

NANOCARREADORES DE ANTIMICROBIANOS NO CONTROLE DE *Staphylococcus aureus* RESISTENTE À METICILINA (MRSA): UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Milena Ferreira Cruz¹;

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

<http://lattes.cnpq.br/4207450737094664>

Ana Júlia Melo de Vasconcelos Arruda²;

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

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

Ana Heloisa Moura da Silva³;

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

<http://lattes.cnpq.br/2544582406623937>

Marina Guimarães Bastos Falcão⁴;

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

<http://lattes.cnpq.br/5601348392027105>

Ana Julia Freitas Lima⁵;

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

<http://lattes.cnpq.br/8326671224576230>

Artur Cavalcante da Costa Pinheiro⁶;

⁶Faculdade Pernambucana de Saúde (FPS), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/3321409636375512>

Natália de Medeiros Fiorentino⁷;

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

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

Yasmim Fernandes Ramos⁸;

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

<http://lattes.cnpq.br/8755343599432821>

Larissa Passos de Moura Ximenes⁹;

⁹Instituição de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<https://lattes.cnpq.br/2110687303513200>

Matheus Rodrigues Torres Farias¹⁰;

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

<http://lattes.cnpq.br/4211471221712331>

Maria Luiza Sobral de Araújo Souza Rocha¹¹;

¹¹Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/8784948076450613>

Letícia Nicolle Evangelista de Brito Gonçalves¹²;

¹²Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UPE), Recife, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/8784948076450613>

Danielle Aguiar Souza¹³;

¹³Universidade de Pernambuco (UPE), Ouricuri, Pernambuco.

<http://lattes.cnpq.br/5967001827450079>

Carolina Maria da Silva¹⁴.

¹⁴Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, Pernambuco.

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

RESUMO: A resistência antimicrobiana constitui um importante desafio para saúde pública, especialmente diante da persistência de bactérias multirresistentes, como *Staphylococcus aureus* resistente à metilicina (MRSA). Nesse contexto, os nanocarreadores têm sido investigados como estratégias para potencializar a ação de agentes antimicrobianos e interferir na formação de biofilmes. Esse estudo objetivou analisar os principais mecanismos de ação e aplicações microbiológicas de nanocarreadores como potencializadores de agentes antimicrobianos frente a MRSA. Trata-se de uma revisão sistemática da literatura, de caráter exploratório-descritivo, e uma abordagem de natureza básica, realizada conforme fluxograma PRISMA. As buscas foram realizadas nas bases PubMed e LILACS-BVS e também na plataforma MDPI, foram utilizados os descritores “Nanocarriers”, “Nanoparticles” e “Drug Delivery Systems” combinados pelo operador “AND”. Foram selecionados 14 artigos publicados entre 2021 e 2026. A atividade antimicrobiana frente ao MRSA foi avaliada em 100% (n=14) dos estudos, enquanto a atividade antibiofilme esteve presente em 85,7% (n=12). Também foram identificadas estratégias de modulação de fatores de virulência e potencialização de ação antimicrobiana. Conclui-se que os nanocarreadores apresentam potencial complementar no controle do MRSA, embora sejam necessários estudos adicionais para confirmar sua segurança, eficácia e aplicação clínica.

PALAVRAS-CHAVE: Nanopartículas. Resistência antimicrobiana. Nanotecnologia.

ANTIMICROBIAL NANOCARRIERS FOR THE CONTROL OF METHICILLIN-RESISTANT *Staphylococcus aureus*: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

ABSTRACT: Antimicrobial resistance constitutes an important public health challenge, especially given the persistence of multidrug-resistant bacteria, such as methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA). In this context, nanocarriers have been investigated as strategies to enhance antimicrobial action and interfere with biofilm formation. This study aimed to analyze the main mechanisms of action and microbiological applications of nanocarriers as enhancers of antimicrobial agents against MRSA. This systematic literature review had an exploratory-descriptive character and a basic research approach, conducted according to the PRISMA flowchart. Searches were performed in PubMed, LILACS-BVS, and the MDPI platform, using the descriptors “Nanocarriers,” “Nanoparticles,” and “Drug Delivery Systems,” combined with the Boolean operator “AND.” Fourteen articles published between 2021 and 2026 were selected. Antimicrobial activity against MRSA was evaluated in 100% (n=14) of the studies, while antibiofilm activity was present in 85.7% (n=12). Strategies for modulating virulence factors and enhancing antimicrobial action were also identified. It is concluded that nanocarriers present complementary potential for MRSA control, although additional studies are needed to confirm their safety, efficacy, and clinical application. These findings highlight their potential as complementary tools for antimicrobial therapy, particularly in addressing infections and biofilm-associated resistance caused by MRSA, and may support improved therapeutic approaches.

KEYWORDS: Nanoparticles. Antimicrobial resistance. Nanotechnology.

INTRODUÇÃO

A resistência antimicrobiana (RAM) constitui um dos principais desafios para saúde pública, estando atrelada principalmente à redução da eficácia de agentes antimicrobianos e à dificuldade no controle de patógenos resistentes. Entre as bactérias de relevância clínica, *Staphylococcus aureus* resistente à meticilina (MRSA) destaca-se pela forte produção de biofilmes, característica que contribui para a persistência bacteriana (Abdelraheem *et al.*, 2021; Merghni *et al.*, 2022).

A formação de biofilmes favorece a manutenção das células bacterianas e impede a ação de agentes antimicrobianos, tornando-se um dos aspectos relevantes para o desenvolvimento de estratégias destinadas ao controle de cepas resistentes. Diante das dificuldades encontradas frente a cepas multirresistentes e de elevada virulência, a nanotecnologia surge como uma abordagem complementar para ampliar as alternativas terapêuticas disponíveis. Nesse contexto, os nanocarreadores destacam-se por possibilitar o transporte e a liberação de agentes antibacterianos e compostos bioativos, além de algumas formulações apresentarem atividade antimicrobiana própria (Mohamed *et al.*,

2022; Buldain *et al.*, 2024; Jiang *et al.*, 2026). A diversidade de plataformas investigadas, incluindo nanopartículas metálicas, sistemas magnéticos, carreadores lipídicos, estruturas poliméricas, supramoleculares e biomiméticas, evidencia a versatilidade das estratégias nanoestruturadas aplicadas ao enfrentamento de microrganismos resistentes (Abdelraheem *et al.*, 2021; Mohamed *et al.*, 2022; Li, X. *et al.*, 2023; Shen *et al.*, 2024).

Além da ação bactericida direta, os nanocarreadores têm sido investigados no controle de biofilmes e em sistemas de associação com diferentes fármacos. A combinação entre nanopartículas de prata e amoxicilina, por exemplo, demonstrou atividade frente à MRSA, enquanto formulações contendo cefotaxima e daptomicina vêm sendo investigadas quanto ao potencial de ampliar a ação desses compostos sobre o microrganismo (Alenazi *et al.*, 2026; Mohamed *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2026). Os resultados reforçam o interesse em sistemas nanoestruturados capazes de atuar simultaneamente sobre diversos mecanismos de persistência.

OBJETIVO

Diante do cenário exposto, o objetivo deste estudo foi analisar, através da literatura científica, os principais mecanismos de ação e aplicações microbiológicas de nanocarreadores como potencializadores de agentes antimicrobianos frente a isolados de *Staphylococcus aureus* multidroga-resistentes (MDR).

METODOLOGIA

O estudo consiste em uma revisão sistemática da literatura, de natureza básica, caráter exploratório-descritivo e abordagem qualitativa, conduzida em setembro de 2026, fundamentado nas recomendações do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA).

A busca pelos estudos foi realizada nas bases de dados PubMed e LILACS-BVS e na plataforma de periódicos MDPI. Para estratégia de busca, utilizou descritores nos idiomas inglês e português indexados no Medical Subject Headings (MeSH) e nos Descritores em Ciências da Saúde (DeCS), sendo eles: “Nanocarriers”, “Nanoparticles” e “Drug Delivery Systems”, interligados por meio dos operadores booleanos “AND”.

Como critérios de inclusão, foram selecionados artigos originais experimentais, redigidos nos idiomas inglês e português, publicados entre 2021 e 2026 e com acesso gratuito ao texto completo. Como critérios de exclusão, foram descartadas revisões de literatura, trabalhos fora do escopo temático, estudos que não envolvessem nanocarreadores ou não apresentassem avaliação frente ao MRSA, publicações com informações metodológicas insuficientes, duplicatas e estudos sem acesso ao texto completo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca resultou inicialmente em 60 artigos do PubMed, 5.760 do LILACS-BVS e 34 do MDPI. Após a aplicação dos filtros de busca, permaneceram 9 registros do PubMed, 226 da LILACS-BVS e 9 da MDPI. Em seguida, foram excluídos 1 artigo do PubMed, 147 da LILACS-BVS e 2 da MDPI após a leitura dos títulos e resumos. Na etapa de elegibilidade, realizada mediante leitura na íntegra, foram excluídos 1 artigo do PubMed, 76 da LILACS-BVS e 3 da MDPI, representados na Tabela 1.

Concluída a etapa de seleção, foram incluídos 14 artigos que atenderam aos critérios de elegibilidade estabelecidos dos quais 50% (n=7) foram provenientes do PubMed, 28,6% (n=4) do MDPI e 21,4% (n=3) do LILACS-BVS.

Tabela 1: Fluxograma PRISMA.

Fase	Descrição	PubMed (n)	LILACS-BVS (n)	MDPI (n)	Total (n)
Identificação	Registros identificados nas bases de dados	60	5.760	34	5.854
Triagem	Registros resultantes após a aplicação dos filtros de busca	9	226	9	244
	Registros excluídos	51	5.534	25	5.610
Elegibilidade	Registros selecionados após a leitura de títulos e resumos	8	79	7	94
	Registros excluídos	1	147	2	150
Elegibilidade	Registros avaliados após a leitura na íntegra	8	79	7	94
	Registros excluídos	1	76	3	80
Inclusão	Artigos incluídos na revisão sistemática	7	3	4	14

Fonte: Autores, 2026.

Tipos de materiais e carreadores avaliados

A análise dos 14 estudos selecionados evidenciou ampla diversidade de estruturas nanométricas aplicáveis no enfrentamento do MRSA (Tabela 2). Os sistemas inorgânicos e metálicos ganharam destaque, representando 35,7% (n=5) dos estudos, incluindo nanopartículas de prata, óxido de zinco, sistemas magnéticos e nanocompósitos híbridos, além de sistemas poliméricos, supramoleculares, biomiméticos e lipídicas (Abdelraheem *et al.*, 2021; Merghni *et al.*, 2022; Mohamed *et al.*, 2022; Li, X. *et al.*, 2023; Shen *et al.*, 2024). No contexto de sistemas metálicos, Alenazi *et al.* (2026) empregaram AgNPs carregadas com amoxicilina, ao passo que Mohamed *et al.* (2022) desenvolveram NPs magnéticas contendo cefotaxima, demonstrando que a nanoestrutura também pode ser empregada na potencialização de antibióticos convencionais. Por outro lado, Abd El-Hamid *et al.* (2024) utilizaram NPs porosas contendo alcaloides, enquanto Li, H. *et al.* (2026) criaram um

nanocarreador biomimético com revestimento de membrana de macrófagos.

Da mesma forma, foram reconhecidos carreadores lipídicos e vesiculares, incluindo nanocarreadores contendo óleo essencial de *Melaleuca armillaris*, sistemas que utilizam daptomicina, quatsomes e scaffolds niosômicos vinculados à impressão 3D (Buldain *et al.*, 2024; Jiang *et al.*, 2026; Köber *et al.*, 2026; Asalipisheh *et al.*, 2025). A grande variedade de sistemas demonstra a flexibilidade das estratégias nanobiotecnológicas, que podem ser ajustadas tanto para o enfrentamento direto do microrganismo, quanto para para o transporte e liberação dos mais diversos agentes antimicrobianos, surgindo como uma abordagem complementar diante da dificuldade no controle de cepas resistentes.

Atividade antimicrobiana

A avaliação da atividade antimicrobiana frente ao MRSA foi identificada em 100% (n=14) dos estudos incluídos, formando o principal foco investigativo. Embora todos os trabalhos abordassem a redução tanto da viabilidade quanto do crescimento bacteriano, as estratégias aplicadas foram distintas, considerando a diversidade de nanossistemas empregados. Foram exploradas a ação antimicrobiana própria dos nanocompósitos, assim como as nanoestruturas como suporte para veiculação de diferentes compostos.

Dentre os mecanismos de ação direta, destacam-se NPs de óxido de zinco e de prata. Abdelraheem *et al.* (2021) detectaram atividade das NPs de ZnO frente a isolados de *S. aureus*, enquanto Merghni *et al.* (2022) analisaram os efeitos das AgNPs biossintetizadas contra cepas de MRSA. Respostas semelhantes foram obtidas por Alenazi *et al.* (2026), ao associarem NPs de prata à amoxicilina e observarem atividade contra o patógeno.

A multiplicidade dos resultados obtidos indica que a atividade antimicrobiana não está restrita a um único veículo, ou classe de nanomateriais. Sistemas com composições diversas apresentam capacidade de interferir na sobrevivência do MRSA, tanto pela ação de seus compostos, quanto pela associação com agentes antimicrobianos. Portanto, os achados reforçam o potencial da nanotecnologia como alternativa promissora na ampliação de ferramentas para o enfrentamento da RAM.

Tabela 2: Caracterização dos nanocarreadores avaliados frente isolados multirresistente de *Staphylococcus aureus* nos estudos selecionados.

Nanocarreador	Autor/ Ano	Bactéria/cepa	Aplicação	Principais achados
Sílica mesoporosa + berberina	Abd El-Hamid <i>et al.</i> (2024)	VRSA	Antimicrobiano/ antibiofilme	Atividade antibacteriana, redução de biofilme e modulação de genes associados à virulência.
ZnO-NPs	Abdelraheem <i>et al.</i> (2021)	<i>S. aureus</i> resistente	Antimicrobiano/ antibiofilme	Atividade antibacteriana, redução de biofilme, com efeitos sobre fenótipos de resistência.

AgNPs + amoxicilina	Alenazi <i>et al.</i> (2026)	MRSA	Antimicrobiano/ antibiofilme	Atividade antibacteriana, redução de biofilme e potencialização da ação da amoxicilina.
Niossomos + curcumina/ ceftizoxima	Asalipisheh <i>et al.</i> (2025)	MRSA/CRKP	Antimicrobiano	Atividade antibacteriana, liberação sustentada dos compostos e redução dos genes de resistência.
NLC + óleo de <i>M. armillaris</i>	Buldain <i>et al.</i> (2024)	MRSA/MSSA	Antimicrobiano/ antibiofilme	Atividade antibacteriana, redução de biofilme, melhora da viabilidade celular.
Nanocarreador + daptomicina	Jiang <i>et al.</i> (2026)	MRSA	Terapia sistêmica	Atividade antibiofilme e eliminação da MRSA, inclusive <i>in vivo</i> .
Quatsomes	Köber <i>et al.</i> (2026)	<i>S. aureus</i> /MRSA	Antimicrobiano/ antibiofilme	Atividade bactericida e antibiofilme.
Nanocarreador biomimético	Li, H. <i>et al.</i> (2026)	MRSA	Infecção pulmonar	Direcionamento ao foco infeccioso e melhora da lesão em modelo animal.
Nanocarreador + óxido nítrico	Li, G. <i>et al.</i> (2023)	<i>S. aureus</i>	Feridas infectadas	Liberação de NO com atividade antibacteriana e cicatrização.
AgNPs biossintetizadas	Merghni <i>et al.</i> (2022)	MRSA	Superfícies/ biofilme	Atividade antibacteriana e antibiofilme.
Nanopartículas magnéticas + cefotaxima	Mohamed <i>et al.</i> (2022)	MRSA	Antimicrobiano	Melhora da ação da cefotaxima no controle de MRSA.
Nanossistema + caspofungina/ moxifloxacina	Pinto <i>et al.</i> (2023)	<i>S. aureus</i>	Biofilme em cateter	Atuação na matriz do biofilme, redução de biofilmes estabelecidos e avaliação <i>in vivo</i> .
Ag@Chi-PB + laser NIR	Shen <i>et al.</i> (2024)	MRSA	Abscesso infectado	Efeito sinérgico entre ação fototérmica e liberação de Ag ⁺ , eliminação de MRSA.
Revestimento polimérico + vancomicina	Tsikopoulos <i>et al.</i> (2023)	MRSA	Implantes	Atividade antibacteriana sobre discos de titânio, potencial para prevenção de infecções associadas a implantes.

Abreviações: VRSA: *Vancomycin-Resistant Staphylococcus aureus*; MRSA: *Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus*; CRKP: *Carbapenem-Resistant Klebsiella pneumoniae*; AgNPs: nanopartículas de prata; ZnO-NPs: nanopartículas de óxido de zinco; NLC: nanocarreadores lipídicos nanoestruturados; NO: óxido nítrico; NIR: infravermelho próximo; Ag@Chi-PB: nanocomposto de prata, quitosana e azul da Prússia; MSSA: *Methicillin-Susceptible Staphylococcus aureus*. **Fonte:** Autores, 2026.

Atividade antimicrobiana

A avaliação da atividade antimicrobiana frente ao MRSA foi identificada em 100% (n=14) dos estudos incluídos, formando o principal foco investigativo. Embora todos os trabalhos abordassem a redução tanto da viabilidade quanto do crescimento bacteriano, as estratégias aplicadas foram distintas, considerando a diversidade de nanossistemas empregados. Uma parcela das pesquisas explorou a ação antimicrobiana própria dos nanocompósitos, ao mesmo tempo que outras utilizaram das nanoestruturas como suporte para veiculação de diferentes compostos.

Dentre os mecanismos de ação direta, destacam-se NPs de óxido de zinco e de prata. Abdelraheem *et al.* (2021) detectaram atividade das NPs de ZnO frente a isolados de *S. aureus*, enquanto Merghni *et al.* (2022) analisaram os efeitos das AgNPs biossintetizadas contra cepas de MRSA. Respostas semelhantes foram obtidas por Alenazi *et al.* (2026), ao associarem NPs de prata à amoxicilina e observarem atividade contra o patógeno.

A multiplicidade dos resultados obtidos indica que a atividade antimicrobiana não está restrita a um único veículo, ou classe de nanomateriais. Sistemas com composições diversas apresentam capacidade de interferir na sobrevivência do MRSA, tanto pela ação de seus compostos, quanto pela associação com agentes antimicrobianos. Portanto, os achados reforçam o potencial da nanotecnologia como alternativa promissora na ampliação de ferramentas para o enfrentamento da RAM.

Atividade antibiofilme

A interferência na formação e manutenção de biofilmes foi identificada em 85,7% (n=12) dos estudos, tornando-se o principal foco de estratégia nanoestruturada. Com alto impacto considerando que os biofilmes contribuem para a persistência de *S. aureus* e dificultam a ação de agentes antimicrobianos.

Observou-se efeitos tanto na formação quanto sobre estruturas pré-estabelecidas. As NPs de ZnO, por exemplo, reduziram a formação de biofilmes em isolados de *S. aureus* como analisado por Abdelraheem *et al.* (2021), à medida que AgNPs biossintetizadas demonstraram capacidade de interferir em biofilmes de MRSA pré-formados (Merghni *et al.*, 2022). À medida que Alenazi *et al.* (2026) analisaram a atividade antibiofilme da associação entre AgNPs e amoxicilina, indicando que a incorporação de antibióticos nas plataformas nanoestruturadas pode ampliar as possibilidades de atuação desses mecanismos.

Ademais, a atividade antibiofilme também foi observada em nanossistemas distintos. Abd El-Hamid *et al.* (2024) demonstraram que NPs porosas encapsulando alcaloides foram capazes de atuar sobre biofilmes de *S. aureus* MDR, enquanto um sistema liberador de óxido nítrico mostrou atividade em modelos de ferida infectada (Li, X. *et al.*, 2023). Enquanto, Köber *et al.* (2026) apresentaram resultados referentes à ação de quatsomes sobre células planctônicas e biofilmes de *S. aureus*. Em suma, os achados reforçam que a atuação sobre

a comunidade microbiana pode ser alcançada por diferentes mecanismos.

Modulação da virulência e resistência

Além da avaliação da atividade antimicrobiana e antibiofilme, os nanocarreadores podem ser estudados quanto ao seu potencial de modular fatores associados à virulência de MRSA, interferindo nos aspectos que contribuem para sua patogenicidade, como a adesão, formação de biofilme e produção de toxinas. Em alguns estudos foram observadas estratégias terapêuticas para reduzir expressões de genes envolvidos em diferentes mecanismos. Assim, Abd El-Hamid *et al.* (2024) analisou por qRT-PCR a expressão dos genes de virulência *icaA*, *tst*, *clfA*, *hla* e *pvl*, envolvidos na formação de biofilme, na síndrome do choque térmico, na adesão, na hemólise e na formação de poros da membrana, respectivamente, e observou que as nanopartículas de sílica mesoporosa carregadas com berberina promoveram uma redução na expressão desses genes.

Paralelamente, Abdelraheem *et al.* (2021) avaliaram NPs de ZnO frente à isolados de *S. aureus* e demonstraram sua capacidade de reduzir a expressão de genes relacionados à formação de biofilme, como *icaA*, *icaD* e *fnbA*. Além da perspectiva do potencial antivirulência das nanopartículas, os autores enfatizaram a possibilidade de alterar a expressão de *mecA*, *vanA* e *cfr*, genes associados à resistência aos antimicrobianos, sendo um complemento crucial na terapia contra MRSA. Nessa perspectiva, as propostas nanotecnológicas apresentadas evidenciam que existem vias alternativas para o controle bacteriano sem focar na sua eliminação.

Aplicações translacionais e modelos *in vivo*

A validação em modelos animais representa uma etapa importante na determinação da atividade microbiológica, no qual, a resposta do hospedeiro, a biodistribuição e a toxicidade do sistema impactam diretamente no resultado terapêutico. Por isso o avanço do nanocarreador para modelos *in vivo* é um indicativo de seu potencial translacional. Dentre os estudos analisados, apenas uma pequena parcela avançou para essa etapa. Nesse contexto, Li *et al.* (2026), Pinto *et al.* (2023), Abd El-Hamid *et al.* (2024) demonstraram a aplicabilidade translacional dessas tecnologias ao empregarem um modelo de lesão pulmonar aguda por MRSA, biofilme em cateter e feridas infectadas, respectivamente. Nestes ensaios as nanoestruturas foram utilizadas tanto para a entrega direcionada de fármacos e compostos ativos quanto combinadas a terapias físicas (como a fototérmica) comprovando a sua capacidade de reduzir a carga bacteriana, atenuar a resposta inflamatória, modular genes de virulência e acelerar a cicatrização com baixa toxicidade no sistema.

Em contrapartida, a maior parte da literatura avaliada concentrou-se exclusivamente na caracterização *in vitro* e *ex vivo*. Embora os testes preliminares sejam indispensáveis para elucidar mecanismos de ação e parâmetros físico-químicos, a falta de dados *in vivo*

demonstra uma lacuna crítica que limita o uso dos dados obtidos na prática clínica. Assim, os estudos que atingiram a parte pré-clínica reforçam a importância de avaliar desfechos translacionais para guiar o desenvolvimento de terapias nanotecnológicas eficazes contra a MRSA.

Limitações das evidências disponíveis

Apesar dos resultados promissores, as evidências disponíveis apresentam algumas limitações. Os 14 estudos incluídos utilizaram diferentes materiais, formulações e tipos de nanocarreadores, e essa heterogeneidade dificulta a comparação direta entre os resultados. Também foram empregadas diferentes estratégias para avaliar as atividades antimicrobianas e antibiofilme. Além disso, a maior parte das evidências foi obtida em condições experimentais, principalmente *in vitro*. Apenas uma parcela dos estudos avançou para modelos *in vivo*. Essa diferença entre os modelos reduz a possibilidade de aplicação em cenários clínicos. Portanto, os resultados devem ser interpretados como evidências iniciais do potencial dos nanocarreadores no enfrentamento do MRSA.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os achados evidenciaram o potencial dos nanocarreadores como estratégias complementares no enfrentamento do MRSA, especialmente por sua capacidade de atuar sobre diferentes processos envolvidos na infecção, na resistência e na virulência bacteriana. A versatilidade dessas plataformas reforça sua relevância como alternativa diante dos desafios relacionados à RAM, potencializando a ação antimicrobiana e reduzindo a virulência, embora sua aplicação ainda dependa de maior consolidação científica.

Nesse contexto, estudos pré-clínicos e clínicos padronizados são necessários para estabelecer parâmetros de segurança, eficácia, estabilidade e aplicabilidade terapêutica. Dessa forma, o avanço dessas tecnologias poderá contribuir para o desenvolvimento de abordagens inovadoras no controle de infecções por MRSA e no enfrentamento da RAM.

REFERÊNCIAS

ABD EL-HAMID, Marwa I. et al. Tackling strong biofilm and multi-virulent vancomycin-resistant *Staphylococcus aureus* via natural alkaloid-based porous nanoparticles: perspective towards near future eradication. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, v. 13, p. 1287426, 2024.

ABDELRAHEEM, Wedad M. et al. Effect of ZnO nanoparticles on methicillin, vancomycin, linezolid resistance and biofilm formation in *Staphylococcus aureus* isolates. ***Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials***, v. 20, n. 1, p. 54, 2021.

ALENAZI, Naifa et al. Propriedades antibacterianas aprimoradas de nanopartículas de

prata carregadas com amoxicilina contra *Staphylococcus aureus* resistente à meticilina: caracterização físico-química, atividade antivirulência e inibição de biofilme. **PeerJ** , v. 14, p. e20924, 2026.

ASALIPISHEH, Aisan *et al.* Enhanced antibacterial activity of 3D-printed niosome-curcumin/ceftizoxime scaffolds against drug-resistant pathogens. **BMC microbiology**, v. 25, n. 1, p. 650, 2025.

BULDAIN, Daniel *et al.* Atividade antimicrobiana de carreadores lipídicos nanoestruturados carregados com óleo essencial de *Melaleuca armillaris* contra *Staphylococcus aureus* sensível e resistente à meticilina. **Frontiers in Nanotechnology** , v. 6, p. 1476423, 2024.

JIANG, Jhih-Hang *et al.* Nanopartículas carregadas com daptomicina facilitam a eliminação sinérgica de *Staphylococcus aureus* resistente à meticilina por meio de interações mediadas por lipídios e direcionamento. **The Journal of Infectious Diseases** , v. 233, n. 1, p. e22-e33, 2026.

KÖBER, Mariana *et al.* Nanovesículas de quatsome como plataforma antibacteriana: insights mecanísticos sobre sua atividade contra *Staphylococcus aureus* planctônico e em biofilme. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces** , p. 115932, 2026.

LI, Haonan *et al.* A macrophage-mimetic nanocarrier co-loaded with geraniol and FK13-a1 for MRSA-induced acute lung injury. **Drug Delivery**, v. 33, n. 1, p. 2626104, 2026.

LI, Guowei *et al.* Enhanced bacterial-infected wound healing by nitric oxide-releasing topological supramolecular nanocarriers with self-optimized cooperative multi-point anchoring. **Advanced Science**, v. 10, n. 11, p. 2206959, 2023.

MERGHNI, Abderrahmen *et al.* Atividade citotóxica e eficácia antibiofilme de nanopartículas de prata biossintetizadas contra cepas de *Staphylococcus aureus* resistentes à meticilina colonizando telefones celulares. **Canadian Journal of Infectious Diseases and Medical Microbiology** , v. 2022, n. 1, p. 9410024, 2022.

MOHAMED, Manar Bahaa El Din *et al.* Cefotax-magnetic nanoparticles as an alternative approach to control Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) from different sources. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 624, 2022.

PINTO, Rita M. *et al.* Non disseminative nano-strategy against in vivo *Staphylococcus aureus* biofilms. **npj Biofilms and Microbiomes**, v. 9, n. 1, p. 39, 2023.

SHEN, Jingyi *et al.* Near-infrared laser-assisted Ag@ Chi-PB nanocompounds for synergistically eradicating multidrug-resistant bacteria and promoting diabetic abscess healing. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 173, p. 116311, 2024.

TSIKOPOULOS, Konstantinos *et al.* O revestimento polimérico carregado com nanomateriais e vancomicina é eficaz na prevenção do crescimento de *Staphylococcus aureus* resistente à meticilina em discos de titânio? Um estudo in vitro. **International Orthopaedics** , v. 47, n. 6, p. 1415-1422, 2023.