COMPÓSITOS HDL-QUITOSANA PARA A REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EM MATRIZES AQUOSAS: REVISÃO DA LITERATURA

Izabella Gabriel dos Santos, Victoria de Almeida Palagama, João Vitor dos Santos Soares, Sara Romão Gava, Damaris Guimarães.

Universidade Federal do Espírito Santo/Departamento de Engenharia Química, Alto Universitário, S/N, Guararema - 29500-000 - Alegre-ES, Brasil, izabellla2002@gmail.com, victoriaalmeidapalagama@gmail.com, joaovitordossantossoares92@gmail.com, sarargava19@gmail.com, damaris.guimaraes@ufes.br.

Resumo

A contaminação de corpos hídricos por efluentes industriais e urbanos representa um desafio ambiental, agravado pelo déficit de saneamento básico no Brasil. Este trabalho avaliou o desempenho de compósitos de Hidróxidos Duplos Lamelares (HDLs) e quitosana na remoção de poluentes em efluentes aquosos. Foi realizada uma revisão sistemática na base *Scopus*, abrangendo publicações de 2020 a 2026, com análise de 10 artigos originais. Os resultados demonstraram que a associação HDL –quitosana promove efeito sinérgico, aumentando a capacidade de adsorção em relação aos materiais isolados. A eficiência do processo é fortemente dependente do pH do meio, favorecendo a remoção de espécies aniônicas em condições ácidas e catiônicas em meios neutros ou básicos. Portanto, o compósito HDL-quitosana apresenta uma tecnologia avançada e versátil para o tratamento de águas residuárias, alinhando-se aos princípios da química verde, da economia circular e às metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 da ONU.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes; Hidrotalcita; Biopolímero; Adsorção.

Área do Conhecimento: Engenharias. Engenharia Química.

Introdução

Os efluentes industriais e urbanos representam uma das principais fontes de poluição ambiental, liberando contaminantes como metais pesados, corantes, herbicidas e nutrientes em excesso nos corpos hídricos. Esses compostos, ao atingirem rios, lagos e zonas costeiras são transportados por processos naturais como escoamento superficial e lixiviação, acumulando-se no ambiente aquático (Bouriqi, A.; Ouazzani, N.; Deliege, 2024). O resultado é o desequilíbrio ecológico, marcado pela eutrofização, pela competição entre espécies e pela alteração da absorção de radiação pela água. Os impactos são especialmente severos para organismos em fases iniciais de desenvolvimento, como larvas de peixes, que apresentam maior sensibilidade à redução do oxigênio dissolvido. Além disso, a presença de toxinas produzidas por cianobactérias e outros micro-organismos agrava os riscos à saúde humana, podendo causar efeitos gastrointestinais, hepáticos e neurológicos (Ribeiro *et al.*, 2023).

A necessidade de tecnologias eficientes para a remoção desses contaminantes é cada vez mais evidente, tanto para mitigar a poluição quanto para garantir a sustentabilidade da cadeia produtiva agrícola e industrial. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece limites máximos para nutrientes em águas doces, e a Resolução n° 430/2011 estabelece padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos, a fim de minimizar a poluição em matrizes aquosas (Brasil, 2005; Brasil, 2011). Métodos convencionais de tratamento, como precipitação química e sistemas biológicos, são amplamente utilizados, por serem eficientes e de baixo custo para o tratamento de diversos poluentes, embora enfrentem limitações de outras naturezas. Nesse contexto, a adsorção desponta como alternativa promissora, por sua seletividade e capacidade de atuar em baixas concentrações de poluentes (Pessanha *et al.*, 2025).

Os Hidróxidos Duplos Lamelares (HDL) destacam-se como materiais adsorventes de grande potencial. Sua estrutura lamelar, composta por cátions metálicos divalentes e trivalentes intercalados por ânions e moléculas de água, confere alta capacidade de troca aniônica e estabilidade química, tornando-os eficientes na captura de diferentes contaminantes, como herbicidas, metais pesados e

ânions inorgânicos (Golubev *et al.*, 2026; Bai *et al.*, 2025). A quitosana, por sua vez, é um biopolímero obtido da desacetilação da quitina, abundante em resíduos de crustáceos. Rica em grupos amino e hidroxila, apresenta elevada reatividade superficial e pode ser protonada em meio ácido, favorecendo a captura de espécies aniônicas. Além de atuar como adsorvente, a quitosana confere estabilidade mecânica e sustentabilidade ao compósito, alinhando-se aos princípios da química verde e da economia circular (Mahmoud *et al.*, 2026; Pessanha *et al.*, 2025).

Estudos recentes têm demonstrado que compósitos formados por Hidróxidos Duplos Lamelares (HDL) associados à quitosana apresentam desempenho superior na captura de poluentes. Essa sinergia ocorre porque os HDLs possuem elevada capacidade de troca aniônica, enquanto a quitosana, rica em grupos amino e hidroxila, pode ser protonada em meio ácido, favorecendo interações eletrostáticas com ânions oxigenados (Golubev *et al*., 2026).

A literatura evidencia que diferentes combinações de HDL com quitosana são eficazes na remoção de contaminantes variados. Compósitos de Mg-Fe HDL com quitosana mostraram alta capacidade de adsorção de Cr(VI), com cinética ajustada ao modelo de pseudossegunda ordem (Golubev *et al*., 2026). Materiais derivados de fosfogesso, como CaAl-HDL associado à quitosana, atingiram remoção superior a 99% de Pb^{2+} em efluentes de petróleo e gás, destacando a seletividade e a estabilidade estrutural (Bai *et al*., 2025). Nanobiocompósitos de calcita mesoporosa, quitosana e CaAl-HDL alcançaram eficiência de 97,4% na remoção de CdS-QDs, com boa capacidade de regeneração (Mahmoud *et al*., 2026). Já compósitos de Mg-Al-HDL com quitosana demonstraram efeito sinérgico na remoção de sulfato, com capacidade máxima de adsorção de 234,5 mg/L (Pessanha *et al*., 2025).

Esses resultados reforçam que a combinação entre HDLs e quitosana potencializa a estabilidade mecânica, a área superficial e a eficiência de captura de poluentes, além de alinhar-se aos princípios da química verde e da economia circular. A utilização de resíduos de crustáceos como fonte de quitosana, por exemplo, transforma um subproduto da indústria pesqueira em insumo tecnológico de baixo custo e elevado valor ambiental (Ribeiro *et al.*, 2023).

Sendo assim, este trabalho avaliou o desempenho de compósitos de HDL e quitosana na remoção de contaminantes em matrizes aquosas em efluentes aquosos, investigando os mecanismos de adsorção e as condições operacionais que potencializam sua eficiência. O objetivo foi contribuir com dados relevantes para futuros estudos na área de materiais híbridos aplicados ao tratamento de águas residuárias e à recuperação sustentável de nutrientes.

Metodologia

O levantamento bibliográfico foi realizado por meio da base de dados *Scopus*, amplamente reconhecida por sua abrangência e credibilidade científica. A consulta foi executada em agosto de 2026, com o uso de descritores em língua inglesa, visando contemplar a produção científica global sobre o tema.

A estratégia de busca consistiu na intersecção de termos nos campos de título, resumo e palavras-chave (*TITLE-ABS-KEY*), estruturada da seguinte forma: *TITLE-ABS-KEY (("layered double hydroxide*" OR "ldh" OR "hydrotalcite*")) AND TITLE-ABS-KEY ("adsorp*") AND TITLE-ABS-KEY ("chitosan") AND PUBYEAR > 2020.*

O recorte temporal abrangeu publicações de 2020 a agosto de 2026, resultando na identificação de 112 documentos. Como critério, estabeleceu-se a seleção exclusiva de artigos originais de pesquisa que abordassem o uso de compósitos de hidróxidos duplos lamelares (HDLs) com quitosana para adsorção. Após a leitura crítica dos títulos e resumos, aplicaram-se os seguintes critérios de exclusão: (i) artigos de revisão e outras tipologias de documentos; e (ii) trabalhos que não apresentavam dados aprofundados sobre parâmetros fundamentais dos materiais adsorventes, como área superficial, influência do pH e capacidade máxima de adsorção.

A análise dos trabalhos finais selecionados buscou identificar os principais fatores relacionados à temática, considerando os objetivos delineados, as metodologias aplicadas e os resultados obtidos. Todas as evidências relevantes foram examinadas, organizadas e discutidas criticamente, com o intuito de proporcionar maior clareza, compreensão e embasamento científico na avaliação de desempenho desses compósitos para a remoção de contaminantes.

Resultados

Grande parte da população brasileira carece de acesso à coleta de esgoto, um cenário que compromete severamente a qualidade da água e eleva os riscos de contaminação. Segundo o Instituto Trata Brasil (2026), cerca de 43,3% dos domicílios no país permaneceram sem esse serviço no ano de 2024. Para reverter esse quadro em escala global, a Organização das Nações Unidas (ONU), por meio do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 (metas 6.1 e 6.3), estabeleceu como prioridade até 2030 a universalização do acesso à água potável e a redução pela metade da proporção de águas residuais não tratadas.

Essa urgência ambiental impulsiona o desenvolvimento de tecnologias avançadas para o tratamento de efluentes, sendo assim, foram selecionados 10 artigos para discussão que abordam os compósitos formados por Hidróxidos Duplos Lamelares (HDLs) e quitosana, respeitando os critérios de exclusão tratados na metodologia (Tabela 1), esses compósitos despontam como uma alternativa promissora. Além de promoverem a valorização de resíduos agroindustriais (Neto, 2018), esses materiais apresentam alta eficiência na remoção de variados contaminantes.

Tabela 1 – Características, condições operacionais e desempenho dos compósitos HDLs-quitosana na adsorção de contaminantes.

Autor e Ano	Contaminante removido	Material Base (HDL / Compósito)	Área Superficial (m^2/g)	pH Ótimo	Capacidade Adsortiva
Abdelwahab *et al*. (2026)	Cristal Violeta (CV)	Zn-Fe / Quitosana	63,0	5,0	477,0 ± 9,0 mg/g
Mahmoud *et al*. (2026)	Pontos Quânticos de Sulfeto de Cádmio (CdS-QDs)	HMC@CH@CaAl-HDL	18,78	7,0	24,34 (para 50 mg/L) 44,07 (para 100 mg/L)
Golubev *et al*. (2026)	Cromo Hexavalente (Cr(VI))	Quitosana / Mg-Fe HDL	N/D	N/D	137,4 mg/g
Pessanha *et al*. (2025)	Sulfato (SO_4^{2-})	$Mg_6Al_2(CO_3)(OH)_{16}{\cdot}4H_2O$ HDL / Quitosana de resíduos de pesca	N/D	7,0 (faixa pH < 8)	234,15 mg/g (exp) 115,00 mg/g (qm, Langmuir)
Bai *et al*. (2025)	Chumbo (Pb^{2+})	CaAl-HDL / Quitosana	N/D	5,0	827,9 ± 9,6 mg/g (exp) 859,7 mg/g (qm)
Ben Hamadi *et al*. (2025)	Paraquate (PQ^{2+})	AlPd-HDL / Quitosana-Polietilenimina (CS-PEI)	57,54	8,0	409,6 mg/g
Bansal e Pal (2025)	Nitrato (NO_3^-) e Nitrito (NO_2^-)	Mg-Al HDL / Esferas de Quitosana (CS@LDH)	84,62	4,0	2026,7 mg/g para NO_3^- 1086,8 mg/g para NO_2^-
AlSalem *et al*. (2024)	Chumbo (Pb^{2+})	AlNi-HDL / Quitosana e Ácido Itacônico	71,95	5,0	453,05 mg/g

Autor e Ano	Contaminante removido	Material Base / (HDL Compósito)	Área Superficial (m^2/g)	pH Ótimo	Capacidade Adsortiva
Grover *et al*. (2024)	Ftalatos (DOP, DBP, DEP)	CS-Ni/Fe HDL (Quitosana intercalada)	N/D	3,0 - 10,0	DOP: 279,45 mg/g DBP: 275,12 mg/g DEP: 254,99 mg/g
Ribeiro *et al*. (2023)	Fosfato (PO_4^{3-})	Mg-Al-CO_3 HDL / Quitosana	28,47 (antes) 81,70 (depois)	5,0	120,8 mg/g (exp) 106,35 mg/g (qm)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base nos dados apresentados, evidencia-se que os compósitos de HDL associados à quitosana possuem um excelente desempenho na remoção de um amplo espectro de contaminantes (corantes, metais pesados, fosfatos, nitratos, nitritos e ftalatos). Essa versatilidade confirma o potencial do material como tecnologia avançada para o tratamento de efluentes.

Discussão

A elevada parcela da população brasileira sem acesso à coleta de esgoto evidencia uma problemática estrutural que compromete a qualidade dos recursos hídricos (Instituto Trata Brasil, 2026). Nesse contexto, os resultados apresentados nas tabelas e gráficos indicam que os compósitos de HDL–quitosana apresentam potencial como alternativa complementar para a remoção de contaminantes.

A associação entre HDL e quitosana mostrou-se mais eficiente do que a utilização dos materiais isoladamente. Enquanto Pessanha *et al*. (2025), Ribeiro *et al*. (2023) e Golubev *et al*. (2026) observaram capacidades de adsorção menores e instáveis para os componentes individuais dos compósitos, a combinação entre eles promoveu efeito sinérgico que resultou no aumento da remoção. Esse desempenho está relacionado às características estruturais do HDL e à presença de grupos funcionais da quitosana. Em concordância, Abdelwahab *et al*. (2026) obtiveram elevada capacidade de adsorção de cristal violeta (477,0 mg/g), associada à formação de *nanosheets* e à elevada área superficial do material.

Além da composição e da estrutura, o pH mostrou-se determinante para o processo de adsorção, pois influencia a protonação dos grupos funcionais e a forma química dos contaminantes (Abdelwahab *et al*., 2026; AlSalem *et al*., 2024). Para espécies aniônicas, como fosfato, sulfato, nitrato e nitrito, a remoção foi favorecida em meio ácido, abaixo do ponto de carga zero (pH_{pcz}), devido à maior atração entre a superfície positiva do compósito e os ânions. Ribeiro *et al*. (2023), por exemplo, obtiveram pH_{pcz} de 6,5 e maior remoção de fosfato em pH 5. Em contrapartida, para contaminantes catiônicos, condições neutras ou básicas favoreceram a adsorção. Ben Hamadi *et al*. (2025) observaram esse comportamento na remoção de paraquat (PQ^{2+}), utilizando um compósito com pH_{pcz} de 5,21 e maior eficiência em pH 8,0.

Esses resultados podem ser explicados pela atuação conjunta de diferentes mecanismos na interface sólido-líquido, incluindo troca iônica, ligações de hidrogênio, complexação e interações com os grupos funcionais do material (Pessanha *et al*., 2025). Assim, a combinação da estrutura lamelar dos HDLs com a quitosana, um biopolímero de origem renovável, contribui para a obtenção de materiais com elevada capacidade de adsorção e potencial de aplicação no tratamento de efluentes (Ribeiro *et al.,* 2023; Neto, 2018; Zhang *et al*., 2024).

Assim, os resultados reforçam o potencial do sistema HDL-quitosana como uma tecnologia complementar para a remoção de poluentes em regiões onde o saneamento básico ainda não alcança toda a população (Instituto Trata Brasil, 2026). Essa abordagem tecnológica contribui de forma direta para as metas do ODS 6 ao promover a economia circular por meio do reaproveitamento da quitosana obtida de resíduos de pesca (Pessanha *et al*., 2025) e mitigar o impacto de contaminantes persistentes,

como os metais pesados, que geram graves prejuízos à saúde humana (AlSalem *et al*., 2024; Bai *et al*., 2025).

Conclusão

Com base nos resultados apresentados e discutidos, os compósitos de HDL–quitosana constituem uma estratégia tecnológica promissora e sustentável para o tratamento de efluentes. As pesquisas analisadas evidenciaram que a associação desses materiais promove um efeito sinérgico, contribuindo para o aumento da capacidade de adsorção e da estabilidade mecânica, favorecendo a remoção de contaminantes como fosfatos, nitratos, nitritos, sulfatos, metais pesados e corantes.

Entre os parâmetros operacionais, o pH mostrou-se um fator determinante para o processo de adsorção, uma vez que influencia a interação entre a superfície do compósito e o contaminante. Em valores de pH inferiores ao ponto de carga zero, a superfície tende a apresentar maior carga positiva, favorecendo a adsorção de contaminantes aniônicos. Em contrapartida, em valores de pH superiores ao ponto de carga zero, a superfície torna-se mais negativa, favorecendo a interação com contaminantes catiônicos.

A incorporação da quitosana também apresenta potencial para contribuir com a sustentabilidade do processo, especialmente quando obtida a partir de resíduos da indústria pesqueira, possibilitando o aproveitamento de um resíduo de baixo valor agregado. Dessa forma, a aplicação de compósitos HDL–quitosana apresenta-se como uma alternativa complementar para o tratamento de efluentes, contribuindo para a redução da contaminação dos recursos hídricos e para o desenvolvimento de práticas relacionadas à economia circular e à química verde. Essa abordagem também se alinha ao ODS 6 da ONU, relacionado à disponibilidade e à gestão sustentável da água e do saneamento.

Referências

ABDELWAHAB, A. *et al.* Enhanced crystal violet removal via biopolymer-modified Zn-Fe layered double hydroxides: Adsorption mechanism and environmental impact analysis. **Materials Today Communications**, v. 54, e115503, 2026.

ALSALEM, H. S. *et al.* Adsorption and removal of Pb (II) via layer double hydroxide encapsulated with chitosan; synthesis, characterization adsorption isotherms, kinetics, thermodynamics, & optimization via Box-Behnken design. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 283, n. 1, e137517, 2024.

BAI, J. *et al*. Utilizing phosphogypsum-derived CaAl LDH-chitosan to remove Pb^{2+} from oil/gas field wastewater: adsorption behavior and competitive mechanism. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 204, p. 107994, 2025.

BANSAL, M.; PAL, B. Enhanced elimination of nitrate and nitrite ions from ground and surface wastewater using chitosan sphere-modified Mg-Al layered double hydroxide composite. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, [s. l.], 2025.

BEN HAMADI, N. *et al.* Design and optimization of chitosan-polyethylenimine encapsulated aluminum-palladium layered double hydroxide for efficient paraquat herbicide adsorption via Box-Behnken approach. **Journal of Molecular Liquids**, [s. l.], v. 437, e128604, 2025.

BOURIQI, A.; OUAZZANI, N.; DELIEGE, J.-F. Modeling the Impact of Urban and Industrial Pollution on the Quality of Surface Water in Intermittent Rivers in a Semi-Arid Mediterranean Climate. **Hydrology**, v. 11, n. 9, p. 150, 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento [...]. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, p. 58-63, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 1 set. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes [...]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 8, 16 maio 2011. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=26120. Acesso em: 1 set. 2026.

GOLUBEV, R. A. *et al.* One-pot synthesis of chitosan/LDH composite and its sorption properties toward hexavalent chromium. ***Polysaccharides***, v. 7, n. 60, 2026.

GROVER, A. *et al.* The potential of chitosan intercalated nickel/iron layered double hydroxide composites as extraction adsorbent for phthalates. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 5, e113093, 2024.INSTITUTO TRATA BRASIL. **Quase 90 milhões de brasileiros não têm acesso à coleta de esgoto.** São Paulo, 12 maio 2026. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/90-milhoes-brasileiros-nao-tem-coleta-esgoto/. Acesso em: 25 ago. 2026.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Painel Saneamento Brasil: Saneamento+**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2026. Disponível em: https://www.painelsaneamento.org.br/saneamento-mais/por-ano?id=1&S%5Bid%5D=0. Acesso em: 26 ago. 2026.

MAHMOUD, M. E.; AMIRA, M. F.; SALEH, E. A. I.; ABDEL-AAL, H. Removal of CdS-QDs pollutant from wastewater by interconnected Ca/Al layered double hydroxides with hierarchical mesoporous calcite and chitosan hydrogel. *Scientific Reports*, v. 16, n. 11363, 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Goal 6: Clean Water and Sanitation. Nova York: ONU**, [s.d.]. Disponível em: https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/. Acesso em: 31 ago. 2026.

PESSANHA, M. L. G. S. *et al*. Efficient adsorption of sulfate on a $Mg_6Al_2(CO_3)(OH)_{16}{\cdot}4H_2O$ layered double hydroxide and chitosan composite synthesized from crustacean waste. ***Brazilian Journal of Chemical Engineering***, v. 43, p. 381-392, 2025.

RIBEIRO, N. I. *et al.* Efficient phosphate adsorption by a composite composed of $Mg_6Al_2(CO_3)(OH)_{16} \cdot 4H_2O$ LDH and Chitosan: kinetic, thermodynamic, desorption, and characterization studies. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 307, e122717, 2023.

NETO, L. R. S. **Parametrização e validação da quitosana no campo de força OPLS-AA para caracterizar a remoção de íons fosfato**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Química, Uberlândia, 2018.

ZHANG, Y.; LI, H.; WANG, J.; *et al*. **A stable rare earth-based layered double hydroxide embedded chitosan hydrogel beads for enhanced phosphate removal from aqueous solution: Performance, mechanisms and applicability**. *Journal of Water Process Engineering*, v. 59, p. 104989, mar. 2024.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da UFES (PPEQ) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES).