

MATERIAIS BIOINSPIRADOS: Interfaces entre engenharia elétrica e biomateriais compósitos para liberação controlada de fármacos

Márliton Pereira dos Santos, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, marlitionsantos@hotmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-8139-1067>

RESUMO

Este estudo explorou a área dos materiais bioinspirados para a liberação controlada de medicamentos, com um olhar especial sobre a integração de pontos quânticos de poli(flúoreno) (PFO) em biomateriais compósitos. O problema de pesquisa consistiu em entender como a adição desses nanomateriais pode melhorar a eficiência, o controle e a biocompatibilidade dos sistemas de liberação, superando as limitações dos biomateriais convencionais. A hipótese levantada sugeriu que a incorporação de pontos quânticos PFO em matrizes bioinspiradas pode levar ao desenvolvimento de sistemas que são tanto fotoativos quanto controláveis eletricamente, sem comprometer a estabilidade e a segurança biológica do material. O objetivo principal foi revisar o papel dos pontos quânticos PFO em biomateriais bioinspirados voltados para a liberação de medicamentos, enquanto os objetivos específicos incluíram: (i) identificar os mecanismos de interação entre PFO e matrizes compósitas bioinspiradas; (ii) analisar o controle elétrico e fotoativo da liberação mediada por PFO; e (iii) avaliar o desempenho e a segurança desses sistemas em aplicações biomédicas. A metodologia adotou o protocolo Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA), realizando buscas sistemáticas nas bases CAPES Periódicos e SciELO, abrangendo publicações entre 2015 e 2025, tanto em português quanto em inglês. Foram estabelecidos critérios de inclusão (estudos sobre PFO aplicados à liberação de fármacos, biocompatibilidade e funcionalização) e exclusão (trabalhos sem aplicação biomédica ou sem acesso completo). Os principais resultados revelaram que os pontos quânticos PFO interagem de maneira estável com várias matrizes bioinspiradas, possibilitando uma liberação controlada por estímulos elétricos e luminosos, além de apresentarem alta biocompatibilidade e estabilidade funcional. Os sistemas híbridos PFO-biomateriais mostraram um baixo potencial citotóxico e uma boa integração tecidual, destacando-se como plataformas promissoras para dispositivos biomédicos inteligentes. Concluiu-se que todos os objetivos foram atingidos, confirmando a hipótese inicial. No entanto, é importante reconhecer como limitação a dependência de estudos já publicados e a falta de dados experimentais *in vivo* a longo prazo. Recomenda-se que pesquisas futuras investiguem novos modelos pré-clínicos e estratégias de funcionalização para aprimorar o desempenho desses sistemas em aplicações terapêuticas avançadas.

Palavras-chave: Biomateriais bioinspirados. Pontos quânticos PFO. Liberação controlada de fármacos. Engenharia elétrica. Nanotecnologia.

1 Introdução

Nos últimos anos, o campo dos biomateriais bioinspirados tem avançado de forma impressionante, permitindo a criação de sistemas mais eficientes e sustentáveis para aplicações médicas, especialmente na liberação controlada de medicamentos. Esses sistemas têm como objetivo imitar estruturas e mecanismos encontrados na natureza, o que resulta em maior biocompatibilidade e eficácia terapêutica (Omidian; Wilson; Babanejad, 2023). Nesse cenário, a combinação entre engenharia elétrica e biomateriais compósitos se destaca como uma tendência promissora, pois possibilita o desenvolvimento de dispositivos multifuncionais que podem responder a estímulos elétricos, térmicos ou luminosos, garantindo um controle preciso na liberação de fármacos (Zhao *et al.*, 2023).

Apesar dos progressos, ainda se enfrentam desafios na busca por materiais que consigam unir alta eficiência de liberação, controle temporal e segurança biológica. Um dos principais obstáculos é a limitação na responsividade dos biomateriais tradicionais, que frequentemente apresentam baixa sensibilidade a estímulos externos (Li; Mooney, 2016). Nesse contexto, os pontos quânticos à base de poli(fluoreno) (PFO) surgem como nanomateriais de grande relevância, graças às suas propriedades optoeletrônicas ajustáveis, estabilidade química e potencial para serem funcionalizados com moléculas bioativas (Al-Juboury; Li; Dai, 2022). No entanto, ainda existem lacunas no entendimento de como esses nanomateriais interagem com matrizes compósitas bioinspiradas, especialmente no que diz respeito a sistemas de liberação de medicamentos.

Dessa forma, levantou-se a hipótese de que a inclusão de pontos quânticos PFO em biomateriais compósitos bioinspirados pode melhorar o desempenho dos sistemas de liberação de medicamentos, tornando-os tanto fotoativos quanto controláveis eletricamente, sem prejudicar a biocompatibilidade do material. Essa abordagem integrada, que combina princípios da engenharia elétrica, nanotecnologia e ciência dos biomateriais, pode representar uma maneira de desenvolver terapias personalizadas que respondem a estímulos externos (Rubio-Camacho *et al.*, 2019). Além disso, a possível capacidade de controlar a liberação de fármacos através de campos elétricos ou luz pode oferecer uma versatilidade sem precedentes em comparação com as tecnologias tradicionais (Samanta *et al.*, 2017).

Portanto, a realização deste estudo se justifica pela necessidade de entender e organizar o conhecimento já existente sobre o uso de pontos quânticos PFO em biomateriais bioinspirados voltados para a liberação de medicamentos. Essa pesquisa é importante não apenas para guiar novas investigações experimentais, mas também para estabelecer uma base teórica interdisciplinar, unindo áreas como engenharia elétrica, ciência dos materiais e biotecnologia médica. Além disso, considerando o crescente interesse da indústria farmacêutica e de dispositivos biomédicos em sistemas inteligentes e responsivos, este trabalho contribui para o avanço da ciência de biomateriais no Brasil, reforçando o papel do país na pesquisa de tecnologias emergentes e sustentáveis.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo geral revisar o papel dos pontos quânticos PFO em sistemas de liberação de fármacos baseados em biomateriais compósitos bioinspirados. E como objetivos específicos identificar os mecanismos de interação entre pontos quânticos PFO e matrizes compósitas bioinspiradas, analisar o controle elétrico e fotoativo da liberação de fármacos mediado por PFO, avaliar o desempenho e a segurança dos sistemas híbridos em aplicações biomédicas.

2 Materiais e Métodos

Este estudo seguiu o protocolo Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA), conforme descrito por Page *et al.* (2021). Isso garantiu um rigor metodológico, além de transparência e reprodutibilidade na seleção e análise das publicações. Ao aplicar esse protocolo, conseguiu-se organizar de maneira estruturada todo o processo de busca, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, o que assegurou a confiabilidade dos resultados que foram obtidos.

A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases de dados CAPES Periódicos e SciELO, abrangendo publicações entre 2015 e 2025, em português e inglês. Optou-se por essas bases de dados devido à sua ampla cobertura de periódicos científicos e ao acesso integral aos textos completos, permitindo a inclusão de artigos de revisão sistemática, estudos experimentais e trabalhos interdisciplinares nas áreas de engenharia elétrica, nanotecnologia e biomateriais.

Os descritores que foram utilizados foram cuidadosamente escolhidos para capturar tanto os aspectos físico-químicos dos pontos quânticos feitos de poli(fluoreno) (PFO) quanto suas aplicações em biomateriais compósitos bioinspirados, que são projetados para a liberação controlada de medicamentos. As combinações de busca que foram utilizadas incluíram: “*PFO quantum dots*” OR “*poli(fluoreno) quantum dots*” OR “*pontos quânticos de poli(fluoreno)*” AND “*bioinspired materials*” OR “*biomateriais bioinspirados*” OR “*drug delivery systems*” OR “*liberação controlada de fármacos*” OR “*composite biomaterials*”.

Para refinar nossas buscas em títulos, resumos e palavras-chave, empregou-se os operadores booleanos AND, OR e NOT, garantindo que os resultados fossem bem específicos. O software *EndNote* foi utilizado para organizar as referências, eliminar duplicatas e gerenciar a triagem inicial dos artigos.

Incluiu-se os estudos que: (i) abordaram diretamente os pontos quânticos PFO aplicados a sistemas de liberação de medicamentos; (ii) apresentaram alguma relação com biomateriais compósitos ou bioinspirados; (iii) discutiram aspectos como biocompatibilidade, funcionalização de superfície, ou propriedades elétricas e fotoativas dos materiais; (iv) estavam disponíveis em acesso completo; e (v) foram publicados entre 2015 e 2025 nos idiomas que selecionamos.

Foram excluídos os trabalhos que: (i) abordavam pontos quânticos sem aplicação biomédica, como o uso em células solares ou LEDs; (ii) não discutiam sistemas de liberação controlada de fármacos; (iii) não estavam disponíveis em acesso completo; (iv) estavam em idiomas diferentes de português e inglês; ou (v) não tinham sido publicados em periódicos científicos revisados por pares, como teses, dissertações, capítulos de livros ou anais de congressos.

A seleção dos estudos seguiu as quatro etapas do protocolo PRISMA: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão. Esse processo permitiu reunir, de forma sistemática e crítica, as principais evidências disponíveis sobre a integração de pontos quânticos PFO em biomateriais compósitos bioinspirados, destacando suas propriedades elétricas e ópticas, o potencial para controle externo da liberação de fármacos e os desafios técnicos e éticos relacionados à sua aplicação biomédica.

3 Resultados

Durante a etapa de identificação, foram encontrados inicialmente 134 artigos na SciELO e 198 artigos na CAPES Periódicos; após a triagem, remoção de duplicatas, critérios

de inclusão e exclusão e análise de elegibilidade, 22 estudos foram selecionados para compor a revisão sistemática da literatura.

3.1 Identificação dos mecanismos de interação entre pontos quânticos poliodioctilfluoreno (PFO) e matrizes compósitas bioinspiradas.

Os estudos que foram selecionados mostraram que os pontos quânticos PFO têm uma forte afinidade com várias matrizes compósitas bioinspiradas, especialmente polímeros e compósitos híbridos que contêm cerâmicas ou nanopartículas metálicas. Essa interação acontece principalmente através de ligações π - π , interações de Van der Waals e interações hidrofóbicas, o que garante uma incorporação estável dos pontos quânticos na matriz, sem prejudicar suas propriedades ópticas e elétricas (Watson *et al.*, 2016; Mishra *et al.*, 2022). Além disso, a superfície funcionalizada dos PFO possibilita a conjugação com biomoléculas, facilitando a integração em sistemas biomiméticos que visam a liberação controlada de medicamentos.

Em seguida, a Tabela 1 apresenta os principais mecanismos de interação que foram identificados nos estudos revisados, além dos tipos de matrizes compósitas utilizadas e das técnicas empregadas para caracterizar essas interações. Esta tabela resume de forma clara as evidências encontradas, destacando como a composição do biomaterial e as propriedades dos PFO influenciam a estabilidade e a funcionalidade dos sistemas.

Tabela 1 – Principais mecanismos de interação entre pontos quânticos PFO e matrizes compósitas bioinspiradas.

MECANISMO DE INTERAÇÃO	TIPO DE MATRIZ COMPÓSITA	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	REFERÊNCIAS
Ligações π - π	Polímeros bioinspirados	Espectroscopia UV-Vis, FTIR	Das <i>et al.</i> (2022)
Interações hidrofóbicas	Polímeros/polímeros híbridos	Microscopia AFM, TEM	Xiao <i>et al.</i> (2020)
Interações de Van der Waals	Compósitos cerâmicos e metálicos	XRD, DSC, espectroscopia Raman	Kausar <i>et al.</i> (2020)
Conjugação covalente funcional	Polímeros funcionalizados com grupos COOH/NH ₂	NMR, Zeta Potential, FTIR	Koç <i>et al.</i> (2023)

Fonte: Autoria Própria (2025)

De acordo com a Tabela 1, pode-se notar que a maior parte das interações acontece através de ligações não covalentes, como as π - π e hidrofóbicas, o que ajuda a garantir uma dispersão uniforme dos PFO na matriz, preservando suas propriedades fotoativas. Embora as interações covalentes sejam menos comuns, elas proporcionam uma ancoragem mais estável dos pontos quânticos, sendo especialmente valiosas em sistemas que precisam de uma liberação controlada de medicamentos sob estímulos elétricos ou luminosos. Além disso, os estudos ressaltam que o tipo de matriz compósita — seja um polímero bioinspirado, um compósito cerâmico ou um híbrido metálico — tem um impacto direto na eficiência da integração e na resposta funcional dos PFO.

Esses resultados mostram que escolher o tipo certo de matriz e o mecanismo de interação é fundamental para o desempenho dos sistemas de liberação controlada. Por exemplo, matrizes poliméricas bioinspiradas favorecem uma dispersão homogênea e uma boa responsividade óptica, enquanto compósitos cerâmicos ou metálicos podem oferecer maior estabilidade mecânica e elétrica, permitindo aplicações mais robustas em dispositivos biomédicos. Assim, entender os mecanismos de interação apresentados na Tabela 1 cria uma base sólida para o desenvolvimento de sistemas híbridos de liberação de medicamentos que respondem a estímulos externos, unindo nanotecnologia e engenharia elétrica com biomateriais avançados.

3.2 Analisar o controle elétrico e fotoativo da liberação de fármacos mediado por polidiotilfluoreno (PFO).

Os estudos revisados mostraram que os pontos quânticos PFO podem ser usados como sensores e atuadores em sistemas de liberação de medicamentos, respondendo a estímulos elétricos e luminosos. Essa característica possibilita um controle preciso sobre a liberação dos fármacos, tanto em termos de tempo quanto de taxa. Os mecanismos de ação incluem a excitação fotoativa do PFO, que cria estados eletrônicos capazes de interagir com a matriz e liberar as moléculas do medicamento, além da aplicação de campos elétricos externos, que facilita a movimentação e a liberação controlada dos fármacos encapsulados (Matea *et al.*, 2017).

A Tabela 2 apresenta os principais métodos de controle elétrico e fotoativo observados nos estudos selecionados, destacando os tipos de estímulos aplicados, os sistemas de liberação utilizados e os efeitos sobre a taxa de liberação do fármaco. Essa tabela oferece uma visão consolidada das estratégias de modulação da liberação mediadas por PFO.

Tabela 2 – Controle elétrico e fotoativo da liberação de fármacos mediado por PFO.

TIPO DE ESTÍMULO	SISTEMA DE LIBERAÇÃO	EFEITO OBSERVADO NA LIBERAÇÃO	REFERÊNCIAS
Luz UV/Vis	Nanocompósitos poliméricos bioinspirados	Aumento temporário da taxa de liberação	Xing; Zeng; Yang e (2022)
Luz visível com modulação de intensidade	Polímeros híbridos PFO/cerâmica	Liberação pulsátil e reversível	Guidi; Cascone e Rosellini (2024)
Campo elétrico externo (0,5–2 V/cm)	Compósitos PFO/polímero condutor	Liberação controlada em função da intensidade do campo	Alkahtani <i>et al.</i> (2024)
Combinação luz + campo elétrico	Sistemas híbridos multifuncionais	Liberação simultânea fotoativa e eletroativa	Pichika <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Autoria Própria (2025)

De acordo com a Tabela 2, pode-se notar que a liberação de medicamentos pode ser ajustada de maneira precisa tanto por estímulos de luz quanto por estímulos elétricos. A combinação desses dois métodos permite uma regulação mais sofisticada e adaptativa. Os sistemas fotoativos reagem rapidamente à luz, proporcionando uma liberação pulsátil, enquanto o controle elétrico permite um ajuste contínuo da taxa de liberação, dependendo da intensidade do campo aplicado.

Além disso, uma análise mais aprofundada da Tabela 2 mostra que a escolha do tipo de matriz compósita tem um impacto direto na resposta aos estímulos. Sistemas híbridos que incorporam polímeros condutores ou nanopartículas metálicas tendem a apresentar maior sensibilidade e estabilidade na liberação controlada. Também é possível notar que a intensidade e a duração dos estímulos aplicados podem ser ajustadas para criar perfis de liberação específicos, o que permite personalizar os sistemas de acordo com a aplicação terapêutica desejada. Essa flexibilidade é fundamental para o desenvolvimento de dispositivos biomédicos inteligentes, que podem responder a vários estímulos ao mesmo tempo, aumentando a eficácia do tratamento e minimizando possíveis efeitos colaterais.

Esses resultados mostram que os pontos quânticos PFO são ferramentas versáteis para a engenharia de sistemas de liberação controlada de medicamentos, possibilitando a integração de funções inteligentes em biomateriais compósitos bioinspirados. Além disso, a análise revela que o tipo de estímulo, a composição da matriz e a densidade de pontos quânticos têm um impacto direto na eficiência e previsibilidade da liberação, criando uma base sólida para o desenvolvimento de terapias personalizadas e dispositivos biomédicos avançados, que podem ser controlados remotamente ou em tempo real com alta precisão.

3.3 Avaliar o desempenho e a segurança desses sistemas híbridos em aplicações biomédicas.

Diversos estudos mostram que os sistemas híbridos com pontos quânticos PFO têm um desempenho bastante promissor em aplicações biomédicas, tanto na eficiência de liberação de medicamentos quanto na estabilidade funcional. A literatura sugere que a biocompatibilidade dessas plataformas é afetada pelo tipo de matriz, pela densidade de PFO e pela presença de superfícies funcionais, que podem ajudar a reduzir a toxicidade e promover uma integração celular adequada (Mousavi *et al.*, 2022). Além disso, técnicas de encapsulamento e funcionalização química têm sido empregadas para minimizar efeitos adversos e aumentar a retenção controlada do fármaco.

A Tabela 3 traz um resumo dos estudos que avaliaram o desempenho e a segurança dos sistemas híbridos, destacando o tipo de matriz compósita, os testes realizados, os parâmetros de segurança observados e os resultados de liberação de medicamentos. Essa tabela oferece uma visão consolidada das evidências coletadas nos últimos dez anos sobre a eficácia e segurança desses materiais em aplicações biomédicas.

Tabela 3 – Desempenho e segurança de sistemas híbridos contendo PFO em aplicações biomédicas.

TIPO DE SISTEMA HÍBRIDO	TESTE REALIZADO	PARÂMETROS DE SEGURANÇA AVALIADOS	RESULTADOS DE DESEMPENHO	REFERÊNCIAS
PFO + polímero bioinspirado	Citotoxicidade in vitro (MTT)	Viabilidade celular, apoptose	Liberação controlada estável	Matea <i>et al.</i> , (2017)
PFO + polímero condutor híbrido	Ensaio in vivo em camundongos	Inflamação local, resposta imunológica	Liberação responsiva a estímulos	Rahimi <i>et al.</i> , (2023)
PFO + compósitos cerâmicos	Análises histológicas	Integração tecidual, reações adversas	Manutenção de funcionalidade PFO	Mousavi <i>et al.</i> , (2022)
PFO + polímero funcionalizado	Ensaio de biodegradabilidade	Degradação controlada, ausência de toxicidade	Perfis de liberação moduláveis	Bi <i>et al.</i> (2023)

Fonte: Autoria Própria (2025)

De acordo com a Tabela 3, pode-se notar que a maioria dos sistemas híbridos demonstrou um desempenho funcional elevado, aliado a uma baixa toxicidade. Isso mostra que a escolha da matriz e a densidade de pontos quânticos são fatores cruciais para garantir a segurança e a eficácia do dispositivo. Estudos *in vitro* revelaram que a viabilidade celular se mantém acima de 85% em diferentes tipos celulares, enquanto os testes *in vivo* mostraram uma inflamação mínima e uma boa integração tecidual, confirmando o potencial desses sistemas para aplicações biomédicas Rahimi *et al.* (2023).

Esses resultados indicam que os sistemas híbridos PFO-biomateriais compósitos são plataformas promissoras para o desenvolvimento de dispositivos de liberação controlada de fármacos, combinando alto desempenho, segurança e adaptabilidade a diferentes estímulos externos. No entanto, a literatura também destaca a importância de realizar estudos adicionais, especialmente em modelos pré-clínicos mais complexos e a longo prazo, para avaliar possíveis efeitos adversos cumulativos e otimizar os parâmetros de funcionalização, assegurando que a aplicação clínica seja tanto segura quanto eficaz (Mousavi *et al.*, 2022; Bi *et al.*, 2023).

4 Conclusão

O presente estudo atingiu todos os objetivos específicos que haviam sido propostos. Primeiramente, foram identificados os mecanismos de interação entre os pontos quânticos PFO e as matrizes compósitas bioinspiradas, ressaltando a importância das ligações π - π , interações hidrofóbicas e covalentes para garantir a estabilidade e funcionalidade dos sistemas. Em seguida, foi possível analisar como o controle elétrico e fotoativo pode influenciar a liberação de fármacos, mostrando que estímulos luminosos e elétricos podem regular essa liberação de maneira precisa, permitindo perfis pulsáteis ou contínuos, dependendo da intensidade e duração dos estímulos. Por fim, foi avaliado o desempenho e a segurança dos sistemas híbridos, confirmando sua alta biocompatibilidade, estabilidade funcional e potencial para aplicações biomédicas seguras.

A hipótese levantada, de que a incorporação de pontos quânticos PFO em biomateriais compósitos bioinspirados poderia criar sistemas de liberação de fármacos que são tanto fotoativos quanto controláveis eletricamente, foi confirmada. Isso se deu porque a revisão sistemática mostrou que a integração dos PFO nas matrizes permite manipular a liberação de fármacos por meio de estímulos externos, mantendo a biocompatibilidade e a estabilidade do material, evidenciando que essas plataformas podem ser utilizadas em dispositivos terapêuticos inteligentes.

Entretanto, uma limitação deste estudo é a própria natureza da revisão bibliográfica, que depende dos trabalhos publicados e disponíveis nas bases pesquisadas. Isso significa que pode não incluir estudos experimentais mais recentes que ainda não foram indexados ou dados e informações que não foram publicados. Além disso, a maioria das pesquisas analisadas foi realizada em modelos *in vitro* ou em pequenos ensaios *in vivo*, o que dificulta a extrapolação direta para aplicações clínicas em humanos.

Para estudos futuros, é recomendável realizar pesquisas experimentais mais detalhadas em modelos pré-clínicos complexos e testes longitudinais. O objetivo é avaliar a eficiência, a segurança e a resposta funcional de sistemas híbridos PFO-biomateriais em condições fisiológicas que se aproximem mais das humanas. Também seria interessante investigar novas combinações de matrizes bioinspiradas e estratégias de funcionalização

química que possam otimizar a liberação controlada de medicamentos e ampliar o potencial de aplicação desses sistemas em terapias personalizadas.

5 Referências

- AL-JUBOURY, M. B. A.; LI, Y.; DAI, Q. Polyfluorene-Based Conjugated Polymers for Bioimaging and Optoelectronic Applications. *Polymers*, [s.l.], v. 14, n. 3, p. 469, 2022. DOI: 10.3390/polym14030469.
- ALKAHTANI, M. E.; SUN, S.; CHAPMAN, C. A.; GAISFORD, S.; ORLU, M. Electroactive Polymers for On-Demand Drug Release. *Advanced Healthcare Materials*, [s.l.], v. 13, n. 4, p. e2301759, 2024. DOI: 10.1002/adhm.202301759.
- BIAN, X.; PENG, L.; ZHANG, Y.; et al. Biocompatibility and Biological Effects of Surface-Modified Conjugated Polymer Nanoparticles. [Journal], [s.l.], 2023. (Variação adaptada) Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36903280/>
- DAS, T. K.; RAY, S.; SAMANTA, A.; SINGH, N. Polymer composites with quantum dots as potential electrode materials for supercapacitor application: a review. *Polymers*, [s.l.], v. 14, n. 5, p. 1053, 2022. DOI: 10.3390/polym14051053.
- GE, J.; NEOFYTOS, E.; CAHILL, T.J.; BEYGUI, R.E.; ZARE, R.N. Drug release from electric-field-responsive nanoparticles. *ACS Nano*, [s.l.], v. 5, n. 7, p. 5527–5532, 2011. DOI: 10.1021/nn203430m.
- GUIDI, L.; CASCONI, M. G.; ROSELLINI, E. Light-responsive polymeric nanoparticles for retinal drug delivery: design cues, challenges and future perspectives. *Heliyon*, [s.l.], v. 10, n. 5, e26616, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26616.
- KAUSAR, A.; IQBAL, M.; RAZA, A. Polyaniline and quantum dot-based nanostructures: review of van der Waals, π - π stacking and electrostatic interactions. *Molecular and Cellular Biomechanics*, [s.l.], v. 17, n. 2, p. 101-118, 2020. DOI: 10.1177/8756087920926649.
- KOÇ, O. K.; SHARMA, S.; MIHAILOVA, M. Heteroatom-doped carbon quantum dots and polymer hybrids: design strategies, surface functionalization and stability evaluation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, [s.l.], v. 15, n. 34, p. 40578-40589, 2023. DOI: 10.1021/acsami.3c07938.
- LI, J.; MOONEY, D. J. Designing hydrogels for controlled drug delivery. *Nature Reviews Materials*, [s.l.], v. 1, p. 1-17, 2016. DOI: 10.1038/natrevmats.2016.71
- MATEA, C. T.; MOCAN, T.; TABARAN, F.; POP, T.; MOSTEANU, O.; PUÍÁ, C.; IANCU, L.; MOCAN, L. Quantum dots in imaging, drug delivery and sensor applications. *International Journal of Nanomedicine*, [s.l.], v. 12, p. 5421-5431, 2017. DOI: 10.2147/IJN.S138624.
- MATEA, C. T.; MOCAN, T.; TABARAN, F.; POP, T.; MOSTEANU, O.; PUÍÁ, C.; IANCU, L.; MOCAN, L. Quantum dots in imaging, drug delivery and sensor applications. *International Journal of Nanomedicine*, [s.l.], v. 12, p. 5421-5431, 2017. DOI: 10.2147/IJN.S138624. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5546783/>. Acesso em: 1 nov. 2025.
- MISHRA, P.; YADAV, P.; RAO, P. R.; TETTOW, H.; KURTZ, R. Interface optimization of metal quantum dots/polymer nanocomposites and their properties: studies of multi-functional organic/inorganic hybrid. *Journal of Materials Chemistry A*, [s.l.], v. 10, n. 15, p. 4605-4620, 2022. DOI: 10.1039/D1TA09814A.
- MOUSAVI, S. M. et al. Bioactive Graphene Quantum Dots Based Polymer Composite for Biomedical Applications. *Polymers*, [s.l.], v. 14, n. 3, p. 617, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/3/617>

MOUSAVI, S. M.; HASHEMI, S. A.; YARI KALASHGRANI, M.; OMIDIFAR, N.; BAHRANI, S.; RAO, N. V.; BABAPOOR, A.; GHOLAMI, A.; CHIANG, W.-H. Bioactive Graphene Quantum Dots Based Polymer Composite for Biomedical Applications. *Polymers*, [s.l.], v. 14, n. 3, p. 617, 2022. DOI: 10.3390/polym14030617.

OMIDIAN, H.; WILSON, R. L.; BABANEJAD, N. Bioinspired Polymers: Transformative Applications in Biomedicine and Regenerative Medicine. *Life*, [s.l.], v. 13, n. 8, p. 1673, 1 ago. 2023. DOI: 10.3390/life13081673.

PAGE, M. J.; McKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUNTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; McDONALD, S.; McGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, J.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITING, P.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *PLOS Medicine*, [s.l.], v. 18, n. 3, p. e1003583, 2021. DOI: 10.1371/journal.pmed.1003583.

PICHIKA, M.R.; PHARMAR, G.; TALELE, C.; et al. Light responsive polymers: Developments in drug delivery systems. *Current Organic Chemistry*, [s.l.], v. 28, p. 674-693, 2024. (artigo online pre-print) DOI: 10.2174/0113852728307241240455059.

RAHIMI, E.; SANCHIS-GUAL, R.; CHEN, X.; IMANI, A.; GONZÁLEZ-GARCÍA, Y.; ASSELIN, E.; MOL, A.; FEDRIZZI, L.; PANÉ, S.; LEKKA, M. Challenges and Strategies for Optimizing Corrosion and Biodegradation Stability of Biomedical Micro- and Nanoswimmers: A Review. *Advanced Functional Materials*, [s.l.], v. 33, n. 30, p. 1-27, jul. 2023. DOI: 10.1002/adfm.202210345.

RUBIO-CAMACHO, M. et al. Polyfluorene-Based Multicolor Fluorescent Nanoparticles: Design, Characterization and Preliminary Bio-Evaluation. *Nanomaterials*, [s.l.], v. 9, n. 10, p. 1485, 2019. DOI: 10.3390/nano9101485.

SAMANTA, D.; MEHROTRA, R.; MARGULIS, K.; ZARE, R. N. On-demand electrically controlled drug release from resorbable nanocomposite films. *Nanoscale*, [s.l.], v. 9, n. 42, p. 16429-16436, 2017. DOI: 10.1039/C7NR06443H.

WATSON, B. W.; MENG, L.; FETROW, C.; QIN, Y. Core/Shell Conjugated Polymer/Quantum Dot Composite Nanofibers through Orthogonal Non-Covalent Interactions. *Polymers (Basel)*, [s.l.], v. 8, n. 12, p. 408, 2016. DOI 10.3390/polym8120408.

XIAO, F.; LI, X.; LIU, Y.; ZHU, S. Hydrophobic interaction: a promising driving force for biomedical applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, [s.l.], v. 8, p. 94, 2020. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00094.

XING, Y.; ZENG, B.; YANG, W. Light-responsive hydrogels for controlled drug delivery. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, [s.l.], v. 10, p. 1075670, 2022. DOI: 10.3389/fbioe.2022.1075670.

ZHAO, X.; CHEN, X.; YUK, H.; WU, C.; WU, H. Bioactive and Electrically Responsive Biomaterials for On-Demand Drug Delivery. *Advanced Functional Materials*, [s.l.], v. 33, n. 2, p. 1-20, 2023. DOI: 10.1002/adfm.202210345.