial sobre *P. aeruginosa*, assim como, reforça a vantagem das NPs em relação aos antibióticos convencionais, uma vez que sua ação simultânea sobre múltiplos alvos reduz a probabilidade de desenvolvimento de resistência estável.

Atividade antibiofilme

Foi observada em 84,2% dos estudos (n=16), demonstrando elevada importância no controle de infecções persistentes por *P. aeruginosa*. Azimzadeh et al. (2025) identificaram potencial sinérgico entre AgNPs e colistina na redução de biofilmes resistentes. Korzekwa et al. (2022) evidenciaram que as AgNPs imobilizadas dificultam a adesão inicial das bactérias, enquanto Sharma et al. (2023) observaram desorganização da matriz extracelular de biofilmes maduros.

Os dados obtidos indicam que as nanoestruturas não atuam em um único ponto do ciclo de formação do biofilme, mas interferem em diferentes etapas do processo, desde a adesão inicial das células bacterianas à superfície até a maturação e manutenção da matriz extracelular. Essa ação multifásica compromete a organização estrutural do biofilme, reduz sua proteção contra antimicrobianos e aumenta a susceptibilidade bacteriana, o que amplia significativamente o potencial terapêutico dessas NPs no controle de infecções persistentes.

Modulação de virulência e quorum sensing

A interferência em fatores de virulência foi identificada em 52,6% dos estudos (n=10), especialmente nos trabalhos de Gajera et al. (2023), Mahmood et al. (2024) e Mohammed et al. (2022), que relataram redução de compostos como piocianina e elastase.

Além disso, Mohammed et al. (2022) e Campos-Beleño et al. (2022) evidenciaram a modulação dos sistemas de *quorum sensing* (las e rhl), sugerindo que as nanopartículas interferem na comunicação bacteriana. Esse efeito compromete a coordenação da formação de biofilme e a expressão de genes de virulência, reduzindo a capacidade infecciosa do microrganismo.

Em conjunto, foi constatado que a redução de fatores de virulência e a interferência no quorum sensing representam um impacto estratégico das NPs sobre a organização

patogênica de *P. aeruginosa*. Ao desestabilizar esses sistemas regulatórios, as nanoestruturas não apenas enfraquecem a expressão de componentes associados ao dano tecidual, mas também comprometem a manutenção do comportamento infeccioso. Isso indica uma atuação mais ampla e indireta sobre a patogenicidade bacteriana, rompendo com mecanismos essenciais de adaptação e sobrevivência em ambiente hospedeiro, o que reforça seu potencial como abordagem terapêutica inovadora.

Efeitos em modelos *in vivo*

Corresponderam a 26,3% (n=5), com destaque para Korolev *et al.* (2025) e Aldujaily *et al.* (2025), que observaram aumento significativo da sobrevivência dos organismos infectados e redução da carga bacteriana. Em modelos de *Caenorhabditis elegans*, Korolev *et al.* (2025) relataram aumento de até 80% na sobrevivência após tratamento com AgNPs, enquanto Aldujaily *et al.* (2025) demonstraram melhora no processo de cicatrização em feridas infectadas. Esses achados reforçam o potencial translacional das NPs, embora ainda existam desafios relacionados à toxicidade e biodistribuição.

Foi reforçado a relevância translacional das NPs, uma vez que evidenciam efeitos biológicos concretos além do ambiente controlado *in vitro*. O aumento da sobrevivência dos organismos infectados e a redução da carga bacteriana sugerem que essas nanoestruturas conseguem interferir de forma efetiva na progressão da infecção em sistemas biológicos complexos, além de favorecer processos de cicatrização. No entanto, esses achados também evidenciam que fatores como toxicidade e biodistribuição ainda representam limitações importantes para a aplicação clínica segura, exigindo maior aprofundamento em estudos pré-clínicos e de segurança.

Sinergismo com antimicrobianos

A associação entre NPs e antimicrobianos foi identificada em 21,1% dos estudos (n=4), com destaque para Azimzadeh *et al.* (2025) e Ridha *et al.* (2025), que demonstraram redução das concentrações inibitórias mínimas quando AgNPs foram combinadas com gentamicina ou colistina.

Esse sinergismo sugere que essas nanoestruturas podem atuar como adjuvantes terapêuticos, aumentando a permeabilidade celular, facilitando a entrada dos fármacos e, possivelmente, interferindo em mecanismos de resistência previamente estabelecidos, demonstrando que essa estratégia não apenas amplia a eficácia de antibióticos já existentes, mas também representa uma abordagem promissora para o reposicionamento de fármacos frente a cepas MDRs, contribuindo para a otimização de terapias combinadas no combate às infecções por *P. aeruginosa*.

Mecanismos de ação predominantes

Os mecanismos mais frequentemente relatados foram desorganização da membrana celular, em 84,2% dos estudos (n =16), indução de estresse oxidativo, em 68,4% (n=13),

liberação de íons metálicos, em 63,2% (n=12) e interação com DNA e proteínas, em 47,4% (n=9), conforme discutido por De Celis *et al.* (2022), Santos *et al.* (2022) e Kumar *et al.* (2025).

A atuação simultânea e multifatorial dessas vias sugere um efeito sinérgico sobre diferentes alvos celulares essenciais, dificultando os mecanismos adaptativos bacterianos e reduzindo significativamente a probabilidade de desenvolvimento de resistência estável, como ressaltado por Mahmood *et al.* (2024).

Foi ressaltado que as NPs exercem uma ação antimicrobiana complexa e não restrita a um único alvo celular, o que representa um diferencial importante frente aos antibióticos convencionais. A desorganização da membrana celular, associada ao estresse oxidativo e à interação com componentes intracelulares como DNA e proteínas, sugere um efeito cumulativo de danos estruturais e funcionais que compromete múltiplos processos vitais da bactéria. Além disso, a liberação de íons metálicos contribui para a amplificação desse efeito, intensificando o impacto tóxico sobre o microrganismo. Essa atuação simultânea em diferentes níveis celulares reduz a capacidade de adaptação bacteriana, dificultando o surgimento de resistência estável.

Limitações das evidências disponíveis

Apesar dos achados consistentes quanto ao potencial antimicrobiano das NPs, as evidências disponíveis ainda apresentam limitações importantes, como a predominância do uso de modelos *in vitro*, o que reduz a aplicabilidade direta dos resultados em contextos clínicos, além de haver baixa representatividade de estudos *in vivo* e ausência de ensaios clínicos robustos.

Adicionalmente, a variabilidade metodológica entre os estudos, incluindo diferenças no tipo, tamanho, concentração e métodos de síntese das NPs, dificulta a comparação entre os achados e a consolidação de conclusões mais definitivas. Essas lacunas indicam a necessidade de investigações mais padronizadas, especialmente voltadas à avaliação de segurança, toxicidade e eficácia em sistemas biológicos complexos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi evidenciado que a nanotecnologia representa uma estratégia promissora no combate às infecções causadas por *P. aeruginosa*, especialmente por meio da utilização de nanopartículas de prata. Os estudos analisados enfatizam atividade antibacteriana e antibiofilme significativa, além da capacidade de modular fatores de virulência, interferir nos sistemas de *quorum sensing* e potencializar a ação de antimicrobianos convencionais. Esses efeitos estão relacionados a mecanismos multifatoriais, como desorganização da membrana celular, indução de estresse oxidativo e interação com componentes intracelulares bacterianos. Entretanto, a predominância de estudos *in vitro* e a escassez de investigações clínicas reforçam a necessidade de pesquisas adicionais que avaliem a segurança, a eficácia e a viabilidade dessas abordagens em condições reais de infecção.

REFERÊNCIAS

- ANTHROPIC. **Claude** [ferramenta de inteligência artificial]. Versão Claude Sonnet 4.6. San Francisco: Anthropic, 2026. Disponível em: <https://claude.ai>. Acesso em: 15 jun. 2026.
- ABO KAMER, A. M. et al. **Silver nanoparticle with potential antimicrobial and antibiofilm efficiency against multiple drug resistant, extensive drug resistant *Pseudomonas aeruginosa* clinical isolates.** *BMC Microbiology*, v. 24, n. 277, 2024.
- ALDUJAILY, A. H. et al. **The effect of biosynthesized silver nanoparticles on *Pseudomonas aeruginosa*-infected dog wounds.** *PLOS ONE*, v. 20, n. 3, e0313166, 2025.
- AZIMZADEH, M. et al. **Biofilm inhibition of multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa* using green-synthesized silver nanoparticles and colistin.** *Scientific Reports*, v. 15, art. 14993, 2025.
- CAMPOS-BELEÑO, C. et al. **Biologically synthesized silver nanoparticles as antibacterial agents against multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa*.** *Letters in Applied Microbiology*, 2022.
- DE CELIS, M. et al. **Phenotypic and transcriptional study of silver and zinc oxide nanoparticles on *Pseudomonas aeruginosa*.** *Science of the Total Environment*, v. 826, 2022.
- GAJERA, G. et al. **Sub-lethal concentration of nanosilver affects metabolism in multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa*.** *BMC Microbiology*, v. 23, n. 303, 2023.
- KAMEL, M. et al. **Ultrasound-activated nanoparticles eradicate mature biofilms of *Pseudomonas aeruginosa*.** *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022.
- KOROZEKWA, K. et al. **Immobilized silver nanoparticles as antibiofilm agents against *Pseudomonas aeruginosa*.** *International Journal of Molecular Sciences*, v. 23, n. 284, 2022.
- KOROLEV, A. et al. **In vivo evaluation of silver nanoparticles using *Caenorhabditis elegans* infected with *Pseudomonas aeruginosa*.** *Microorganisms*, 2025.
- KOZEKWA, K. et al. **Benefits of immobilized silver nanoparticles as antibiofilm agents against *Pseudomonas aeruginosa*.** *International Journal of Molecular Sciences*, v. 23, n. 284, 2022.
- KUMAR, A. et al. **Coordination polymer nanoparticles induce ROS-mediated killing of *Pseudomonas aeruginosa*.** *Bioactive Materials*, 2025.
- LI, X. et al. **Metal oxide nanoparticles disrupt extracellular polymeric substances of *Pseudomonas aeruginosa* biofilms.** *BMC Microbiology*, 2024.
- MAHMOOD, S. et al. **Silver nanoclusters inhibit biofilm formation and virulence in *Pseudomonas aeruginosa*.** *arXiv*, 2024.
- MOSTAFA, E. M. et al. **Laser-enhanced photothermal effect of silver nanoparticles synthesized by chemical and green methods on Gram-negative bacteria including *Pseudomonas aeruginosa*.** *BMC Chemistry*, 2024.
- MOHAMMED, A. B. A. et al. **The potential activity of biosynthesized silver nanoparticles**

against multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa*. *Environmental Sciences Europe*, v. 34, n. 109, 2022.

RIDHA, D. M. et al. **Evaluation of the antibacterial impact of conjugated gentamicin-biosynthesized silver nanoparticles on resistant *Pseudomonas aeruginosa* isolates in vitro.** *Nano Biomedicine and Engineering*, v. 17, n. 4, p. 551–560, 2025.

SANTOS, R. et al. **Zinc oxide nanoparticles induce oxidative stress in biofilm-forming *Pseudomonas aeruginosa*.** *Science of the Total Environment*, 2022.

SHARMA, P. et al. **Green-synthesized silver nanoparticles inhibit biofilm formation of *Pseudomonas aeruginosa*.** *Microbial Pathogenesis*, 2023.

YADAV, S.; PAWAR, S.; PATIL, S. **Inhibition of *Pseudomonas aeruginosa* biofilm formation using silver nanoparticles.** *Cureus*, v. 17, n. 1, e77848, 2025.