

Bactérias contra bactérias.

Nova arma na proteção da água potável.

Ana C. Afonso*, Daniela Dias*, Lúcia Simões‡, Maria José Saavedra†, Manuel Simões*

*LEPABE, ALiCE/ U. Porto | †DB/ U. Minho | ‡CITAB, Inov4Agro/ U. Trás-os-Montes e Alto Douro

CATEGORIA

Artigo

CITAÇÃO

Afonso, A. C. et al. (2025)
Bactérias contra bactérias,
Rev. Ciência Elem., V13(03):028.
doi.org/10.24927/rce2025.028

EDITOR

João Nuno Tavares
Universidade do Porto

EDITOR CONVIDADO

Jorge Canhoto
Universidade de Coimbra

RECEBIDO EM

12 de junho de 2025

ACEITE EM

03 de julho de 2025

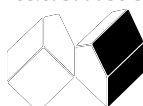
PUBLICADO EM

15 de outubro de 2025

COPYRIGHT

© Casa das Ciências 2025.
Este artigo é de acesso livre,
distribuído sob licença Creative
Commons com a designação
[CC-BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), que permite
a utilização e a partilha para fins
não comerciais, desde que citado
o autor e a fonte original do artigo.

rce.casadasciencias.org



A formação de biofilmes em sistemas de distribuição de água potável representa um desafio significativo para a saúde pública. Esses biofilmes podem abrigar bactérias patogénicas e resistir aos tratamentos de desinfecção convencionais. Uma abordagem inovadora para controlar esses biofilmes envolve a utilização de bactérias específicas para inibir o crescimento de microrganismos indesejados através de um processo conhecido como coagregação bacteriana. Este artigo explora como a manipulação das interações bacterianas pode ser usada para melhorar a qualidade da água potável, destacando as vantagens e os desafios desta estratégia biotecnológica.

Quantas vezes já ouvimos e lemos notícias sobre praias ou piscinas que foram interditas a banhos devido à contaminação bacteriana? Ou, então, daquela vez que fomos de férias e ficamos doentes porque bebemos água contaminada? A segurança da água potável é essencial para a saúde pública^{10,18,19}, mas a presença de bactérias na mesma pode levar a diversos problemas indesejáveis e, em alguns casos (por exemplo, países em desenvolvimento), à morte²⁰. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2020, 5,8 mil milhões de pessoas já utilizavam serviços de água potável geridos de forma segura, enquanto 2 mil milhões recorriam a serviços básicos²⁰. No entanto, cerca de 771 milhões de pessoas ainda não tinham acesso sequer a um nível básico de serviço, destacando-se os 122 milhões que continuavam a recolher água diretamente de rios, lagos e outras fontes superficiais. Estas situações não ocorrem apenas em zonas rurais, mas também em áreas urbanas, especialmente em bairros informais ou ilegais, de baixos rendimentos²¹.

As bactérias, tal como outras formas de vida, gostam de viver em comunidade, em estruturas designadas por biofilmes. Biofilmes são comunidades complexas de microrganismos que aderem a superfícies e que estão envolvidas por uma matriz polimérica extracelular (EPS) de aspeto gelatinoso. Estas comunidades, além de abrigarem muitas vezes bactérias patogénicas, são ainda resistentes à desinfecção, devido à presença desta capa protetora gelatinosa e à existência de uma dinâmica de sobrevivência comunitária^{7,8}. Células em biofilmes podem ter uma resistência a antibióticos 1000 vezes superior às das mesmas células em estado planctónico¹⁵.

Os biofilmes bacterianos estão presentes em diferentes ecossistemas, incluindo nos sistemas de distribuição de água, onde continuam a ser um desafio¹⁶. Os biofilmes formam-se quando bactérias aderem a superfícies, em particular as tubagens e reservatórios de água, protegendo os microrganismos colonizadores de condições adversas e dos tratamentos de desinfecção convencionais. Estes biofilmes não só dificultam a eliminação de bactérias indese-

jadadas como também podem deteriorar o sistema de distribuição (por exemplo, corrosão induzida pela presença de microrganismos) e a qualidade da água (por exemplo, sabor, odor, aspeto, etc.), representando um risco para a saúde pública¹⁶.

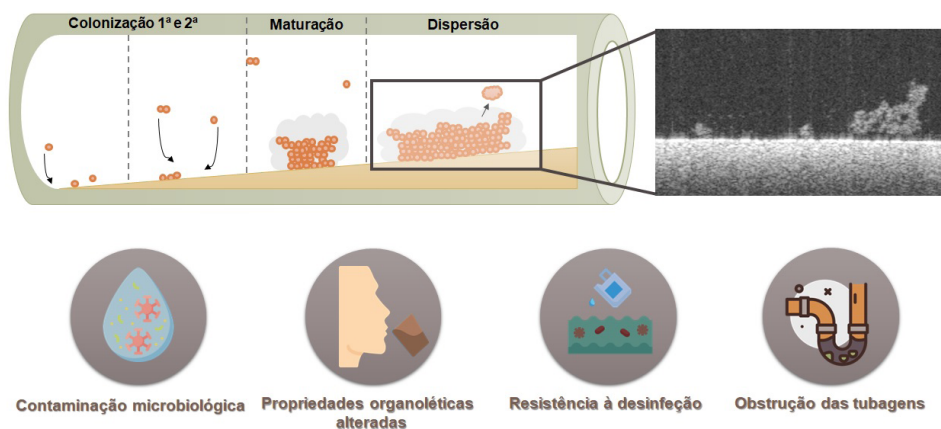


FIGURA 1. Formação de biofilme e problemas associados. A formação de biofilmes começa com adesão inicial à superfície da tubagem e ao estabelecimento da colonização primária, seguida do transporte de células planctónicas para a superfície. Os microrganismos aderidos começam a crescer, formam microcolónias e excretam substâncias poliméricas extracelulares, iniciando a formação da matriz do biofilme. A produção dessa matriz permite que a comunidade bacteriana desenvolva uma estrutura tridimensional complexa, que leva à maturação do biofilme e consequente crescimento dinâmico (contrabalançado com fenómenos de dispersão de porções de biofilme). Alguns dos problemas associados à formação de biofilmes nos sistemas de distribuição de água incluem a redução da qualidade da água, alterando o seu sabor, odor e cor, e conferem os microrganismos colonizadores uma elevada tolerância a desinfetantes, dificultando a eliminação de patógenos que possam existir nesse ecossistema. Outro problema é a obstrução das tubagens, reduzindo o escoamento da água e comprometendo a resiliência do sistema distribuição.

Os microrganismos foram as primeiras formas de vida coletiva a surgir na Terra e desempenham um papel fundamental na saúde humana, animal e ambiental. São responsáveis por regular processos vitais, como os ciclos biogeoquímicos, a dinâmica do carbono e a emissão de gases com efeito de estufa. Além disso, contribuem para a nutrição e para a proteção contra agentes patogénicos. Assim, tendo em conta a importância destas funções, a utilização consciente de bactérias poderá beneficiar significativamente a vida no planeta¹⁴. De facto, os microrganismos têm sido apontados como uma abordagem promissora no combate à crise climática nas suas diversas formas (por exemplo, captura de carbono, biorremediação, produção de bioenergia, etc.)^{6,12}.

E se pudessemos controlar os biofilmes formados em sistemas de distribuição de água potável usando (outras) bactérias? Esta abordagem inovadora, baseada na coagregação bacteriana, surge como uma solução promissora para manter a água potável segura². A coagregação bacteriana é o processo pelo qual estirpes geneticamente diferentes interagem para formar agregados^{2,9}. Essa interação acontece por meio de estruturas específicas na superfície celular, como proteínas de adesão e polissacarídeos, que funcionam como “chaves e fechaduras” moleculares⁹ (FIGURA 2). Diferente da auto-agregação, onde células geneticamente idênticas se juntam entre si, na coagregação há uma espécie de “cooperação tática” entre estirpes, muitas vezes com funções complementares dentro de um biofilme. Este processo é comum na natureza – por exemplo, na cavidade oral, algumas bactérias como *Fusobacterium nucleatum* são conhecidas por formar parcerias com outras espécies, ajudando a organizar os complexos biofilmes orais⁹.

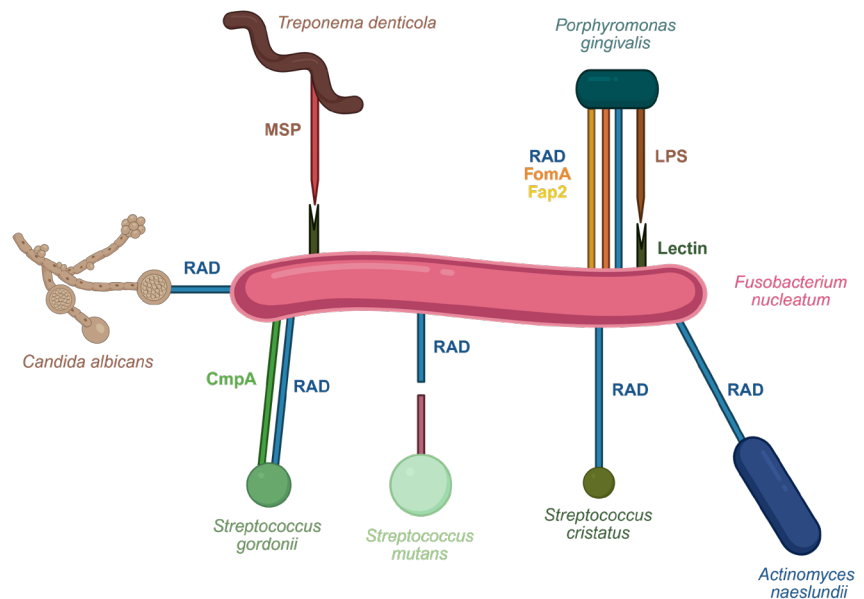


FIGURA 2. Coagregação como um processo “chave-fechadura” entre espécies microbianas. A bactéria *Fusobacterium nucleatum* atua como uma ponte central na formação de biofilmes orais, estabelecendo ligações com múltiplos microrganismos, incluindo bactérias e fungos. Essa interação é mediada por proteínas adesivas específicas (como RadD, Fap2, CmpA, entre outras), que funcionam como “chaves moleculares” capazes de reconhecer “fechaduras” específicas na superfície de outras espécies. Este mecanismo seletivo permite que *F. nucleatum* coagregue com microrganismos muito distintos, como *Streptococcus* spp., *Porphyromonas gingivalis*, *Candida albicans* ou *Treponema denticola*, promovendo a organização estrutural e funcional do biofilme⁴.

Algumas bactérias têm a capacidade de coagregar com outras espécies, influenciando diretamente a formação, composição e estabilidade dos biofilmes^{1,3,13,17}. Em certos casos, atuam como pontes biológicas, permitindo a adesão de espécies que, isoladamente, não conseguiriam integrar o biofilme. Um exemplo bem documentado é o da bactéria *Acinetobacter calcoaceticus*, que funciona como “bactéria ponte”, facilitando a integração de outras bactérias em biofilmes de água potável¹⁷. Esta capacidade pode ser explorada estrategicamente na introdução de bactérias benéficas que competem por espaço e nutrientes, impedindo a fixação de microrganismos indesejados por competição espacial. No entanto, a coagregação também pode ter efeitos opostos: estudos recentes demonstraram que *Delftia acidovorans* facilitou a inclusão da bactéria patogénica *Stenotrophomonas maltophilia* em biofilmes mais tolerantes à desinfecção com cloro¹. Estes resultados mostram que, embora a coagregação tenha grande potencial como ferramenta biotecnológica, a sua aplicação requer escolha cuidadosa das estirpes envolvidas. Ao manipular estas interações naturais com base em conhecimento científico, é possível promover consórcios microbianos desejáveis, complementando métodos tradicionais de desinfecção e tornando os sistemas mais eficazes e sustentáveis (FIGURA 3).

A coagregação já tem vindo a ser estudada como potencial de aplicação biotecnológico. No tratamento de águas residuais, as bactérias coagregantes podem ser introduzidas para acelerar a formação de grânulos aeróbios e biofilmes, aumentando a eficiência na remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos; na biorremediação, a coagregação facilita a integração de microrganismos com capacidades metabólicas complementares, promovendo a degradação eficiente de contaminantes em ambientes aquáticos e terrestres; na bioaugmentação foi estudado que a utilização de bactérias com alta capacidade de coagregação ajudam a aumentar a

estabilidade e a eficácia de consórcios microbianos introduzidos em sistemas de tratamento, reduzindo a necessidade de imobilização artificial^{5,11,22}.

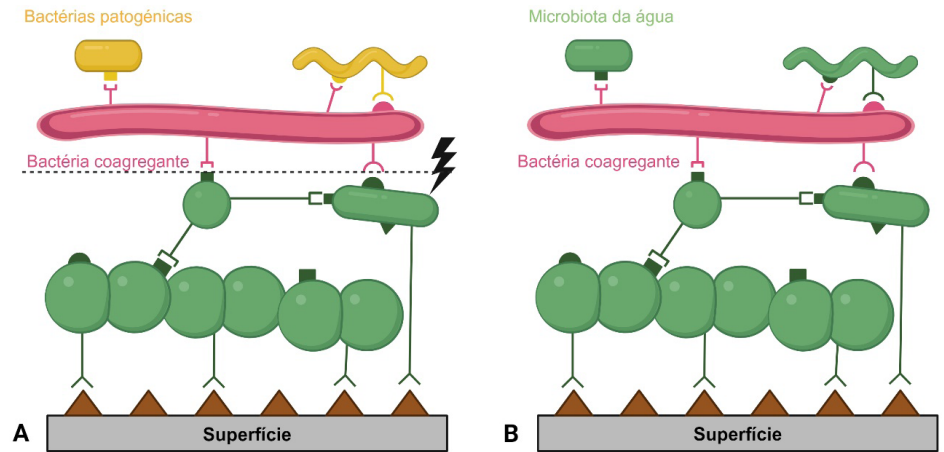


FIGURA 3. Coagregação e formação de biofilmes. A coagregação permite a inclusão de diferentes espécies bacterianas nos biofilmes. Na ausência da bactéria coagregante, outras espécies que dependem de interações específicas com ela não seriam incorporadas no biofilme. A coagregação como técnica biotecnológica pode ser explorada de várias maneiras: (A) se a coagregação facilitar a inclusão de patogênicos no biofilme, a interferência específica nessa interação pode ser uma estratégia para remover os patogênicos; (B) a bactéria coagregante pode estabelecer interações específicas com membros benéficos da microbiota aquática, sem incluir patogênicos.

O controle biológico de biofilmes através da coagregação bacteriana poderá oferecer várias vantagens, incluindo a redução da necessidade de produtos químicos agressivos e a preservação da microbiota benéfica do sistema de água. Contudo, a aplicação prática desta estratégia exige uma compreensão profunda das interações microbianas e da ecologia do sistema, além de estudos adicionais para garantir a segurança e a eficácia em larga escala. Em suma, o uso de bactérias para controlar outras bactérias é uma abordagem biotecnológica inovadora com grande potencial na proteção da água potável. Embora ainda em fase de desenvolvimento, esta estratégia pode representar uma solução eficaz e sustentável para o problema persistente dos biofilmes nos sistemas de água. No futuro, esta abordagem biotecnológica poderá desempenhar um papel crucial na garantia da segurança da nossa água.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: LEPABE, UIDB/00511/2020 (DOI: [10.54499/UIDB/00511/2020](https://doi.org/10.54499/UIDB/00511/2020)) e UIDP/00511/2020 (DOI: [10.54499/UIDP/00511/2020](https://doi.org/10.54499/UIDP/00511/2020)), e ALICE, LA/P/0045/2020 (DOI: [10.54499/LA/P/0045/2020](https://doi.org/10.54499/LA/P/0045/2020)), projeto HCAI_Disinfect (ref. COMPETE2030-FEDER-00752300; N.º 16360); financiados por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC) e CITAB, UIDB/04033/2025 (DOI: [10.54499/UIDB/04033/2025](https://doi.org/10.54499/UIDB/04033/2025)).

REFERÊNCIAS

- ¹AFONSO, A. C. et al., *Coaggregation Dynamics in Drinking Water Biofilms and Implications for Chlorine Disinfection*, *Journal of Hazardous Materials*, 480. 2024.
- ²AFONSO, A. C. et al., *Bacterial Coaggregation in Aquatic Systems*, *Water Research*, 196. 2021.
- ³AFONSO, A. C. et al., *Drinking-Water Isolated Delftia Acidovorans Selectively Coaggregates with Partner Bacteria and Facilitates Multi-species Biofilm Development*, *Science of The Total Environment*, 162646. 2023.
- ⁴AFONSO, A. C. et al., *The Role of the Proteosurfaceome and Exoproteome in Bacterial Coaggregation*, *Biotechnology Advances*, 79: 108505. 2025.
- ⁵CHENG, Z. et al., *Isolation and Characterization of Broad Spectrum Coaggregating Bacteria from Different Water Systems for Potential Use in Bioaugmentation*, *PLoS ONE*, 9 (4). 2014.

- ⁶ DOLAN, J. et al., [Microbial Solutions Must Be Deployed against Climate Catastrophe](#), *FEMS Microbiology Ecology*, 100 (11): 1–11. 2024.
- ⁷ DONLAN, R. M., [Biofilms: Microbial Life on Surfaces](#), *Emerging Infectious Diseases*, 8 (9): 881. 2002.
- ⁸ FLEMING, H. et al., [The EPS Matrix: The 'House of Biofilm Cells](#), *Journal of Bacteriology*, 189 (22): 7945. 2007.
- ⁹ KATHARIOS-LANWERMEYER, S. C. et al., [Mini-Review: Microbial Coaggregation: Ubiquity and Implications for Biofilm Development](#), *Biofouling*, 30 (10): 1235–51. 2014.
- ¹⁰ KUNZ, J. et al., [Surveillance of Waterborne Disease Outbreaks Associated with Drinking Water – United States, 2015–2020](#), *Morbidity and Mortality Weekly Report. Surveillance Summaries*, 73 (1): 1–23.S57301A1. 2002.
- ¹¹ MALIK, A. et al., [Coaggregation among Nonfloculating Bacteria Isolated from Activated Sludge](#), *Applied and Environmental Microbiology*, 69 (10): 6056–63. 2003.
- ¹² PEIXOTO, R. et al., [Microbial Solutions Must Be Deployed against Climate Catastrophe](#), *Nature Communications*, 15:1, 15 (1): 1–3. 2024.
- ¹³ REUBEN, R. et al., [Multispecies Interactions in Biofilms and Implications to Safety of Drinking Water Distribution System](#), *Microbiology and Biotechnology Letters*. 2019.
- ¹⁴ SÁ-CORREIA, I., [Crise Climática Global: Apelo Urgente à Implementação de Soluções Com Base Na Atividade de Microrganismos](#), *Jornal I*. 2024.
- ¹⁵ SHARMA, D. et al., [Antibiotics versus Biofilm: An Emerging Battleground in Microbial Communities](#), *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 8:1 8 (1): 1–10. 2019.
- ¹⁶ SIMÕES, L. C. & SIMÕES, M., [Biofilms in Drinking Water: Problems and Solutions](#), *RSC Advances*. 2013.
- ¹⁷ SIMÕES, L. C. et al., [Intergeneric Coaggregation among Drinking Water Bacteria: Evidence of a Role for *Acinetobacter calcoaceticus* as a Bridging Bacterium](#), *Applied and Environmental Microbiology*, 74 (4): 1259–63. 2008.
- ¹⁸ UNITED NATIONS, [The Right to Water](#). 2002.
- ¹⁹ WHO, [Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum](#), *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*, 541. 2014.
- ²⁰ WHO & UNICEF, [Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2017, Special Focus on Inequalities](#). 2019.
- ²¹ WHO & UNICEF, [Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2020: Five Years into the SDGs](#), Geneva, Switzerland. 2021.
- ²² YUE, W. et al., [Bioaugmentation of Strain *Methylobacterium* Sp. C1 towards p-Nitrophenol Removal with Broad Spectrum Coaggregating Bacteria in Sequencing Batch Biofilm Reactors](#), *Journal of Hazardous Materials*, 344: 431–40. 2018.