

Química

Boletim da Sociedade Portuguesa de Química
abril-junho | Vol. 50 | N.º 181 | 2026



SARDINHA
MORENA DO MAR
COM
LIMÃO

A sardinha é um recurso marinho sustentável quando pescada de forma responsável, respeitando quotas e períodos de defeso.

O uso de pesca seletiva protege outras espécies.

A produção valoriza o aproveitamento do peixe, reduz desperdícios e utiliza embalagens recicláveis.

O limão é um ingrediente natural que contribui para um produto mais saudável e sustentável.



Do Atlântico para o teu prato!



INFORMAÇÃO NUTRICIONAL	
Por 100g	
Energia	70 kcal (4%)
Proteínas	15 g (20%)
Carboidratos	1,5 g (3%)
Gorduras totais	0,4 g (0%)
Sódio	0 g
Fibra alimentar	200 mg (14%)
Referência com 200 kcal	

120g e 12.3OZ



5603837018204

DA MARGEM CERTA PARA A LATA



Editorial | 74

Direção | 75

Perspetiva

77

O Papel das Olimpíadas da Química na Formação Científica: Uma Perspetiva a Partir da Experiência da EBS de Vialonga | **77**

In Memoriam

78

Jorge Marques Gonçalves
(26/12/1964 – 15/05/2026) | **78**

Notícias | 79

Livros | 91

Atualidades Científicas | 94

Ongoing

97

LigBioPack: Valorização de Lenhina em Compósitos Biodegradáveis para Embalagens Alimentares | **97**

Teses

98

Exploiting Tunable Functionalization of Heterocycles for the Future Generation of Organic Lightning Devices | **98**

Artigos

99

Sistemas Aquosos Bifásicos e Microfluídica: A Combinação Ideal para Alvos Biológicos | **99**

Sistemas de Defesa Antioxidantes | **110**

Biomonitorização de Alteradores Endócrinos Lipofílicos em Tecido Adiposo Humano | **119**

A Vida como um Reflexo da Geoquímica Planetária | **123**

Nas Redes | **133**

Química Entre Nós | **134**

Espaço dos Mais Novos | **135**

Destaques | **137**

Agenda | **139**



A Química desempenha um papel central na resposta a muitos dos grandes desafios globais. Contudo, continuam a existir dificuldades em atrair jovens para formação académica e profissional ligada a esta ciência. O fenómeno não é exclusivo de Portugal, mas assume particular relevância num contexto marcado pelo envelhecimento do corpo docente, pela transformação acelerada do ensino superior e pela necessidade de garantir a continuidade e renovação das futuras gerações de químicos. Perante esta realidade, importa refletir sobre a forma como se despertam vocações científicas.

A escola desempenha um papel insubstituível na formação dos jovens, sendo também um espaço

privilegiado para despertar a curiosidade científica, mas o interesse pela ciência raramente nasce apenas dos programas curriculares ou dos manuais escolares. Em muitos casos, surge através de experiências marcantes: uma atividade experimental, uma visita a um laboratório, uma conversa com um investigador, uma palestra inspiradora ou uma competição científica. São estes momentos, por vezes breves, que permitem transformar curiosidade em interesse, e este numa possível vocação. A promoção e divulgação da Química junto dos jovens constitui, por isso, uma área de atuação relevante da SPQ. Em estreita colaboração com escolas de todo o país, através das Olimpíadas de Química (OQ), de concursos temáticos, desafios científicos, palestras e iniciativas promovidas pelo Grupo de Químicos Jovens, a SPQ tem contribuído para aproximar os jovens da investigação, valorizar o talento científico e reforçar o seu envolvimento na comunidade química. O impacto destas iniciativas vai muito além da divulgação científica, sendo, para muitos estudantes, o primeiro contacto com o meio académico e com a investigação. Para outros, constituem uma oportunidade para descobrir capacidades por si desconhecidas. Em particular, as OQ têm desempenhado um papel notável na identificação, valorização e acompanhamento de jovens com interesse e talento para esta ciência, mobilizando anualmente centenas de alunos e professores em todo o país. Nos últimos anos, Portugal tem conquistado regularmente medalhas e menções honrosas nas Olimpíadas Internacionais e Ibero-Americanas de Química, bem como resultados de destaque na Olimpíada Europeia das Ciências Experimentais. Estes sucessos são motivo de orgulho para o país e representam algo mais profundo: a demonstração de que existe talento, motivação e excelência entre os jovens portugueses quando lhes são proporcionadas oportunidades adequadas para aprender, experimentar e desenvolver o seu potencial.

As atividades de promoção e divulgação da Química não resolvem todos os desafios que se colocam ao ensino e à formação científica, mas são uma parte da solução. Funcionam como uma ponte entre a curiosidade e o conhecimento, a aprendizagem e a vocação, a escola e a comunidade científica. Numa época de profunda transformação científica e tecnológica, marcada pela digitalização, pela inteligência artificial e pela necessidade crescente de pensamento crítico, continua a ser essencial atrair jovens capazes de compreender, desenvolver e aplicar o conhecimento químico. As iniciativas de divulgação assumem, por isso, um papel estratégico na formação das futuras gerações de químicos, professores, investigadores e profissionais qualificados, contribuindo para formar talento, promover a literacia científica e reforçar a capacidade do país para responder aos desafios de uma sociedade cada vez mais dependente do conhecimento. Neste contexto, merece uma referência especial o colega Jorge Marques Gonçalves, cuja memória evocamos neste número. Para além do seu percurso como investigador e docente, dedicou-se à promoção e divulgação da Química, colaborando em múltiplas iniciativas. O seu exemplo recorda-nos que despertar a curiosidade científica e incentivar novas vocações é também uma das formas mais duradouras de contribuir para o futuro da Química.

>

Paulo Mendes

BOLETIM DA SOCIEDADE PORTUGUESA DE QUÍMICA

PROPRIEDADE DE SOCIEDADE PORTUGUESA DE QUÍMICA

NIPC: 501 139 265

ISSN 0870 – 1180

Registo na ERC n.º 125 525

Depósito Legal n.º 51 420/91

Publicação Trimestral

N.º 181, abril-junho 2026

REDAÇÃO, EDIÇÃO E ADMINISTRAÇÃO

Av. Prof. Gama Pinto, 2 - 1649-003 Lisboa

Tel.: 217 904 785

bspq@uevora.pt • www.spq.pt

Diretor: Paulo Mendes

Diretores-adjuntos: Ana Paula Esteves, Carlos Monteiro, Maria José Lourenço, Tânia Coelho, Vasco D. B. Bonifácio

Comissão de Aconselhamento Editorial:

Augusto Tomé, Helder T. Gomes, João Paulo R. F. André, Joaquim L. Faria, Jorge Morgado, Mário N. Berberan-Santos

ESTATUTO EDITORIAL

Disponível em:

www.spq.pt/boletim/estatuto_editorial

PUBLICIDADE

Sociedade Portuguesa de Química

secretariado@spq.pt

DESIGN GRÁFICO E PAGINAÇÃO

Rodrigo Nina

www.rodrigonina.com

rodrigo.pnina@gmail.com

Tel.: 964 819 822

IMPRESSÃO E ACABAMENTO

Sersilito, Empresa Gráfica, Lda.

Travessa Sá e Melo, 209, Apartado 1208

4500-116 Gueifães, Maia

+351 229 436 920

administracao@sersilito.pt

Tiragem: 1.250 exemplares

As colaborações assinadas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores, não vinculando de forma alguma a SPQ, nem a Direção do QUÍMICA. São autorizadas e estimuladas todas as citações e transcrições, desde que seja indicada a fonte, sem prejuízo da necessária autorização por parte do(s) autor(es) quando se trate de colaborações assinadas. As normas de colaboração e as instruções para os autores podem ser encontradas no sítio web da SPQ.

PUBLICAÇÃO SUBSIDIADA PELA

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

Apoio do Programa Operacional Ciência, Tecnologia, Inovação do Quadro Comunitário de Apoio III

Uma História da SPQ Através dos Seus Estatutos

A Sociedade Portuguesa de Química (SPQ) foi fundada a 28 de dezembro de 1911, num período em que a ciência portuguesa começava a afirmar-se de forma mais organizada. A sua criação esteve intimamente ligada ao aparecimento da *Revista de Química Pura e Aplicada*, publicada pela primeira vez no Porto, em 1905. Esta revista nasceu da iniciativa de um pequeno grupo de cientistas portugueses empenhados em promover o desenvolvimento da Química em Portugal. Entre eles destacou-se Ferreira da Silva, figura central da ciência portuguesa da época e primeiro presidente da Sociedade.

Em 1915, a SPQ encontrava-se já estruturada em três secções regionais: Porto, Coimbra e Lisboa. Na secção do Porto existia ainda uma subsecção dedicada à Física, área científica que, à época, ainda não possuía em Portugal dimensão suficiente para constituir uma sociedade autónoma. Deste período não constam do espólio da SPQ quaisquer Estatutos formais, e nem mesmo uma pesquisa efetuada no *Diário do Governo* desses anos permitiu encontrar a publicação de Estatutos.

Os primeiros Estatutos conhecidos foram aprovados em Assembleia Geral de 28 de junho de 1926. Logo no seu artigo 1.º pode ler-se: “A Sociedade Química Portuguesa, tendo anexa uma secção de Física, passa a designar-se Sociedade Portuguesa de Química e Física”. Era o reconhecimento do crescimento e consolidação da Física ao longo das décadas anteriores.

De acordo com estes Estatutos, a Sociedade passou a organizar-se em duas secções (Química e Física), com sede em Lisboa e estruturada em três núcleos: Lisboa, Porto e Coimbra. Foram igualmente definidas várias categorias de sócios: sócios honorários, sócios beneméritos, sócios efetivos (compreendendo os fundadores), sócios correspondentes e sócios agregados. Para além da curiosa referência aos fundadores, é de esclarecer que os sócios correspondentes seriam os estrangeiros eleitos pela Sociedade e os agregados “os estudantes portugueses que se interessam pelo estudo da química, da física e ciências congêneres” (manteve-se a grafia tal como consta dos Estatutos).

A organização prevista assentava numa estrutura que partia do nível mais local para o nacional. Cada núcleo tinha um Conselho de Direção composto por: 1) um Presidente, 2) dois Vice-presidentes, 3) um Primeiro Secretário, 4) um Segundo Secretário, e 5) três vogais efetivos e três vogais substitutos. Como curiosidade, os Estatutos estabeleciam que “o presidente ou um dos vice-presidentes deverá ser



um membro da secção de Física” e determinavam ainda que os sócios agregados apenas poderiam exercer o cargo de Segundos Secretários.

A gerência tinha a duração de um ano, sendo os seus membros passíveis de reeleição. Havia ainda, na sede, um Conselho Geral da Sociedade, constituído pelo Presidente, pelos dois Secretários e pelos Vogais do núcleo da sede, pelos Presidentes dos outros dois núcleos, bem como por um Tesoureiro e um Bibliotecário.

Em Assembleia Geral de 15 de dezembro de 1965 foram aprovados novos Estatutos. A denominação da Sociedade manteve-se inalterada (Sociedade Portuguesa de Química e Física), bem como a sua divisão em dois núcleos. A sede permaneceu em Lisboa, mantendo-se igualmente as Delegações de Coimbra, Lisboa e Porto.

Verificou-se uma alteração nas categorias de sócios, passando a existir sócios honorários, beneméritos, efetivos e estudantes. Foi ainda introduzida a possibilidade de serem criadas divisões técnicas para agregar sócios com interesses científicos comuns. Os órgãos estatutários também sofreram algumas alterações, passando a existir: 1 – uma Mesa da Assembleia Geral; 2 – um Conselho Diretivo da Sociedade; 3 – uma Comissão Revisora de Contas; 4 – o Conselho do Núcleo de Química; e 5 – o Conselho do Núcleo de Física. Ficou estabelecido que as eleições para os vários órgãos seriam feitas de modo ordinário a cada três anos.

A união da Química e da Física manteve-se até fevereiro de 1974, altura em que as duas áreas científicas seguiram caminhos independentes, dando origem às atuais Sociedade Portuguesa de Química e Sociedade Portuguesa de Física. Três anos mais tarde, em 24 de fevereiro de 1977, ambas as sociedades instalaram-se numa nova sede comum, situada na Avenida da República, n.º 37, 4.º andar, em Lisboa. A cerimónia de inauguração contou com a presença de importantes figuras da vida académica e científica nacional, incluindo representantes do Governo, das universidades e de instituições de investigação. Na ocasião foram reafirmados os principais objetivos da SPQ: promover

o debate científico, incentivar o contacto entre investigadores e professores e contribuir quer para o desenvolvimento da investigação quer para a melhoria do ensino da Química em Portugal.

Esta separação das duas Sociedades levou à aprovação de novos Estatutos (agora para a Sociedade Portuguesa de Química - SPQ) aprovados em Assembleia Geral de fevereiro de 1979, mas apenas registados em 18 de dezembro desse ano. Estes novos Estatutos introduziram algumas diferenças, nomeadamente o alargamento da implantação territorial da Sociedade e da sua organização científica. A Sociedade Portuguesa de Química passou a poder ter sede em Lisboa e Delegações e Polos em qualquer parte do território nacional. A Delegação assumia um carácter permanente, ao passo que o polo tinha natureza não permanente. Consideraram-se desde logo as seguintes Delegações: Aveiro, Braga, Coimbra, Lisboa e Porto. Em relação às categorias de sócios, não se verificaram grandes alterações, tendo sido criada apenas a figura de sócio coletivo (honorários, beneméritos, coletivos, efetivos e estudantes). A SPQ passou ainda a organizar-se em Divisões e Grupos.

Cada delegação tinha um Presidente, que integrava o Conselho Diretivo da Sociedade, e dois vogais. Os órgãos da SPQ passaram a ser: Assembleia Geral, Conselho Diretivo, Conselho Executivo e Conselho Fiscal. O Conselho Diretivo era constituído por um Presidente, um Vice-presidente, um Secretário-geral, dois Secretários-gerais adjuntos, um Tesoureiro e os Presidentes de todas as Delegações. Por sua vez, o Conselho Executivo era constituído pelo Secretário-geral, pelos dois Secretários-gerais adjuntos e pelo Tesoureiro.

O voto por correspondência passou a ser admitido em várias situações, estando apenas liminarmente proibido nas votações relativas à extinção da Sociedade. Os órgãos estatutários passaram a ser eleitos de três em três anos.

Estes Estatutos vigoraram até 1981, ano em que, a 15 de dezembro, a Assembleia Geral aprovou uma nova redação que introduziu algumas alterações na organização da SPQ.

A SPQ mantinha a sua sede em Lisboa e podia criar Delegações em qualquer ponto do território nacional sempre que tal se justificasse. Foram desde logo criadas as Delegações de Coimbra, Lisboa e Porto. No que respeita às categorias de sócios, não se verificou qualquer alteração, mantendo-se os sócios honorários, beneméritos, coletivos, efetivos e estudantes. Continuou a estar prevista a criação de Divisões, “com o objetivo de agrupar sócios com interesses científicos comuns.”

Em cada Delegação foram criadas uma Mesa de

Assembleia Geral Regional e uma Direção da Delegação (composta por um Presidente, um Secretário e um Tesoureiro). Os órgãos centrais da Sociedade eram: a) a Assembleia Geral, b) o Conselho Diretivo e c) o Conselho Fiscal. O Conselho Diretivo era constituído pelos Presidentes das Delegações, pelo Secretário-geral da Sociedade, pelo Secretário-geral adjunto e pelo Tesoureiro. O presidente da Sociedade e um Vice-presidente eram escolhidos de entre os presidentes das Delegações. Os órgãos eram eleitos ordinariamente a cada três anos, não podendo alguns cargos ser desempenhados por mais de um mandato consecutivo. Mantinha-se, tal como nos Estatutos anteriores, a possibilidade, para algumas eleições, de voto por correspondência.

Como curiosidade, e atestando a grande abertura que sempre caracterizou a Sociedade, em todos os Estatutos desde 1966 consta, nos processos eleitorais, um parágrafo que permite aos sócios votarem em candidatos diferentes dos constantes das listas apresentadas.

E assim chegamos aos Estatutos que regem atualmente a Sociedade Portuguesa de Química. Na sua estrutura essencial, não diferem muito dos aprovados em 1981. Conheceram, contudo, várias alterações pontuais: foram parcialmente revistos nas Assembleias Gerais de 24 de novembro de 2015 e 20 de maio de 2016, nomeadamente no que respeita à representação dos sócios que não pudessem comparecer pessoalmente às Assembleias Gerais, e voltaram a ser alterados em 7 de dezembro de 2022 para que a Assembleia Geral pudesse ser convocada por correio eletrónico. A aprovação desta versão dos Estatutos ficou igualmente associada à mudança de sede para a Avenida da República, n.º 45, 3.º Esq., em Lisboa. Mais recentemente, em Assembleia Geral de 16 de junho de 2026, foi aprovada uma nova revisão pontual, motivada pela transferência da sede para a Avenida de Berna, n.º 30, 2.º andar, fração F, em Lisboa.

Em breve, a SPQ iniciará um novo processo de revisão dos seus Estatutos, numa revisão que procurará, mantendo a essência de mais de um século da SPQ, preparar a nossa Sociedade para o futuro.

Nota: Este artigo foi elaborado com base na documentação existente no arquivo da sede da SPQ. O autor agradece ao Secretariado da SPQ toda a ajuda prestada na preservação e disponibilização desta documentação.

>

João Paulo Leal

Secretário-Geral Adjunto da SPQ

jpleal@ctn.tecnico.ulisboa.pt

O Papel das Olimpíadas da Química na Formação Científica: Uma Perspetiva a Partir da Experiência da EBS de Vialonga

As Olimpíadas da Química Júnior promovidas pela SPQ têm vindo a afirmar-se como uma iniciativa de grande relevância no panorama educativo nacional. Muito mais do que uma competição, constituem uma oportunidade privilegiada para aproximar os jovens da ciência, fomentar competências essenciais e criar pontes entre os ensinos básico e secundário e o ensino superior. A experiência da Escola Básica e Secundária de Vialonga, integrada no programa TEIP (Territórios Educativos de Intervenção Prioritária), ilustra de forma particularmente significativa o alcance e o impacto destas iniciativas.

Um dos contributos mais significativos das Olimpíadas reside na sua capacidade de despertar o interesse dos alunos pela ciência. Ao desafiar os estudantes a explorar conceitos para além do contexto habitual da sala de aula, estas competições promovem a curiosidade, a indagação e o gosto pela descoberta. A divulgação desta iniciativa junto dos alunos do 9.º ano tem gerado uma adesão crescente e entusiasta, demonstrando que, quando devidamente estimulados, todos os alunos — independentemente do seu contexto de origem — podem desenvolver interesse e ambição científica. A participação nas Olimpíadas envolve muito mais do que o domínio de conteúdos. Exige raciocínio crítico, capacidade de resolução de problemas complexos e aptidão para trabalhar em equipa, pelo que a constituição de equipas evidencia o papel da colaboração no sucesso dos alunos.

As Olimpíadas têm, também, um impacto significativo ao nível da organização pedagógica e da dinâmica escolar. A necessidade de preparar os alunos para a competição conduz, muitas vezes, a uma maior flexibilização curricular e à valorização de abordagens experimentais. A adaptação da planificação anual da disciplina de Físico-Química permite antecipar conteúdos essenciais de Química, garantindo uma preparação mais sólida dos alunos. Este tipo de ajuste evidencia uma prática pedagógica orientada para a equidade, procurando criar condições para que todos os alunos possam aceder a experiências de aprendizagem desafiantes e significativas. Simultaneamente, estas iniciativas reforçam o envolvimento

dos professores, que assumem um papel determinante na motivação dos alunos e na construção dos seus percursos de sucesso.

Outro aspeto particularmente relevante das Olimpíadas é a oportunidade que oferecem aos alunos de contactar diretamente com os meios académico e científico. A realização das semifinais em instituições como a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa proporciona uma experiência marcante: os alunos têm acesso a laboratórios de investigação, interagem com docentes e estudantes universitários e conhecem, de perto, a realidade do ensino superior. Para alunos provenientes de contextos onde o acesso ao ensino superior nem sempre é perspetivado como um caminho natural, esta experiência assume um papel transformador. Ao tornar o universo universitário mais próximo e acessível, contribui para alargar horizontes, reforçar expectativas e incentivar a continuidade dos estudos.

Na EBS de Vialonga, desde 2023 já fizeram a prova de seleção interna 54 alunos, tendo participado nas Olimpíadas da Química Júnior um total de cinco equipas (15 alunos). Esta participação despertou, sem dúvida, alguns alunos para a área científica, escolhendo o curso de Científico-Humanístico na vertente de Ciências e Tecnologias: uns estão prestes a realizar provas para prosseguir estudos em Medicina, outros em Biologia Marinha e outros já sabem que vão continuar a estudar para serem Engenheiros Químicos ou Biomédicos.

A experiência acumulada demonstra que a participação nas Olimpíadas da Química tem um impacto que ultrapassa largamente os resultados obtidos na competição. Reflete-se, sobretudo, no crescimento pessoal dos alunos. As Olimpíadas afirmam-se, assim, como um instrumento pedagógico de grande valor, capaz de mobilizar alunos e professores em torno de uma escola mais dinâmica e em constante transformação.

>
Rui Martins
rui.martins@aevialonga.edu.pt

>
Teresa Ferrinho
teresa.ferrinho@aevialonga.edu.pt

Jorge Marques Gonçalves

(26/12/1964 – 15/05/2026)

Benjamin Franklin criou para si próprio um plano de doze virtudes que procurava seguir disciplinadamente. A conselho de um amigo, uma décima terceira virtude foi acrescentada à lista: a humildade. Franklin reconheceu que o amigo tinha razão, embora intuísse a dificuldade dessa tarefa: “O orgulho humano é quase impossível de subjugar... mesmo que eu tivesse a certeza de que o havia vencido por completo, provavelmente ficaria orgulhoso da minha humildade.”

Apesar do legítimo apreço que tinha pelo seu trabalho de investigador e docente, a humildade do Jorge era-lhe intrínseca — não seria necessário ser-lhe recomendada. E com ela vinham naturalmente outras virtudes essenciais: a justiça, a moderação, a sinceridade e a tranquilidade. A coragem fazia igualmente parte da sua natureza, como demonstrou em várias situações, incluindo no desporto: o Jorge foi guarda-redes de andebol — posição de sacrifício e responsabilidade, pouco compatível com vaidades pessoais, mas reveladora de espírito de equipa e sentido de dever.

Como docente da FCUP, o Jorge era Professor Auxiliar. E auxiliava verdadeiramente, com paciência, sabedoria e rara generosidade intelectual. Todos os que o procuravam — estudantes, colegas ou técnicos — encontravam nele um amigo. Fê-lo sem necessidade de protagonismo, com a serenidade de quem via no conhecimento não um instrumento de prestígio, mas uma forma de serviço.

A sua dedicação ao ensino e à ciência assentava numa sólida formação académica construída na própria Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Licenciou-se em Química (ramo científico) em 1987 e concluiu o doutoramento em Química (1996), na especialidade de química-física, sob a orientação do saudoso Professor Manuel A. V. Ribeiro da Silva, com a dissertação *Termoquímica de Complexos Metálicos de Beta-Dicetonas Fluoradas e 8-Hidroxiquinolinas*.

Como membro integrado do Centro de Investigação em Química da Universidade do Porto (CIQUP), desenvolveu o seu trabalho de investigação no grupo de Termodinâmica Molecular, mantendo uma produção científica regular ao longo de mais de três décadas, traduzida em artigos publicados entre 1994 e 2025 em conceituadas revistas internacionais. Contudo, para ele, a formação dos



estudantes ocupava sempre um lugar central. Para além das aulas, envolvia-se ativamente em iniciativas de divulgação e promoção da química: colaborou com a Casa das Ciências, participando no desenvolvimento da enciclopédia *WikiCiências* e na organização de vários congressos científicos internacionais, bem como em iniciativas dirigidas aos mais jovens, como a Universidade Júnior da Universidade do Porto e as Olimpíadas de Química.

O Jorge via essas atividades como mais uma oportunidade para despertar vocações, estimular a curiosidade científica e retribuir à comunidade académica aquilo que dela recebera. Quem teve o privilégio de o conhecer recordará não apenas o cientista e o professor, mas sobretudo o amigo, o homem justo, sereno e generoso que todos reconhecem.

>

Manuel João Monte (FCUP)

mjmonte@fc.up.pt

12.º Encontro da Divisão de Química Analítica (ANALÍTICA 2026)

Nos dias 30 e 31 de março de 2026, a Universidade de Aveiro acolheu o 12.º Encontro da Divisão de Química Analítica (ANALÍTICA 2026) da SPQ, encontro dedicado às múltiplas dimensões da Química Analítica moderna. O evento, que contou com o apoio institucional da Universidade de Aveiro e do Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), integrou o programa comemorativo dos 50 anos do Departamento de Química da Universidade de Aveiro.

A 12.ª edição contou com a presença de 108 participantes provenientes de todo o país e de alguns países europeus, entre investigadores, estudantes de mestrado e doutoramento e representantes da indústria. O evento destacou-se como um espaço privilegiado para a troca de ideias e a criação de novas colaborações, sublinhando resultados recentes e prioridades de investigação, e abordando a enorme importância da Química Analítica.

A sessão de abertura contou com a presença de Artur Silva (Vice-Reitor da Universidade de Aveiro), Amadeu Soares (Diretor do CESAM, Universidade de Aveiro), Armando Silvestre (Diretor do Departamento de Química, Universidade de Aveiro), Amparo Faustino (Presidente da Delegação de Aveiro da SPQ) e Vânia Calisto (Presidente da Divisão de Química Analítica da SPQ e Presidente da Comissão Organizadora).



Sessão de abertura.

O programa científico integrou palestras plenárias proferidas por Diana Aga, Professora da Universidade de Buffalo (Estados Unidos da América), abordando o tema “*Mind The Fluorine Gap: Analytical Methods for Unmasking PFAS and Closing Fluorine Mass Balance in Environmental Samples*”; Boris Mizaikoff, Professor da Universidade de Ulm (Alemanha), com a palestra “*Probing the World with Good Vibrations*”, e António Rangel, Professor da Universidade Católica Portuguesa, que falou acerca de “*Flow-based systems as convenient tools for sample processing in environmental monitoring*”. Como oradores convidados, o evento contou

com a palestra de Rosário Domingues, Professora da Universidade de Aveiro, Tiago Rosado, Professor da Universidade da Beira Interior, e Ricardo Bettencourt da Silva, Professor da Universidade de Lisboa. Para além das palestras convidadas, foram ainda apresentadas 22 comunicações orais, 16 apresentações *flash* e 54 comunicações em painel. Além da componente científica, houve ainda um momento de convívio mais informal, o jantar do evento, reforçando os momentos de *networking* entre participantes.



Auditório durante as sessões científicas do evento.

O ANALÍTICA2026 assinalou também o lançamento do Prémio José Luís Costa Lima, gentilmente patrocinado pela Fundação Jaqueline Dias de Sousa. Este Prémio teve o objetivo de distinguir trabalhos na área da Química Analítica, e foi concedido em duas modalidades: i) Prémio Melhor Tese de Doutoramento e ii) Prémio Melhor Artigo Científico. Nesta primeira edição foram distinguidas Sara R. Fernandes da Universidade do Porto na categoria de melhor Tese de Doutoramento e Luísa Barreiros da Universidade do Porto na categoria de melhor Artigo Científico.

Na sessão de encerramento foram atribuídos prémios às melhores comunicações patrocinados pela Divisão de Química Analítica da SPQ, pela revista *Pharmaceuticals* e pela empresa *ReadyToPub*. O prémio da *Pharmaceuticals* distinguiu a melhor comunicação oral, atribuído a Diana Cunha da Universidade do Porto. A Divisão de Química Analítica da SPQ distinguiu Inês Pereira, da Universidade de Coimbra, com o prémio de melhor comunicação em painel. Os prémios *ReadyToPub* foram concedidos exclusivamente a estudantes, tendo sido premiados Pedro Matias (Universidade de Coimbra) e Ana Luísa Silva (Universidade do Porto), com o prémio de melhor comunicação oral; Inês Quintela (Universidade do Porto) com o prémio de melhor comunicação *flash*; e Tomás Barros (Universidade do Minho) com o prémio

de melhor comunicação em painel.

Salienta-se ainda o papel decisivo dos patrocinadores no sucesso do evento. A Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento (FLAD) apoiou a participação da Professora Diana Aga. A *Unicamp*, *ERT*, e a *Palex* marcaram presença como patrocinadores *Gold*. A *Ready-ToPub*, *Pharmaceuticals*, *Ambifirst*, *Hanna Instruments*, *MTB*, *Specanalítica*, *Grupo ILC*, *Marvern Panalytical*, *FL Scientific Consulting*, e Projeto Raro participaram como patrocinadores *Silver*. O evento contou ainda com o apoio financeiro da *Enzymatic*, *LabCollector*, *LaborSpirit*, *Gravimeta* e *Dias de Sousa*, como patrocinadores *Bronze*. Algumas empresas marcaram ainda presença com expositores, promovendo uma maior visibilidade da empresa junto dos participantes. A participação destas empresas permitiu a promoção dos seus produtos entre a comunidade científica, fomentando a ligação e a partilha



Foto de Grupo.

de conhecimento entre as empresas e os investigadores.

O evento marcou o início do mandato do Professor Ricardo Bettencourt da Silva como presidente da Divisão de Química Analítica da SPQ, com a cessação do mandato da Professora Vânia Calisto. Durante o evento foi também realizada a Assembleia Geral da Divisão de Química Analítica da SPQ, tendo sido eleito o Professor António Rangel como futuro Presidente desta Divisão.

No final do evento, foi anunciado que a próxima edição do ANALÍTICA será em Lisboa em 2028, onde esperamos voltar a reunir esta comunidade científica!

A comissão organizadora agradece a todos os participantes, palestrantes, instituições, patrocinadores e comissão científica que contribuíram para o sucesso desta edição do ANALÍTICA2026.



Comissão Organizadora.

>

Vânia Calisto

vania.calisto@ua.pt

>

Goreti Pereira

goreti.pereira@ua.pt

15th Inorganic and Bioinorganic Chemistry Conference (15th IBiCC)

A 15.^a Conferência da Divisão de Química Inorgânica e Bioinorgânica (15th IBiCC) da Sociedade Portuguesa de Química decorreu entre 8 e 10 de abril de 2026, na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Ciências, ULisboa), reunindo a comunidade científica nacional e internacional num ambiente de elevado rigor científico e forte espírito colaborativo.

A 15th IBiCC teve como principal objetivo promover a discussão dos avanços mais recentes em áreas fundamentais da Química Inorgânica e Bioinorgânica, nomeadamente Química de Coordenação e Supramolecular, Catálise, Magnetoquímica, Energia e Fotoquímica, Bioinorgânica, Materiais Inorgânicos e Nanopartículas, Química Nuclear e Química Teórica.

A conferência destacou, atendendo aos desafios

científicos e tecnológicos que a humanidade enfrenta atualmente, a importância do diálogo interdisciplinar, incentivando a colaboração e o intercâmbio científico, num ambiente simultaneamente estimulante, cientificamente gratificante e acolhedor.

A sessão de abertura contou com a presença dos Professores Conceição Freitas, Diretora da Faculdade de Ciências, ULisboa, José Manuel Nogueira, Presidente do Departamento de Química da mesma instituição, Jorge Parola, Secretário-Geral da Sociedade Portuguesa de Química e Carla D. Nunes, Presidente da Divisão de Química Inorgânica e Bioinorgânica.

A 15th IBiCC reuniu cerca de 75 participantes provenientes de sete países, incluindo Áustria, Bélgica, Brasil, Espanha, Holanda e Índia, que contribuíram decisiva-



Sessão de abertura.

mente para o elevado nível científico do evento. É de salientar que 18% dos participantes eram estudantes de Doutoramento e 11% estudantes de Mestrado e Licenciatura, refletindo o forte envolvimento dos(as) jovens investigadores(as), que apresentaram os seus trabalhos e discutiram resultados com investigadores de reconhecido mérito internacional.

O programa científico incluiu 28 Comunicações em Painel, duas Lições Plenárias (PL), oito *Keynotes* (KN), oito Palestras Convidadas e 11 Comunicações Orais, bem como a Lição Convidada proferida pelo Professor Pedro Teixeira Gomes. Entre os cientistas internacionais que participaram na conferência destacam-se Karl Kirchner (PL), Vice-Chair da *Division of Inorganic Chemistry* da EuChemS, e Peter-Leon Hagedoorn (*Delft University of Technology*, Países Baixos).

A participação portuguesa foi particularmente expressiva, sendo de realçar as excelentes comunicações apresentadas por Ana Petronilho, Ana Daniel da Silva, Adriana Pinheiro, Andreia Peixoto, Ana Margarida Silva, Beatriz Royo, Dulce Belo, Filipe Folgosa, Leonor Morgado, Luís Cunha Silva, Luísa Martins, Maria João Ferreira, Óscar Rojas, Paulo Costa, Rui Carrilho, Tiago Cruz, entre outros investigadores nacionais.

Um dos momentos altos da conferência foi a atribuição do Prémio Alberto Romão Dias, que em 2026 distinguiu o Professor Pedro Teixeira Gomes (IST, ULisboa). Para além das sessões científicas, a 15th IBICC proporcionou diversas oportunidades informais de discussão e *networking*, promovendo o estabelecimento de novas colaborações, nomeadamente durante as sessões de comunicações em painel, pausas para café, almoços, receção de boas-vindas e o jantar da conferência, que decorreu no Restaurante Jardim da Luz, em Carnide, Lisboa.



Pedro Teixeira Gomes, Prémio Alberto Romão Dias 2026.

Na cerimónia de encerramento, foram atribuídos prémios à Melhor Comunicação em Painel, entregue a Catarina Alves, e à Melhor Comunicação Oral, para Marco Sá, dois jovens investigadores. Os prémios foram patrocinados pelas revistas *Dalton Transactions* e *New Journal of Chemistry* da *Royal Society of Chemistry*.

Durante a 15th IBICC foi ainda eleita como futura Presidente da Divisão de Química Inorgânica e Bioinorgânica, para o biénio 2028–2030, a Professora Clara Pereira (Faculdade de Ciências da Universidade do Porto).

A conferência contou com o apoio de vários patrocinadores institucionais e empresariais, que se fizeram representar durante o evento, apresentando aos participantes novos produtos e serviços.

A Comissão Organizadora da 15th IBICC agradece, de forma muito reconhecida, a todos os patrocinadores pelo apoio concedido, que foi essencial para o sucesso da conferência.



Foto de grupo.

>

Carla D. Nunes

cmnunes@ciencias.ulisboa.pt

Olimpíadas de Química 2026

As Olimpíadas de Química, uma das iniciativas mais emblemáticas da Sociedade Portuguesa de Química, contaram este ano com um total de 440 inscrições, das quais 180 nas Olimpíadas de Química Mais (OQMais) e 260 nas Olimpíadas de Química Júnior (OQJúnior). A semifinal das OQMais teve lugar a 14 de março de 2026,

enquanto a semifinal das OQJúnior se realizou a 18 de abril de 2026. Ambas as fases foram acolhidas com enorme entusiasmo pelas instituições universitárias anfitriãs, que receberam calorosamente os alunos e professores participantes.

A final das OQMais decorreu a 9 de maio de 2026,

na Universidade de Aveiro. Os vencedores foram:

1.º lugar: Guilherme Duarte Cabral, da Escola Secundária Tomás Cabreira – Faro; Professor: Orlando Ferreira Sacramento Alho;

2.º lugar: Martim Lavouras Francisco, da Escola Secundária Infanta D. Maria – Coimbra; Professora: Ana Paula Branquinho;

3.º lugar: Mário Dinis Carvalho dos Santos Fernandes, Escola Secundária Almeida Garrett – Vila Nova de Gaia. Professora: Cláudia Margarida Simões.

A Escola Secundária Infanta D. Maria, Coimbra, foi distinguida com o diploma de Melhor Escola, atribuída à Escola com melhor prestação conjunta por equipa. Este ano também foram atribuídos os Prémios de melhor Prova Teórica para Rafael Alexandre de Andrade Soares Marques e melhor Prova Prática para Gustavo Salomé de Passos Furtado Lira, ambos da Escola Secundária de Camões, Lisboa.

Durante a realização da prova prática da QOMais, os professores acompanhantes tiveram a oportunidade de visitar a Fábrica Centro Ciência Viva de Aveiro. Neste espaço decorreu também o lanche de confraternização entre todos os participantes e a cerimónia de encerramento do evento, proporcionando um momento de convívio e partilha entre alunos, professores e organização.

A final das OQJúnior teve lugar a 16 de maio de 2026, no Departamento de Química da Universidade de Coimbra. As equipas vencedoras foram:

1.º lugar: *Soluções de Última Hora* (Adam Rodri-

gues, Eloya Telis, Dinis Esteves), da Escola Básica dos 2.º e 3.º Ciclos Dr. Guilherme Correia de Carvalho – Seia; Professores: Cristina Albino e Maria do Céu Fonseca;

2.º lugar: *Três em Reação* (Ana de Sousa, Maria Mancera, Xavier Santos), da Escola Básica dos 2.º e 3.º Ciclos Fernando Pessoa – Santa Maria da Feira; Professora: Olga Rodrigues;

3.º lugar: *Bosco1* (Matilde Lee, Júlia Scaramucci, Simone Guilherme), da Escola Salesianos do Estoril, Lisboa; Professora: Rita Rodrigues da Silva.

A todos os participantes das Olimpíadas de Química, o nosso mais sincero agradecimento! O entusiasmo, a dedicação e a energia que demonstraram ao longo desta competição são verdadeiramente inspiradores! Mais do que uma competição, este foi um encontro com a curiosidade, com o desafio e, acima de tudo, com a paixão pela Química, a ciência que revela os segredos invisíveis do mundo e nos dá o poder de o transformar. Cada experiência resolvida, cada problema enfrentado e cada dúvida explorada são prova da vossa curiosidade e da vossa vontade de ir mais longe. É esse gosto genuíno pela Química que acende as grandes ideias, impulsiona a inovação e constrói o futuro.

De forma especial, agradecemos também aos professores que, com dedicação, rigor e entusiasmo, prepararam e acompanharam os alunos ao longo deste percurso, incentivando o gosto pela Química e contribuindo de forma determinante para esta experiência enriquecedora.



Medalha de Ouro QOMais.



Medalha de Prata QOMais.



Medalha de Bronze QOMais.



Medalha de Ouro OQJúnior.



Medalha de Prata OQJúnior.



Medalha de Bronze OQJúnior.

>
Carlos Monteiro
cmonteiro@ua.pt

>
Sara Pinto
smpinto@qui.uc.pt

Portugal Conquista Medalha de Prata nas Olimpíadas Ibero-americanas de Química

Portugal voltou a destacar-se no panorama internacional da Ciência! Na 29.^a edição das Olimpíadas Ibero-americanas de Química, que decorreu entre 26 e 31 de outubro de 2025, na Universidade Nacional Autónoma do México, Cidade do México e Universidade Autónoma do Estado de Morelos, Cuernavaca, a equipa portuguesa conquistou uma Medalha de Prata, arrecadada pelo jovem talento Leonardo Aires, aluno da Escola Secundária Dr. Mário Sacramento, em Aveiro.

A competição reuniu dezenas dos melhores estudantes de Química de países da comunidade ibero-americana (Brasil, Chile, Colômbia, Costa Rica, Cuba, Equador, El Salvador, Espanha, Honduras, Panamá, Perú, Portugal e México), selecionados após provas nacionais altamente exigentes. A representar Portugal estiveram Leonardo Aires da Escola Secundária Mário Sacramento-Aveiro e Diogo Pires, da Escola Emídio Garcia-Bragança, que foram acompanhados pelo mentor Carlos Monteiro do Departamento de Química da Universidade de Aveiro. Esta Olimpíada é o culminar de um intenso trabalho de preparação que um conjunto de estudantes do ensino secundário desenvolve ao longo do ano letivo, apoiado pela Universidade de Aveiro e pela Sociedade Portuguesa de Química, e que conta com o apoio financeiro do Ministério da Educação, através da sua Direção Geral de Educação. Ambos os estudantes demonstraram uma combinação de rigor científico, curiosidade e paixão pela descoberta acima da média, destacando-se tanto na prova teórica como na prova prática.

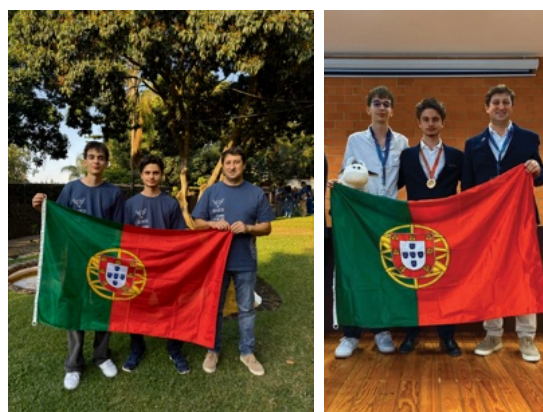
A SPQ felicita ambos os estudantes, bem como toda a comitiva envolvida, considerando que mais do que uma medalha de prata, esta nova conquista nas OIAQ2025 é um reflexo que uma geração de futuros químicos portugueses de excelência se está a formar, e que representa uma inspiração para todos os que sonham seguir o caminho da ciência.

Como forma de inspirar as próximas gerações, partilhámos o testemunho dos dois participantes das OIAQ 2025, cuja experiência reflete o espírito de dedicação e superação que o evento representa:

- “Participar nas OIAQ 2025 no México foi, sem dúvida, uma experiência marcante. Como o número de países participantes é reduzido relativamente ao das IChO, estas olimpíadas exaltam um certo sentimento de comunidade, as culturas e línguas são mais semelhantes o que traz uma maior intimidade nas amizades que formamos. Compreendo os vários erros que cometi na prova, contudo, vejo essas falhas não como derrotas, mas como inspiração para melhorar e afinar a minha habilidade. Aquilo que aprendi será fundamental para me preparar para as próximas

olimpíadas. Recomendo a todos os interessados em química que participem nas olimpíadas, já que são uma plataforma que eleva não só o nosso conhecimento, mas também nos dá outra perspetiva sobre o mundo da química. (Leonardo Aires)”;

- “Participar nas OIAQ 2025, no México, foi, para mim, uma experiência verdadeiramente marcante. Para além do desafio académico, o convívio com jovens de diferentes países e realidades tornou esta olimpíada numa oportunidade única de enriquecimento cultural e de crescimento pessoal. Cada conversa e cada momento partilhado contribuíram para criar memórias que levarei comigo para sempre. A participação nas provas permitiu-me, por um lado, pôr à prova os conhecimentos adquiridos e, por outro, explorar novos horizontes dentro da Química. Além disso, o ambiente de entusiasmo e curiosidade científica fez desta experiência algo muito mais profundo do que uma simples competição; foi um verdadeiro encontro de paixões e de ideias, que potenciou a aprendizagem, a partilha e o crescimento em conjunto. A todos os que se interessam por Química recomendo vivamente a participação empenhada nestas olimpíadas. São uma experiência ímpar que amplia o nosso saber, fortalece o espírito de colaboração e nos oferece uma nova perspetiva sobre o vasto e fascinante mundo da Química. Volto destas olimpíadas com uma motivação renovada para continuar a estudar e a desafiar-me. As OIAQ foram um lembrete de que o caminho científico é exigente, mas profundamente recompensador. Saio com novas metas, novas ideias e a certeza de que cada passo dado na aprendizagem é uma conquista que vale a pena. (Diogo Pires)”.



Delegação portuguesa nas OIAQ2025 (da esquerda para a direita: Diogo Pires, Leonardo Aires e Carlos Monteiro).

>
Carlos Monteiro
cmonteiro@ua.pt

>
Sara Pinto
smpinto@qui.uc.pt

Participação nas Olimpíadas Europeias de Ciência Experimental — EOES 2026

As Olimpíadas Europeias de Ciência Experimental (EOES) são uma competição científica anual destinada a jovens europeus com menos de 17 anos, centrada no trabalho experimental e laboratorial nas áreas da Biologia, Química e Física. Para além da vertente competitiva, a EOES constitui uma oportunidade privilegiada de confronto entre os currículos europeus no domínio das ciências experimentais, promovendo a partilha de experiências e boas práticas entre jovens e mentores de toda a Europa.

A edição de 2026 decorreu entre 2 e 9 de maio, em Lund, na Suécia, reunindo 144 estudantes de 23 países europeus. A delegação portuguesa foi composta por seis alunos, organizados em duas equipas: Dinis Teixeira (Escola Secundária Afonso de Albuquerque, Guarda), Leonardo Aires e Afonso Inácio (Escola Secundária Dr. Mário Sacramento, Aveiro), Hugo Noronha (Escola Secundária José Falcão, Coimbra), e Eduardo Cadete e Rita Morais (Colégio Moderno, Lisboa). Portugal conquistou medalhas de prata e alcançou o 4.º lugar na classificação global acumulada dos últimos três anos, entre 23 países participantes, um resultado de enorme mérito e motivo de orgulho para toda a comunidade científica nacional.

A preparação das equipas foi coordenada pelo EduQA, com o apoio dos mentores José Esperança (Química, LAQV, NOVA FCT), João Cruz (Física, LIBPhys, NOVA FCT) e Pedro Oliveira (Biologia, Ordem dos Biólogos). A participação



portuguesa resulta de uma colaboração entre o EduQA, a Sociedade Portuguesa de Física, a Sociedade Portuguesa de Química e a Ordem dos Biólogos. A SPQ felicita todos os alunos e mentores envolvidos pelo excelente desempenho, que reflete o empenho, a dedicação e o trabalho conjunto de todos os que tornaram possível mais uma presença de destaque de Portugal no panorama científico europeu.

Mais informações em eoes2026.se.

>

Carlos Monteiro

cmonteiro@ua.pt

Nova Direção do Grupo de Químicos Jovens da SPQ: Continuar a Inspirar e Unir

O Grupo de Químicos Jovens (GQJ) da Sociedade Portuguesa de Química (SPQ) iniciou um novo ciclo com a tomada de posse da direção para o mandato 2025–2027, constituída por Catarina Ribeiro (FCUP), Hugo Lapa (IST), Isabel Barbosa (FEUP), Liliana Gomes (FCT NOVA) e Simão Pandeirada (UA).

Nova Direção do GQJ da SPQ.



A nova equipa assume este desafio com entusiasmo, motivação e um forte compromisso com o fortalecimento da comunidade científica jovem em Portugal. Antes de olhar para o futuro, a direção faz questão de reconhecer o trabalho desenvolvido pela equipa que a antecedeu. Ao longo dos últimos anos, a direção cessante criou oportunidades, fomentou a colaboração e deu voz aos jovens químicos em diversos contextos, contribuindo decisivamente para a consolidação do papel do GQJ no panorama científico nacional. É sobre essa base sólida que a nova direção pretende continuar a construir.

A visão para este mandato passa por dar continuidade ao crescimento do Grupo, promovendo um ambiente inclusivo, colaborativo e inspirador, onde cada jovem químico possa desenvolver plenamente o seu potencial. Entre os principais objetivos destacam-se o reforço da ligação entre estudantes, investigadores e profissionais da indústria, a dinamização de atividades de formação, *networking* e divulgação científica, bem como a criação

de espaços de partilha e inovação capazes de estimular novas ideias, projetos e colaborações.

O GQJ assume-se, acima de tudo, como uma comunidade. Nesse sentido, a nova direção pretende envolver ativamente os seus membros na construção deste percurso coletivo, incentivando o diálogo aberto, a participação e a cooperação. A química não se faz apenas nos laboratórios; cresce também através das interações, das experiências partilhadas e da aprendizagem mútua.

Enquanto estrutura da Sociedade Portuguesa de Química, o Grupo de Químicos Jovens tem igualmente a responsabilidade de representar e promover os valores desta Sociedade. Cada iniciativa, projeto ou atividade desenvolvida pelo Grupo reflete o compromisso com a excelência científica, a ética profissional e a valorização da química em Portugal. A nova direção encara esta

missão simultaneamente como uma responsabilidade e um privilégio, procurando fortalecer a ligação entre os jovens químicos e a comunidade científica em geral, sempre alinhada com os princípios que fazem da SPQ uma referência nacional e internacional.

Com espírito de equipa, dedicação e paixão pela ciência, a nova direção pretende continuar a afirmar o GQJ como um espaço de encontro, inovação e cooperação científica. O convite fica lançado a todos os jovens químicos para participarem nesta nova etapa, contribuindo com criatividade, entusiasmo e vontade de fazer a diferença.

Mais informações sobre o GQJ: jovens.spq.pt.

>

Direção do Grupo de Químicos Jovens da SPQ

gqj@spq.pt

Molecular JE: A Júnior Iniciativa da Universidade de Coimbra

Há histórias que nascem discretas, no entusiasmo de um pequeno grupo, e que acabam por transformar a forma como vemos o mundo. A Molecular JE é uma dessas histórias. Fundada em 2017 por estudantes do Departamento de Química da Universidade de Coimbra, nasceu do desejo simples de mostrar que a Química é muito mais do que fórmulas e equações: é curiosidade, criatividade, impacto e transformação.

Hoje, com cerca de duas dezenas de membros ativos, entre estudantes de licenciatura, mestrado e doutoramento, a Molecular JE continua sediada no mesmo local onde tudo começou, o Departamento de Química da Universidade de Coimbra. Mas o seu alcance já vai muito além das paredes desta instituição. O que os move? A vontade de moldar a forma como a sociedade vê a ciência, valorizando a Química enquanto alicerce das grandes descobertas que definem o nosso quotidiano.

Entre todos os projetos que a Molecular JE dinamiza, há um que se destaca pelo seu impacto e dimensão: a Escola Molecular. Mais do que uma atividade, é um ponto de viragem para muitos estudantes. Uma porta aberta para o desconhecido. Uma experiência que mistura descoberta, comunidade e entusiasmo. A Escola Molecular é a primeira escola pré-universitária de Química organizada em Portugal. E nasceu com uma missão ousada: acordar o brilho científico nos olhos de jovens do ensino secundário, mostrando-lhes que a Química está viva em tudo.

Num modelo educativo não formal, oferecido em ambiente universitário, a Escola Molecular combina dois mundos: o Módulo Teórico, onde os estudantes exploram a Química de forma ampla e inspiradora com professores e investigadores da Universidade de Coimbra; e o Módulo Prático, onde os participantes realizam expe-

Evento Escola Molecular.



riências reais, guiados por investigadores e estudantes universitários. Não observam apenas! Fazem, testam, erram, repetem, entendem.

Os estudos publicados sobre o projeto mostram algo que quem vive a Escola Molecular já sabe de cor: ela muda perspetivas. Muitos estudantes que inicialmente viam a Química como “apenas mais uma disciplina” passam a encará-la como uma possibilidade real de futuro académico e profissional. Os resultados das primeiras edições revelaram um efeito claro: a Escola Molecular inspira, aproxima e transforma.

Para além da Escola Molecular, a Molecular JE desenvolve outras iniciativas, como o *Science Decoder*, um concurso de divulgação científica que celebra não só o conhecimento, mas também a paixão pela comunicação da ciência.

A Molecular JE acredita que o desenvolvimento científico surge da partilha de conhecimento. Por isso, a sua presença nas redes sociais é constante e criativa, com explicações científicas acessíveis, conteúdos



Sessão de divulgação com grupo de escuteiros com idades entre os 14-17 anos.

educativos e até um *podcast* onde antigos estudantes partilham os seus percursos profissionais, oferecendo motivação aos mais jovens.

Além disso, os elementos da Molecular JE realizam visitas a escolas, levando experiências químicas a crianças e jovens desde o ensino básico até ao secundário. Para muitos, é o primeiro contacto prático com a ciência. A Molecular JE é feita de pessoas. Pessoas que, com tempo e dedicação voluntária, procuram mostrar que a Química não é difícil: é desafiante. Não é distante: é presente.

Este grupo de estudantes trabalha diariamente para acrescentar valor à ciência e à sociedade. E, na verdade, trabalham também para acender algo que o mundo precisa cada vez mais: curiosidade, pensamento crítico e amor pela descoberta.

> **Anita Amorim**
CFO

molecular.je@gmail.com

> **Carolina Domingos**
CEO

molecular.je@gmail.com

Concurso “A Química por Detrás das Conservas” Distingue Criatividade e Sustentabilidade nas Escolas Portuguesas



1.º Prémio (3.º Ciclo) – *Painel de Azulejos*. Arina Tulyk, Escola Básica Padre Vítor Melícias (Torres Vedras).

A primeira edição do concurso “A Química por detrás das Conservas”, promovido pela Divisão de Ensino e Divulgação da Química da Sociedade Portuguesa de Química (DEDQ-SPQ), em parceria com o ISEP, a Cofisa, a Neonia, o José Gourmet e a Viarco, premiou os melhores trabalhos desenvolvidos por estudantes dos ensinos básico e secundário. A iniciativa teve como objetivo promover a criatividade e sensibilizar os jovens para os princípios da Bioeconomia Azul, desafiando-os a conceber rótulos para conservas de pescado inspirados na sustentabilidade, na inovação e na valorização dos recursos marinhos.

O concurso registou uma participação expressiva a nível nacional, envolvendo 98 escolas, 50 professores e 415 alunos, que submeteram um total de 308 trabalhos. Destaque-se a excelente qualidade do trabalho



1.º Prémio (Secundário) – *Sardinha Morena*. Lara Silva, Madalena Galveia e Inês Ferreira, Escola Secundária de Cacilhas-Tejo.

desenvolvido pelos alunos, cujas propostas evidenciaram uma notável maturidade científica e estética. Após uma avaliação rigorosa, na qual o júri ponderou critérios como a criatividade, a adequação ao tema, o impacto visual e a clareza, foram distinguidos os seguintes trabalhos:

3.º Ciclo

- 1.º Prémio: Arina Tulyk, Escola Básica Padre Vítor Melícias (Torres Vedras) – *Painel de Azulejos*.
- 2.º Prémio: Nina Anzel, Maria de Abreu e Paiva e Matilde Fonseca Antunes, Instituto Duarte Lemos – *Sardinha Portuguesa Enlatada*.
- 3.º Prémio: Inês Passadinhas e Maria Mestre, Escola Mouzinho da Silveira (Portalegre) – *As nossas sardinhas*.

Ensino Secundário

- 1.º Prémio: Lara Silva, Madalena Galveia e Inês Ferreira, Escola Secundária de Cacilhas-Tejo – *Sardinha Morena*.
- 2.º Prémio: Maria Afonso, Beatriz Madeira e Rebecca Neves, Escola Secundária de Cacilhas-Tejo – *Carapau da Costa*.
- 3.º Prémio: Daniela Nascimento, Escola Básica e Secundária de Velas – *Movimento Azul: A Química das Conservas*.

Menção Honrosa

- Óscar Andrade, Matilde Quintela e Íris Rocha, Escola Secundária de Cacilhas-Tejo – *Tuna del Mar*.

A elevada qualidade dos trabalhos apresentados evidenciou a capacidade dos jovens participantes para integrar conceitos científicos, sustentabilidade e expressão artística. O sucesso da iniciativa ficou também a dever-se ao empenho dos professores que incentivaram e acompanharam os alunos ao longo de todo o processo. O concurso reforça o papel da química na promoção da sustentabilidade e demonstra o potencial das escolas portuguesas para envolver os estudantes em desafios que articulam ciência, criatividade e cidadania.

>
Cristina Soares
cds@isep.ipp.pt

>
Tânia Coelho
tania.coelho@spq.pt

Projeto AGRIMA: Dar Valor aos Resíduos Através da Química

No âmbito do projeto europeu AGRIMA, a parceria entre a Divisão de Ensino e Divulgação da Química da Sociedade Portuguesa de Química (DEDQ-SPQ) e o Instituto Superior de Engenharia do Porto do Instituto Politécnico do Porto (ISEP-IPP), através do Grupo de Reação e Análises Químicas (GRAQ), permitiu desenvolver e aplicar um conjunto de atividades pedagógicas dedicadas à valorização de resíduos agroalimentares. Sob o lema “ReAge! Dá valor ao resíduo!”, esta colaboração teve como objetivo aproximar a Química da comunidade educativa e do público em geral, demonstrando como resíduos domésticos comuns podem ser transformados em produtos úteis, seguros e sustentáveis.

A iniciativa teve uma adesão significativa junto das escolas. No âmbito da parceria DEDQ-SPQ e ISEP-IPP, foi realizada uma ação de curta duração que envolveu 24 professores. Na sequência desta formação, 10 professores inscreveram diretamente os seus alunos nas atividades propostas. No total, participaram cerca de 200 alunos, do 7.º ao 12.º ano de escolaridade, com idades compreendidas entre os 11 e os 18 anos.

Estes resultados evidenciam o impacto da iniciativa na mobilização da comunidade educativa, permitindo levar a experimentação química para contextos escolares de forma acessível e articulada com temas atuais como a sustentabilidade, a economia circular e a valorização de resíduos. Através de protocolos simples e seguros, os alunos puderam explorar processos químicos como extração, adsorção, conservação de alimentos e saponificação, transformando resíduos agroalimentares em novos produtos com utilidade prática.

Os trabalhos propostos centraram-se em três tipos de resíduos comuns: borra de café, frutas e



legumes, e óleo alimentar usado. A borra de café foi utilizada em atividades relacionadas com a produção de bálsamos labiais, máscaras faciais e neutralizadores de odores, permitindo explorar conceitos como a extração de compostos lipofílicos e a adsorção de moléculas voláteis. As cascas, polpas e aparas de frutas e legumes foram valorizadas em produtos alimentares e materiais de uso pedagógico, evidenciando o aproveitamento de fibras, nutrientes e compostos aromáticos. O óleo alimentar usado foi reutilizado na produção de sabões, sabonetes líquidos, velas, lamparinas e velas flutuantes, ilustrando processos como filtração, adsorção, aromatização e saponificação.

Mais do que uma atividade de sensibilização ambiental, o projeto assumiu uma forte dimensão de Ciência Cidadã. Ao envolver professores, alunos e cidadãos comuns, a iniciativa demonstrou que a valorização de resíduos pode ser compreendida e praticada fora de laboratórios especializados, com recurso a procedimentos simples, materiais acessíveis

e enquadramento científico rigoroso. Esta abordagem permitiu aproximar a ciência da vida quotidiana, promovendo uma cidadania mais informada, participativa e responsável.

O projeto europeu AGRIMA foi financiado pelo programa Erasmus+ e coordenado pelo Instituto Politécnico do Porto. Além do IPP, participam no consórcio a Aix-Marseille Université, em França, a Associação de Viticultores do Concelho de Palmela, em Portugal, a Universidade de Novi Sad, na Sérvia, a Universidade do Egeu, na Grécia, e a Web2Learn, também da Grécia. Ao longo de dois anos, o projeto promoveu aulas *online* de acesso aberto, campos de verão internacionais, ações com empresas e atividades de ciência cidadã, com o objetivo de formar uma nova geração de agentes de mudança para a bioeconomia circular.

Os materiais desenvolvidos, incluindo os protocolos experimentais detalhados, estão disponíveis para consulta pela comunidade educativa e pelo público em geral nos seguintes links: página oficial do projeto AGRIMA: isep.ipp.pt/agrima; protocolos “ReAge! Dá

valor ao resíduo!”: spq.pt/news/projeto-agrima-reage-d-valor-ao-resduo-o-balano-de-uma-iniciativa-que-uniu-professores-e-alunos-em-prol-da-bioeconomia-circular.

Em síntese, a parceria entre a DEDQ-SPQ e o ISEP-IPP no âmbito do AGRIMA demonstrou que a Química pode ser uma ferramenta eficaz para sensibilizar, formar e mobilizar a comunidade educativa em torno da valorização de resíduos agroalimentares. Os resultados obtidos, nomeadamente a participação de 24 professores e cerca de 200 alunos, mostram que iniciativas simples, bem enquadradas e cientificamente fundamentadas podem ter um impacto concreto na promoção da sustentabilidade e da bioeconomia circular.

>

Hendrikus Nouws
han@isep.ipp.pt

>

Cristina Maria Dias Soares
cds@isep.ipp.pt

>

Tânia Coelho
tania.coelho@spq.pt

Escola da Guarda Inaugura Tabela Periódica Gigante e Novo Espaço Dedicado à Ciência

O Agrupamento de Escolas Afonso de Albuquerque, na Guarda, inaugurou, no dia 30 de março de 2026, um novo espaço dedicado à Ciência, localizado no corredor dos laboratórios. A iniciativa assinalou os 25 anos do Clube Ciência Viva da escola e reforça o compromisso da instituição com a promoção da cultura científica junto dos seus alunos.

O grande destaque do espaço é uma Tabela Periódica com cerca de 8 m de comprimento, uma instalação de forte impacto visual e educativo que se afirma como um símbolo da importância da Ciência no quotidiano escolar. Concebida com uma imagem moderna e informação acessível, a tabela convida alunos e visitantes a descobrir os elementos químicos de forma simples e apelativa.

Para além desta instalação, foram inaugurados vários modelos experimentais interativos, entre os quais uma sequência de espelhos e uma original Tabela Periódica de QR codes. Neste projeto, cada aluno do 9.º ano estudou um elemento químico e apresentou o seu trabalho através de diferentes formas de expressão criativa, incluindo canções, poemas, danças e vídeos. Os trabalhos deram origem a QR codes que foram integrados numa tabela periódica digital, transformando-a num recurso interativo.

A inauguração da Tabela Periódica Gigante



marcou igualmente a primeira edição da “Festa da Tabela”, uma iniciativa que reuniu atividades científicas, pedagógicas e lúdicas num ambiente de convívio, descoberta e celebração da Ciência.

Com esta nova infraestrutura, a escola pretende continuar a estimular a curiosidade científica dos seus alunos e a criar oportunidades de aprendizagem que aproximem a Ciência da comunidade educativa.

>

Alina Louro
alinalouro@aeaag.pt

Prémio Alberto Romão Dias 2026 Atribuído a **Pedro Teixeira Gomes**

A Sociedade Portuguesa de Química atribuiu o Prémio Alberto Romão Dias 2026 ao Professor Pedro Teixeira Gomes, docente do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa e investigador do Centro de Química Estrutural (CQE). A distinção foi entregue no dia 10 de abril, durante a 15.ª Conferência da Divisão de Química Inorgânica e Bioinorgânica (15th IBICC), realizada entre 8 e 10 de abril de 2026 na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Instituído pela SPQ em 2009, este prémio bienal distingue químicos que, através da sua atividade científica desenvolvida em Portugal, tenham contribuído de forma relevante para o avanço da Química Inorgânica e Organometálica. Com esta distinção, Pedro Teixeira Gomes junta-se a um conjunto de prestigiados laureados, entre os quais Inês Cardoso Pereira e Isabel Moura (2024), João Rocha (2021), Ana Cristina Moreira Freire (2018), António Pires de Matos (2016), Carlos C. Romão (2014) e Maria José Calhorda (2011).

A investigação desenvolvida por Pedro Teixeira Gomes centra-se na conceção e síntese de ligandos e complexos de coordenação e organometálicos com propriedades controláveis, visando aplicações em catálise, materiais luminescentes para OLEDs (*Organic Light Emitting Diodes*) e materiais magnéticos do tipo SMM (*Single-Molecule Magnets*).

Para o premiado, este galardão tem um significado particularmente especial por homenagear a memória do



Professor Alberto Romão Dias, figura marcante do Instituto Superior Técnico e seu orientador de doutoramento. Nas palavras do premiado, Romão Dias “influenciou e motivou muitas gerações de estudantes”. O investigador destacou ainda o carácter coletivo da atividade científica, partilhando este reconhecimento com os estudantes, investigadores de pós-doutoramento e colegas com quem colaborou ao longo da sua carreira, bem como com o Instituto Superior Técnico, o Centro de Química Estrutural e a Sociedade Portuguesa de Química.

Mais informações sobre o prémio em spq.pt/premios/romao-dias.

>

Carlos Monteiro

cmonteiro@ua.pt

Prémio Ramôa Ribeiro 2026 Atribuído a **Pedro Simão Freitas Mendes**

A Divisão de Catálise e Materiais Porosos (DCMP) da Sociedade Portuguesa de Química (SPQ) atribuiu o Prémio Ramôa Ribeiro 2026 a Pedro Simão Freitas Mendes durante o XIII Encontro Nacional de Catálise e Materiais Porosos (XIII ENCMP) e IV Reunião do Grupo do Carbono, realizados entre 15 e 17 de junho de 2026, no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Instituído pela DCMP da SPQ, o Prémio Ramôa Ribeiro é atribuído bienalmente a um jovem investigador que, pela obra científica produzida em Portugal, tenha contribuído significativamente para o avanço da Catálise e dos Materiais Porosos em qualquer das suas áreas de intervenção. O prémio homenageia o Professor Francisco Ramôa Ribeiro, uma das figuras mais marcantes da catálise portuguesa e internacional.

O júri decidiu atribuir o Prémio Ramôa Ribeiro 2026 a Pedro Simão Freitas Mendes, Professor Auxiliar do



Departamento de Engenharia Química do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade de Lisboa e investigador do Centro de Química Estrutural (CQE). Licenciado e doutorado em Engenharia Química pelo IST, Pedro Simão Freitas Mendes desenvolve atividade científica nas áreas da catálise heterogénea, modelação

matemática, engenharia de reação e ciência de dados aplicada à engenharia química. Os seus interesses de investigação centram-se no desenvolvimento de modelos matemáticos para compreender e prever o comportamento de catalisadores (*catalysis informatics*), bem como na conceção de processos sustentáveis através de abordagens de modelação multiescala. A sua investigação tem contribuído para o desenvolvimento de metodologias inovadoras para a compreensão e otimização de sistemas catalíticos, com impacto na conceção de processos químicos mais eficientes e sustentáveis.

Com esta distinção, a DCMP da SPQ reconhece a qualidade, originalidade e impacto da investigação desenvolvida por Pedro Simão Freitas Mendes, bem como o seu contributo para o avanço da Catálise e dos Materiais Porosos em Portugal.

Mais informações sobre o prémio em spq.pt/premios/ramoa-ribeiro.

>

Carlos Monteirocmonteiro@ua.pt

Prémio IUPAC-Richter 2026 Atribuído a **Richard B. Silverman**

O Professor Richard B. Silverman, Professor no Departamento de Química da *Northwestern University* (Estados Unidos), venceu o Prémio IUPAC-Richter 2026, atribuído pela IUPAC em parceria com a Gedeon Richter PLC, em reconhecimento pelas suas contribuições para o avanço da Química Medicinal. Richard B. Silverman é o inventor da pregabalina (Lyrica®), um dos medicamentos de origem académica mais bem-sucedidos da história, que melhorou a qualidade de vida de milhões de doentes em todo o mundo que sofrem de dor neuropática, fibromialgia, crises de epilepsia e transtorno de ansiedade generalizada. Destaca-se ainda o seu trabalho pioneiro no desenvolvimento de inibidores seletivos da óxido nítrico sintase neuronal, que abriu novas vias terapêuticas para doenças neurodegenerativas, melanoma e doenças infecciosas, bem como as suas inovações dirigidas à ornitina aminotransferase, que representam uma



estratégia inovadora para o carcinoma hepatocelular. Mais informações sobre este prémio em: efmc.info/iupac-richter-prize.

>

Carlos Monteirocmonteiro@ua.pt

Prémio Primo Levi 2025 Atribuído a **Jean-Marie Lehn**

O Professor Jean-Marie Lehn, laureado com o Prémio Nobel da Química em 1987, foi homenageado com o Prémio Primo Levi 2025, pelo seu notável contributo para a colaboração científica europeia, a responsabilidade ética e o diálogo entre a química e a sociedade. Este prémio, entregue a 3 de dezembro de 2025 em Roma, foi atribuído conjuntamente pela *Società Chimica Italiana* (SCI), pela *Gesellschaft Deutscher Chemiker* (GDCh) e pelo *Centro Internazionale di Studi Primo Levi*, e distingue cientistas cuja carreira combina excelência em investigação com um forte compromisso com os direitos humanos, responsabilidade ética e a



promoção do diálogo entre ciência e sociedade, em consonância com o legado do químico e escritor Primo Levi. Mais informações sobre este prémio em: euchems.eu/news/2025-primo-levi-prize-jean-marie-lehn.

>

Carlos Monteirocmonteiro@ua.pt

A Química das Emoções, de Nuno Maulide

Sobre o Livro

Muitas vezes assumimo-nos como seres puramente lógicos, cujas decisões dependem apenas da razão e do livre-arbítrio. Contudo, a nossa mente funciona como o palco de uma complexa e invisível orquestra molecular. Nesta nova obra, o prestigiado cientista e reconhecido divulgador Nuno Maulide convida-nos a explorar os bastidores bioquímicos que governam os nossos estados de espírito. Longe de serem meras reações abstratas, a alegria, a dor, o afeto ou até a procrastinação são coordenados por compostos bem reais, como o cortisol, a dopamina ou a serotonina. Com a clareza e a paixão pelo ensino que o caracterizam, o autor desmistifica de que forma este intrincado equilíbrio químico dita os ritmos do quotidiano e molda quem realmente somos.

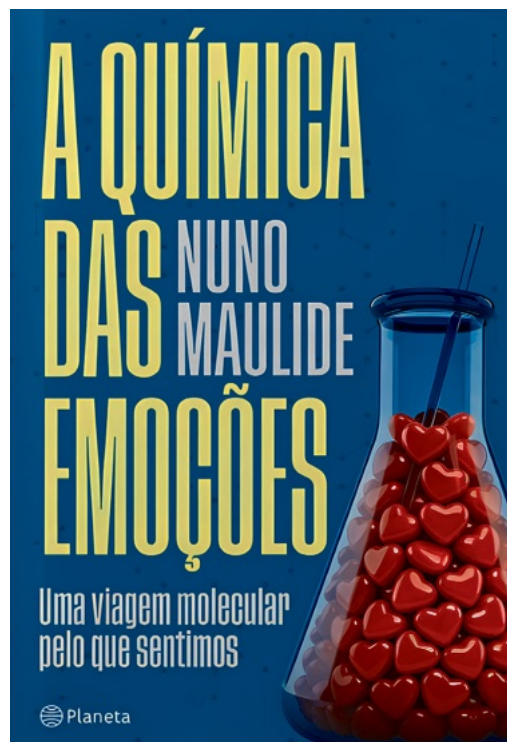
Sobre o Autor



© Barbara Mair,
Universidade de Viena

> Nuno Maulide

Nascido em Lisboa em 1979, Nuno Maulide é Professor Catedrático de Química Orgânica na Universidade de Viena. Ao longo da sua carreira passou por instituições como a Universidade Católica de Lovaina, a *École Polytechnique de Paris*, a Universidade de Stanford e o prestigiado Instituto Max Planck. Foi distinguido como Cientista do Ano na Áustria em 2018, eleito membro permanente da Academia Austríaca de Ciências em 2021 e recebeu, entre outros prémios, o *Arthur C. Cope*



Editora: Planeta de Livros, Unipessoal, Lda.

ISBN: 978-989-587-194-0

Páginas: 208

Edição: março de 2026

Scholar Award da *American Chemical Society* em 2025. É um dos raros cientistas europeus a ter sido distinguido com todas as bolsas individuais do Conselho Europeu de Investigação (ERC): *Starting*, *Consolidator* e *Advanced Grant*. Paralelamente à investigação científica, tem desenvolvido uma intensa atividade de comunicação de ciência junto do grande público através de livros, conferências, televisão, rádio e redes sociais, procurando aproximar a Química do quotidiano das pessoas.

Madame Lavoisier, Condessa de Rumford – Das luzes dos Salões ao Calor dos Canhões, de Manuel João Monte

Sobre o Livro

Em Paris, no ano de 1834, o percurso de Marie-Anne Lavoisier é recuperado por meio de entrevistas conduzidas por duas jornalistas clandestinas, numa época em que a ciência emerge da filosofia natural. Esta narrativa ficcional resgata o papel decisivo de uma mulher extraordinária na fundação da química moderna. Tradutora, ilustradora e colaboradora intelectual de Antoine Lavoisier, Marie-Anne contribuiu para a divulgação e consolidação das ideias que transformaram a compreensão da matéria e da combustão. O livro recria o ambiente efervescente dos salões do Iluminismo e os sobressaltos da Revolução Francesa, revelando os conflitos entre a ciência, a política e o poder. Evoca igualmente o destino trágico de Antoine Lavoisier, executado na guilhotina em 1794, e acompanha a trajetória posterior de Marie-Anne, incluindo a sua complexa união com o físico e militar Benjamin Thompson, Conde de Rumford. Cruzando os moldes do romance histórico com a reflexão sobre o conhecimento científico, a obra dá voz a uma figura durante muito tempo relegada para segundo plano, destacando a inteligência, a determinação e a independência de uma mulher que ajudou a moldar uma nova visão da natureza e da ciência.



> Manuel João Monte



Madame Lavoisier, condessa de Rumford

Das luzes dos salões
ao calor dos canhões

Editora: PÚBLICO – Comunicação Social, S.A.
Depósito Legal: 565331/26
Páginas: 184
Edição: junho de 2026

Sobre o Autor

Professor jubilado convidado da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP), desenvolve a sua atividade científica como investigador integrado no CIQUP/*Institute for Molecular Sciences*. No plano da investigação, conta com mais de uma centena de artigos publicados em revistas internacionais especializadas na vertente da termodinâmica molecular, integrando ainda o Conselho Consultivo da revista científica *The Journal of Chemical Thermodynamics*. Paralelamente, destaca-se pelo seu trabalho na ligação entre a ciência e a literatura; traduziu para português peças de “Ciência no Teatro” de autores de renome e assinou, sob a chancela da U.Porto Press, quatro peças em estilo dialógico — entre as quais “O Bairro da Tabela Periódica”, obra distinguida pela Sociedade Portuguesa de Autores com o Prémio José Mariano Gago.

O Mundo Que Não Sabemos Ver, de Amílcar Duque Prata e João Afonso Santos

Sobre o Livro

"O Mundo Que Não Sabemos Ver" é uma viagem fascinante ao coração invisível do universo: a química. Escrito por Amílcar Duque Prata e João Afonso Santos, este livro revela, com clareza e encanto, como tudo o que nos rodeia é química: do brilho de uma chama ao sabor de um fruto, da água que bebemos às estrelas que nos formaram. Entre explicações acessíveis e exemplos do quotidiano, os autores desmontam mitos como "sem químicos" e mostram que compreender a química é compreender o mundo, e cuidar melhor dele. Não é um livro para cientistas, é para todos os curiosos que querem entender o invisível que nos mantém vivos. Com capítulos sobre átomos, ligações, reações, sustentabilidade, materiais e energia, "O Mundo Que Não Sabemos Ver" é uma celebração da ciência, da curiosidade e da responsabilidade.

Sobre os Autores



>

Amílcar Duque Prata

Amílcar Duque Prata nasceu em Coimbra, em novembro de 1997. Está a concluir o Doutoramento em Química na Universidade de Coimbra. Desde cedo que a ciência e o modo como as coisas funcionam lhe despertavam curiosidade. Durante o ensino secundário, a participação em cursos extracurriculares de Química foi fator fundamental para a decisão da sua formação superior. É Licenciado e Mestre em Química, e realiza trabalho de investigação na área da Fotoquímica Experimental e Teórica desde 2016. Em 2022/2023 foi doutorando visitante na *École Polytechnique Fédérale* de Lausanne, na Suíça. É autor de vários artigos científicos especializados em publicações internacionais e dinamiza a rubrica "Tudo É Ciência", na Rádio Regional do Centro. Foi presidente da Associação Nacional de Estudantes de Química e da Molecular JE.



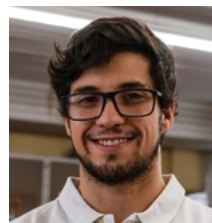
97 Creative Works

ISBN: 9789403843520

Páginas: 211

Edição: novembro 2025

Uma leitura essencial para quem quer perceber a beleza invisível da matéria, da vida e do universo.



>

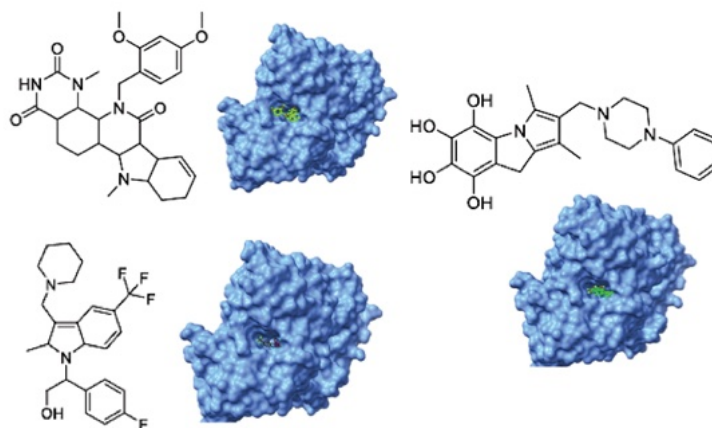
João Afonso Santos

João Afonso Santos nasceu em Coimbra, em agosto de 1997. É doutorando em Química Médica na Universidade de Coimbra desde 2022. O seu interesse pela ciência foi-se desenvolvendo durante o ensino secundário, através da participação em eventos de cariz competitivo e feiras organizadas pela UC na escola que frequentou. Licenciou-se em Química Medicinal em 2018, ano em que teve a oportunidade de iniciar trabalho de investigação na área da Química Orgânica, e concluiu o Mestrado em Química Avançada e Industrial em 2020. Ao longo do seu percurso académico, colaborou como investigador bolseiro em diversos grupos de investigação, desenvolvendo trabalho multidisciplinar nas áreas de desenvolvimento de fármacos e novos materiais, experiências que o conduziram ao início do seu doutoramento. Entre 2024 e 2025, foi presidente da Molecular JE, associação dedicada à divulgação, desmistificação e valorização da Ciência.

Inteligência Artificial Identifica Pistas Promissoras na Procura de Medicamentos para a **Doença de Alzheimer**

A doença de Alzheimer (DA), com opções de tratamento muito limitadas, é a principal causa de demência, provocada por alterações na neurotransmissão colinérgica, caracterizando-se também pela acumulação de placas beta-amilóides no cérebro, atingindo principalmente pessoas com mais de 60 anos. Esta doença afeta sobretudo as funções cerebrais que regulam o pensamento, a memória e a linguagem. A acetilcolina (ACh), um neurotransmissor vital do sistema nervoso colinérgico, é libertada da fenda sináptica dos neurónios e transmite sinais destes para o sistema nervoso e, consequentemente, o cérebro gera respostas a estímulos ambientais. Assim, a presença de ACh é fundamental para a neurotransmissão, auxiliando as funções cognitivas e a memória. Um dos principais problemas da DA é a degradação da acetilcolina que ocorre devido à ação da enzima acetilcolinesterase (AChE). A inibição da AChE pode ajudar a manter os níveis de acetilcolina e a retardar o declínio cognitivo. No entanto, os inibidores da AChE disponíveis no mercado apresentam, frequentemente, efeitos secundários e uma eficácia limitada.

M. A. Islam (*SilicoScientia Private Limited*, Bengaluru, Índia) e colaboradores identificaram 18 novas moléculas promissoras que poderiam inibir a AChE. Destas, seis mostraram uma forte atividade inibitória no modelo *in vitro*, melhor que a da galantamina (fármaco padrão). Estas moléculas podem servir como potenciais candidatos a fármacos para o tratamento da DA. Neste caso, a abordagem de investigação e a química envolveram três modelos: (1) o modelo do farmacóforo, que permitiu construir um modelo detalhado do centro ativo da enzima AChE utilizando inibidores conhecidos; (2) integração de *machine learning*, onde um modelo de aprendizagem foi treinado para prever quais as moléculas de um grande banco de dados (ZINC) que se ajustariam melhor às características do farmacóforo; (3) triagem virtual e *docking*, em que mais de 4600 inibidores conhecidos de AChE foram agrupados e acoplados ao centro ativo da enzima usando o modelo de encaixe induzido. Simulações de dinâmica molecular



Crédito: *ChemistryViews*

(50 ns) foram efetuadas para aperfeiçoar as interações proteína-ligando. Por fim, foi realizada a validação experimental, em que foram sintetizadas, e testadas *in vitro*, nove moléculas, algumas das quais apresentaram valores de IC_{50} iguais ou melhores que a galantamina, indicando forte inibição. Alguns compostos falharam devido a problemas de solubilidade, evidenciando a importância do acompanhamento experimental.

Este estudo evidencia que a combinação de IA, modelação de farmacóforos e testes laboratoriais pode acelerar a descoberta de fármacos mais eficazes para a DA. O trabalho futuro centrar-se-á na otimização das moléculas mais promissoras, melhorando as suas propriedades farmacológicas e testando-as em modelos animais.

Fontes

AI Drug Hunt Reveals Promising Alzheimer's Leads, chemistryviews.org/ai-drug-hunt-reveals-promising-alzheimers-leads (acedido em 18/12/2025).

V. S. Suryawanshi, M. L. Islam, G. E. Eldesoky, P. C. Patil, S. Bhowmick, M. A. Islam, *ChemSelect* **2025**, 10, e00492. DOI: 10.1002/slct.202500492.

>

Ana Paula Esteves

aesteves@quimica.uminho.pt

Oxidação Eletroquímica de Açúcares sem Necessidade de Purificação

A oxidação seletiva do grupo hidroxilo primário de glucopiranosídeos (denominada “oxidação C6”) a ácido carboxílico é uma transformação importante, dada a relevância dos ácidos urónicos resultantes. Por exemplo, os ácidos urónicos encontram-se nos glucosaminoglicanos

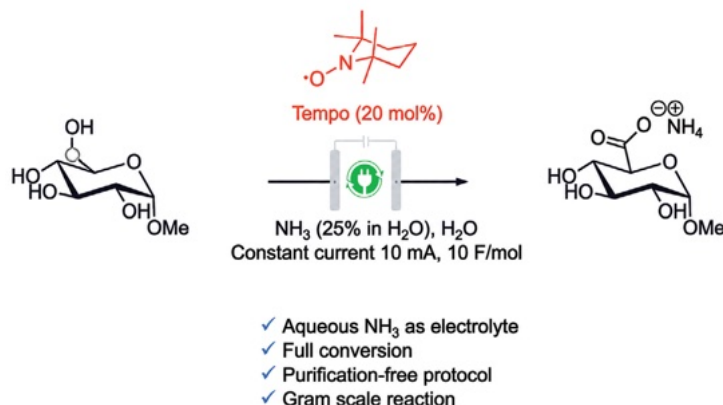
e em metabolitos de fármacos, sendo precursores do ácido ascórbico. As abordagens tradicionais são muitas vezes complexas, exigindo condições difíceis e purificação por cromatografia.

S. B. Beil (*Max-Planck-Institute for Chemical Energy*

Conversion Stiftstr, Mühlheim, Alemanha), A. J. Minnaard (Stratingh Institute for Chemistry, Universidade de Groningen, Nijenborgh, Países Baixos) e colegas desenvolveram um método eletroquímico, de elevado rendimento, que oxida seletivamente derivados de açúcar na posição C6. Neste método utilizaram amoníaco aquoso como base e eletrólito, permitindo um processo mais limpo e escalável que elimina a necessidade de etapas de purificação tradicionais. A etapa determinante consiste na oxidação eletroquímica, realizada em meio aquoso e catalisada pelo mediador TEMPO, utilizando elétrodos de grafite ou de carbono vítreo reticulado, baratos e seguros. Aplicando uma corrente elétrica moderada numa célula não dividida, o amoníaco aquoso assegura a condutividade e cria as condições básicas para oxidar o álcool primário terminal (C6) de açúcares, como o α -D-glucopiranosídeo de metilo, a ácido carboxílico, formando sais de uronato de amônio. Após a reação, a liofilização (secagem por congelamento) permitiu isolar diretamente o produto sem etapas de purificação adicionais. As condições otimizadas foram aplicadas a outros tipos de açúcar, incluindo derivados de glucosamina e galactopiranosídeos, com rendimento superior a 95%. Para os açúcares menos reativos ou que formam produtos secundários, foram aplicadas com sucesso modificações no mediador ou no tipo de elétrodo. Foi também demonstrada uma síntese à escala de um grama, o que demonstra a aplicabilidade do método.

Este método oferece uma forma limpa, escalável e eficiente de preparar ácidos derivados de açúcar sem necessidade de purificação por cromatografia, o que pode ser vantajoso na investigação biomédica, farmacêutica e nas ciências dos materiais. Esta abordagem

abre caminho a transformações mais sustentáveis de hidratos de carbono e poderá servir de inspiração para o desenvolvimento futuro de métodos electroquímicos destinados à modificação de biomoléculas.



Crédito: ChemistryViews

Fontes

Electrocyclic Oxidation of Sugars: No Purification Needed, chemistryviews.org/electrocyclic-oxidation-of-sugars-no-purification-needed (acedido a 18/12/2025).

M. Kidonakis, R. L. H. Andringa, I. M. A. Bartels, M. D. Witte, S. B. Beil, A. J. Minnaard, *ChemElectroChem* **2025**, 12, e202500140. DOI: 10.1002/celc.202500140.

>

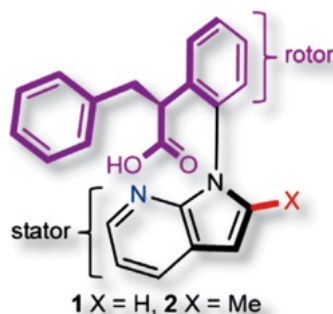
Ana Paula Esteves

aesteves@quimica.uminho.pt

Catálise Quiral na Promoção da Rotação Molecular

D. A. Leigh (Universidade de Manchester, Reino Unido, e Universidade Normal da China Oriental, China) e colaboradores criaram uma nova classe de minúsculos motores moleculares que rodam continuamente em torno de uma única ligação covalente, utilizando apenas a sua própria assimetria quiral intrínseca, sem necessidade de unidades quirais externas ou enzimas. Os motores baseiam-se num *scaffold* de azaindol-ácido feniletanoico com um único centro estereogénico. O centro quiral cria a assimetria necessária para a rotação direcional.

Os motores moleculares são constituídos por um “estator” de 7-azaindol ligado, por ligação C–N, a um rotor fenilo que possui uma cadeia lateral estereogénica de ácido alquiletanoico. O grupo ácido carboxílico catalisa a hidratação da di-isopropilcarbodiimida (DIC), que alimenta a rotação contínua e



Crédito: ChemistryViews

direcional do grupo fenilo. O centro estereogénico na cadeia lateral do rotor determina a tendência rotacional intrínseca e gera conformações diastereoméricas durante o ciclo catalítico, produzindo uma tendência sentido horário:anti-horário de 8:1

com promotor aquiral. A mudança do substituinte no centro estereogénico pode aumentar a direcionalidade no sentido horário, de 8:1 para 30:1.

A adição de um promotor de hidrólise quiral a um motor (com um substituinte metilo) permite ajustar com precisão, ou inverter, a rotação do motor: quando a quiralidade do motor coincide com a do promotor, a direcionalidade é reforçada e o motor gira mais rapidamente (aumento de cerca de 6 vezes); quando a quiralidade do motor e do promotor de hidrólise não coincidem, o motor inverte a sua rotação preferencial (proporção de 1:2 no sentido horário:anti-horário). Isto demonstra que um único motor quiral pode ser acionado para girar quer no sentido da sua direção preferencial quer na direção oposta, permitindo a compreensão de como a energia química impulsiona o movimento direcional a nível molecular, de forma análoga às proteínas motoras biológicas.

Este trabalho mostra como a assimetria molecu-

lar intrínseca pode gerar movimento sem enzimas ou promotores complexos, mimetizando as proteínas motoras biológicas. Segundo os investigadores, esta observação abre caminho para a conceção de máquinas programáveis e energeticamente eficientes à escala nanométrica, com aplicações na administração de medicamentos, em robótica molecular e em materiais sensíveis.

Fontes

Chiral Catalysis Drives Molecular Rotation, chemistryviews.org/chiral-catalysis-drives-molecular-rotation (acedido em 27/01/2026).

H. K. Liu, B. M. W. Roberts, S. Borsley, R. W. Adams, G. F. S. Whitehead, A. Hasija, D. A. Leigh, *Nat. Chem.* **2026**, 18, 1178-1185. DOI: 10.1038/s41557-025-02050-0.

>

Ana Paula Esteves

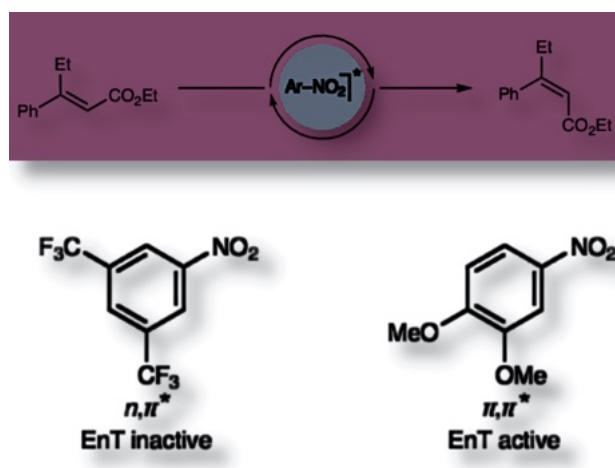
aesteves@quimica.uminho.pt

Estados Excitados Convertem Nitroarenos Comuns em **Fotocatalisadores Potentes**

E. M. Arpa, D. Leonori (Universidade RWTH de Aachen, Alemanha) e colegas investigaram como moléculas simples de nitroareno podem atuar como catalisadores acionados pela luz, transferindo energia para outras moléculas sem necessidade de luz UV de alta energia.

Os nitroarenos com estados excitados centrados no anel aromático ($3\pi, \pi^*$) funcionam muito melhor como catalisadores do que os centrados no grupo nitro ($3n, \pi^*$), demonstrando que a localização da energia na molécula é mais importante do que as regras habituais de correspondência energética. Os estados $3\pi, \pi^*$ têm vidas médias mais longas e uma melhor sobreposição com as orbitais do substrato, tornando a transferência de energia mais eficiente. Pelo contrário, os estados $3n, \pi^*$ são menos reativos porque a excitação está localizada no grupo nitro, que não interage tão bem com o substrato. Por utilização de nitroarenos com estados tripleto $3\pi, \pi^*$, reações como a isomerização *E/Z* de alquenos ou as cicloadições $[2+2]$ ocorrem mais rapidamente e sob luz visível, evitando a irradiação UV intensa ou catalisadores metálicos dispendiosos.

A equipa de investigação considera que este método constitui uma alternativa económica e sustentável aos catalisadores baseados em metais preciosos para reações químicas induzidas pela luz, tornando mais viáveis processos como a isomerização de alquenos e as cicloadições.



Crédito: ChemistryViews

Fontes

Excited States Make Common Nitroarenes Powerful Photocatalysts, chemistryviews.org/excited-states-make-common-nitroarenes-powerful-photocatalysts (acedido em 27/01/2026).

M. Rihtaršič, B. Kweon, P. T. Blyszczuk, A. Ruffoni, E. M. Arpa, D. Leonori, *Nat. Catal.* **2025**, 8, 1361-1369. DOI: 10.1038/s41929-025-01453-z.

>

Ana Paula Esteves

aesteves@quimica.uminho.pt

LigBioPack: Valorização de Lenhina em Compósitos Biodegradáveis para Embalagens Alimentares

>

Carina A. Esteves da Costa
carina.costa@fe.up.pt

●●● O crescente impacto ambiental, económico e social associado aos polímeros sintéticos, em particular no setor das embalagens, responsável por cerca de 40% do consumo de plásticos na Europa, tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas sustentáveis. Neste contexto, o ácido polilático (PLA), um polímero biodegradável de origem renovável, surge como uma solução promissora. No entanto, limitações como a baixa resistência ao impacto, a reduzida estabilidade térmica e a sensibilidade à humidade condicionam a sua aplicação industrial.

Para ultrapassar estas limitações, o projeto LigBioPack propõe a incorporação de lenhina, um polímero aromático abundante na biomassa, como reforço em compósitos de matriz de PLA. Apesar de ser produzida em grandes quantidades como subproduto da indústria da pasta e do papel, estima-se que apenas cerca de 2% da lenhina seja atualmente valorizada, sendo a restante maioritariamente utilizada para fins energéticos. Este facto evidencia o elevado potencial ainda inexplorado deste recurso renovável. As suas propriedades intrínsecas, como a atividade antioxidante e antimicrobiana e a capacidade de proteção UV,

tornam-na particularmente atrativa para aplicações em embalagens alimentares.

Este projeto foca-se na valorização de lenhinas provenientes de licor *kraft* industrial, um subproduto da indústria da pasta e do papel fornecido por uma empresa nacional, promovendo uma abordagem de economia circular. Após isolamento e caracterização, a lenhina será quimicamente modificada com o objetivo de melhorar a sua compatibilidade com o PLA. Subsequentemente, serão produzidos e estudados compósitos de lenhina/PLA, avaliando-se as suas propriedades térmicas, mecânicas e físico-químicas, bem como o impacto do tipo e teor de lenhina no desempenho dos materiais obtidos. O objetivo final consiste no desenvolvimento de materiais biodegradáveis com propriedades comparáveis às dos plásticos convencionais, aliando desempenho técnico a um menor impacto ambiental e a uma potencial redução de custos. Paralelamente, o projeto visa reforçar a valorização de subprodutos industriais e fomentar a colaboração com o setor das embalagens, contribuindo para a transição para materiais mais sustentáveis baseados em recursos renováveis.

●●●



Carina Costa

>

Ficha Técnica do Projeto

Acrónimo: LigBioPack

Financiamento: Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). Referência: 2023.12701.PEX

Equipa: LSRE-LCM - Carina Costa (IR), Alírio Rodrigues, Maria João Cabaço, Ana Jorge Pereira; LEPABE - Fernão Magalhães; ARCP - Sandra Monteiro



Exploiting Tunable Functionalization of Heterocycles for the Future Generation of Organic Lightning Devices

>

Joana R. M. Ferreira
joanarmf@ua.pt

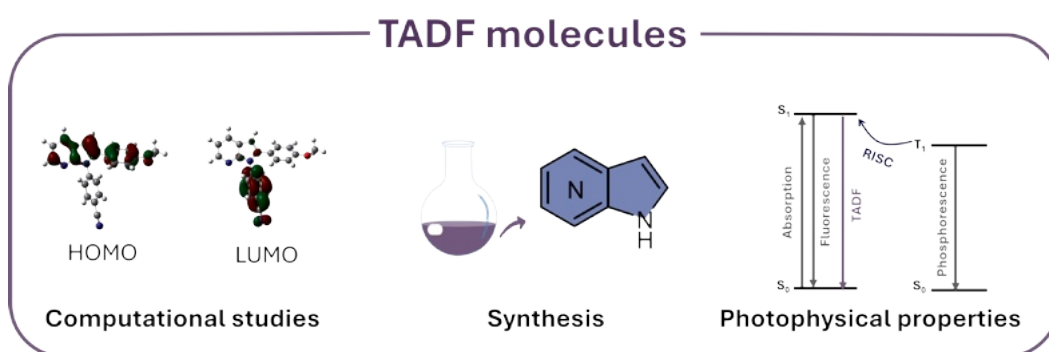
- **Funcionalização de Heterociclos para a Futura Geração de Dispositivos de Iluminação Orgânica.** Os fluoróforos de fluorescência retardada ativada por temperatura (TADF) são promissores devido à sua capacidade de aproveitar os 75% de excitações não emissivas do estado tripleto, aumentando a eficiência de dispositivos OLED (*Organic Light-Emitting Diodes*). Os derivados de *N*-heterociclos têm sido estudados tanto pelas suas propriedades farmacológicas como pela sua luminescência, incluindo como emissores em dispositivos OLED.

Uma família de derivados de azaindol foi planeada através de cálculos DFT e TD-DFT, posteriormente sintetizada e as suas propriedades fotofísicas caracterizadas. Os estudos computacionais realizados indicaram que alguns dos derivados sintetizados apresentavam características promissoras para exibir propriedades de TADF. Neste contexto, procedeu-se à investigação das suas propriedades fotofísicas, com o objetivo de avaliar o seu potencial para manifestar este mecanismo de emissão. Adicionalmente, foram também exploradas as propriedades fotofísicas de uma outra família de derivados de azaindol a par com a sua capacidade citotóxica contra células cancerígenas

A2780 dos ovários e localização intracelular.

A reatividade de acetanilidas e piridil-acetamidas na reação de Chan-Evans-Lam com alquénilvinilboranos foi investigada, e a reação foi otimizada, com vista à preparação de *E*-enamidas, intermediários sintéticos de *N*-heterociclos. Diferentes acetanilidas e piridil-acetamidas foram testadas e foi obtida uma vasta família de derivados de *E*-enamidas (39 derivados). De forma a realçar a utilidade destas enamidas, três dos derivados obtidos foram ciclizados obtendo-se os respetivos derivados de indol arilados na posição C3. Adicionalmente, foi também estudada a reatividade de (hetero)aril aminas *N*-protegidas com grupos tosilo numa reação de *N*-alquínalação com reagentes de iodo hipervalente (oito derivados). Uma reação de ciclização destes derivados foi investigada com diferentes catalisadores de ouro.

Por último, foi sintetizada uma família de sete derivados de imidazo[1,2-*a*]piridina e as suas propriedades fotofísicas foram estudadas em diferentes solventes, e racionalizadas através de cálculos DFT e TD-DFT. Estes derivados revelaram ser promissores e um bom ponto de partida para a conceção de novas moléculas fluorescentes.



Autora – Joana R. M. Ferreira (Universidade de Aveiro; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa)

Orientação – Samuel Guieu (Universidade de Aveiro); Maria Manuel Marques (Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa)

Instituição Conferente do Grau – Universidade de Aveiro

Programa Doutoral – Química Sustentável

Data – 27/01/2026

Repositório – hdl.handle.net/10773/46650

Sistemas Aquosos Bifásicos e Microfluídica: A Combinação Ideal para Alvos Biológicos

> Maria S. M. Mendes
João P. Conde
Mara G. Freire
Francisca A. e Silva*

Aqueous Biphasic Systems and Microfluidics: The Ideal Combination for Biological Targets. *The integration of aqueous biphasic systems (ABS), known for their biocompatibility and selectivity, with microfluidic technologies offering precise microscale control is transforming how biological targets are handled, enabling fully aqueous and adaptable microenvironments. This review highlights advances in this promising combination, with applications ranging from bioanalysis and biomolecule purification to the development of innovative biocompatible systems. Reported progress includes the isolation of nanoparticles, nucleic acid enrichment, protein purification, cell separation, drug encapsulation and controlled delivery, as well as biofabrication. The integration of these technologies enhances miniaturization and automation, reduces reagent consumption, and consolidates multiple operations into a single platform. Despite technical hurdles in real-world scenarios, this approach paves the way for new solutions in clinical diagnostics, personalized medicine, and biotechnology.*

A integração de sistemas aquosos bifásicos (SAB), reconhecidos pela sua biocompatibilidade e seletividade, com tecnologias microfluídicas de controlo preciso em microescala está a transformar a forma como manipulamos alvos biológicos, criando microambientes totalmente aquosos e adaptáveis. Esta revisão destaca os avanços desta combinação promissora, com aplicações que vão da bioanálise e purificação de biomoléculas à criação de sistemas biocompatíveis inovadores. São apresentados progressos no isolamento de nanopartículas, enriquecimento de ácidos nucleicos, purificação de proteínas, separação celular, encapsulação e entrega controlada de fármacos, bem como biofabricação. A integração destas tecnologias potencia a miniaturização e automação, reduz o consumo de reagentes e reúne diversas operações numa única plataforma. Apesar dos entraves técnicos em cenários reais, esta abordagem abre caminho a novas soluções para diagnóstico clínico, medicina personalizada e biotecnologia.

Sistemas Aquosos Bifásicos e Microfluídica: Fundamentos e Perspetivas de Integração

Desde a descoberta da sua formação por Beijerinck em 1896 até ao estabelecimento do seu uso em biosseparação por Albertsson em 1958, os sistemas aquosos bifásicos (SAB) evoluíram para numerosas aplicações [1,2]. Constituem uma técnica de extração líquido-líquido em meio aquoso, baseada em solutos incompatíveis que, em proporções adequadas, originam duas fases distintas, de modo análogo à separação água-azeite. Ao contrário dos sistemas convencionais com solventes orgânicos voláteis, os SAB distinguem-se por envolverem apenas fases aquosas, formadas por solutos potencialmente biocompatíveis [3].

A conceção racional de um SAB segue um procedimento integrado, ilustrado na Figura 1A. Este inicia-se pela seleção criteriosa dos seus constituintes, que podem incluir polímeros, surfactantes, sais, açúcares, aminoácidos, líquidos iónicos e solventes eutéticos profundos [4]. Para apoiar esta seleção, a Figura 1B apresenta uma matriz comparativa que sintetiza as principais características destes constituintes face a requisitos operacionais relevantes. A escolha do sistema deve considerar não apenas as propriedades individuais de cada componente, mas, sobretudo, o equilíbrio resultante do seu emparelhamento.

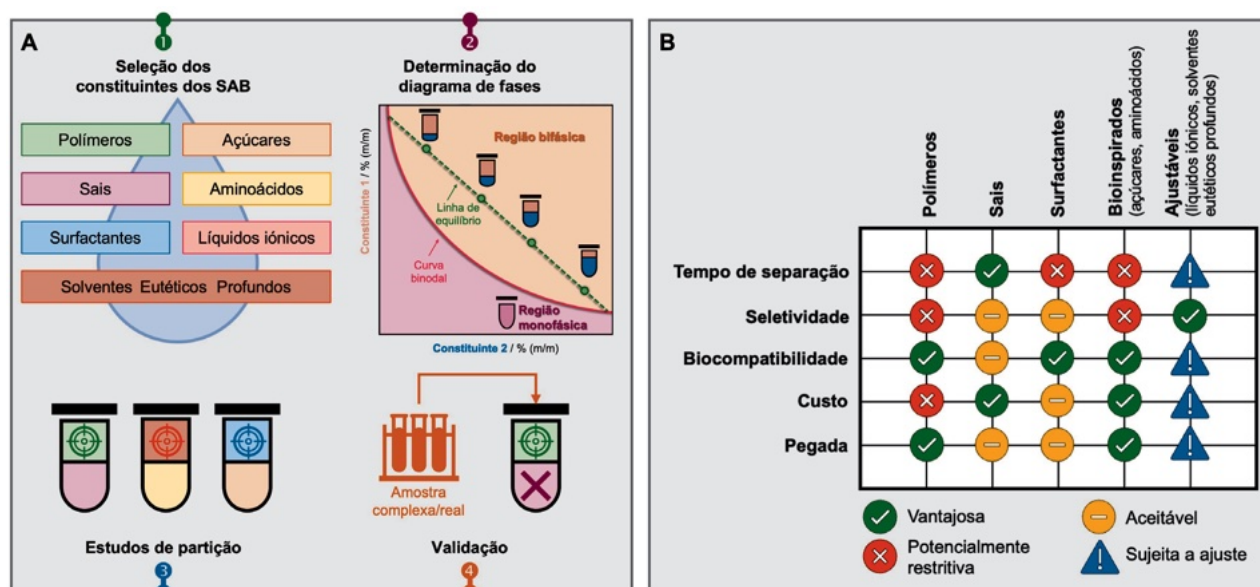


Figura 1 - Conceção de um SAB: (A) Etapas fundamentais do processo de desenvolvimento. (B) Matriz orientadora para a seleção dos constituintes em função das características pretendidas.

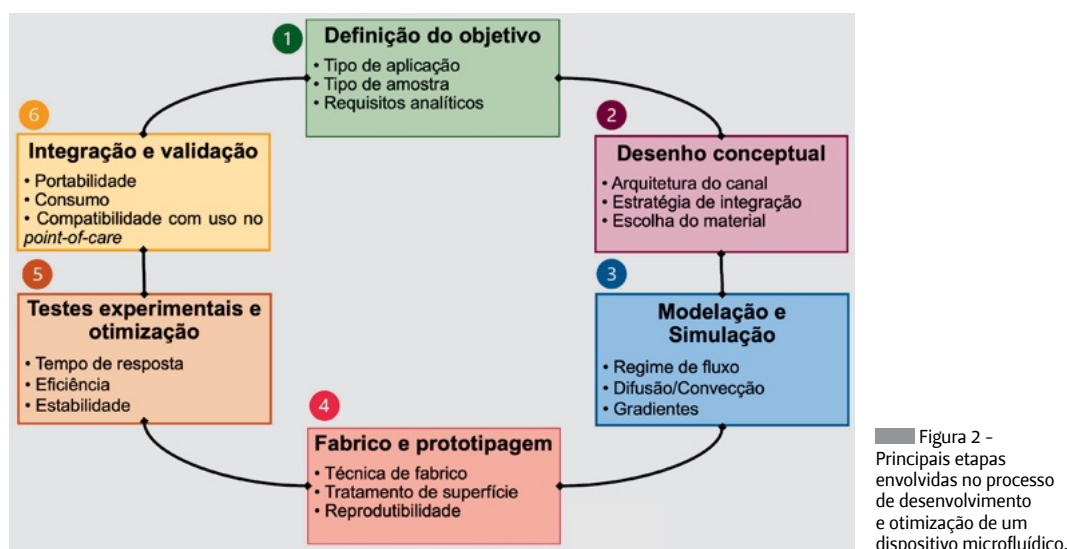
Sistemas clássicos formados por dois polímeros, tipicamente o polietileno glicol (PEG) e o dextrano (DEX), apresentam boa biocompatibilidade, embora com seletividade limitada [5]. Em alternativa, a combinação de um polímero com um sal oferece tempos de separação mais curtos, mas a força iónica elevada pode comprometer a estabilidade de compostos sensíveis [6]. Por sua vez, sistemas com surfactantes favorecem a estabilização por micelas, mas requerem maior controlo das condições operacionais, especialmente da temperatura [7]. Já os sistemas baseados em líquidos iónicos ou solventes eutéticos profundos destacam-se pela elevada seletividade e adaptabilidade em matrizes complexas [8,9]. Por fim, sistemas que contenham açúcares ou aminoácidos tendem a estar associados a baixa toxicidade e elevada biodegradabilidade, mas podem ter limitações em termos de capacidade de separação de fases [10,11].

Segue-se a determinação do diagrama de fases ternário [12]. Este serve para identificar as condições de formação das duas fases aquosas e as composições em equilíbrio, onde a curva binodal define os limites operacionais e as linhas de equilíbrio indicam a composição de cada fase [13]. Para concentração seletiva, aplicam-se misturas situadas na mesma linha de equilíbrio, permitindo o enriquecimento das espécies-alvo na fase de menor volume [14]. Procede-se a estudos de partição para avaliar coeficientes, eficiências, purezas e viabilidade, bem como o impacto de parâmetros como pH, temperatura, força iónica e aditivos [15]. Como etapa final, os sistemas são validados com matrizes reais ou complexas, comprovando a sua aplicabilidade prática [16].

Por sua vez, os dispositivos microfluídicos, com canais mais finos que um fio de cabelo, permitem manipular fluidos em escala micrométrica com alta

precisão, aproveitando o fluxo laminar e previsível característico dessas dimensões [17,18]. Desta forma, possibilitam a realização de operações complexas com uma eficiência sem precedentes [19]. A principal vantagem reside no consumo reduzido de reagentes e amostras, juntamente com a capacidade de integrar múltiplas operações num único dispositivo, reduzindo de forma significativa o tempo e a complexidade do processamento [19]. O alcance desta tecnologia abrange setores como a eletrónica ou a medicina, onde permite diagnósticos rápidos, terapias personalizadas e análises complexas [20].

O delineamento de dispositivos microfluídicos é um processo multidisciplinar, como representado na Figura 2, que começa pela definição clara da aplicação, natureza da amostra e requisitos funcionais [20]. Segue-se a conceção da arquitetura, definindo geometria dos canais, tipo de fluxo, número de entradas/saídas e materiais, incluindo polidimetilsiloxano (PDMS), policarbonato (PC), polimetilmetacrilato (PMMA), fluoropolímero (Teflon), papel, silício, vidro ou metais [21,22]. Complementarmente, a modelação e simulação computacionais ajudam a prever o comportamento do sistema, antes da prototipagem [23]. O protótipo pode posteriormente ser fabricado via litografia suave, impressão 3D, moldagem por injeção, entre outros métodos, sendo depois caracterizado quanto ao desempenho hidrodinâmico e às características analíticas [24]. Por fim, o dispositivo é integrado com elementos funcionais (sensores, atuadores, unidades de deteção) e validado com amostras reais, garantindo viabilidade em ambientes laboratoriais, industriais, clínicos ou *point-of-care* [20,24].



Embora os SAB estejam bem estabelecidos em regime descontínuo, os processos de partição são maioritariamente governados por difusão, o que frequentemente se traduz em cinéticas lentas. A transposição destes sistemas para microdispositivos altera este paradigma, uma vez que o escoamento laminar de fases imiscíveis em microcanais reduz as distâncias de difusão, promovendo separações mais rápidas [18]. Nestes microssistemas, o transporte de biomoléculas entre fases ocorre essencialmente por difusão através da interface aquosa, enquanto o deslocamento ao longo do canal é assegurado pelo escoamento do fluido, isto é, por advecção. Este regime contínuo opera a números de Reynolds muito baixos e é caracterizado por interfaces aquosas estáveis, com reduzida tensão interfacial [19,25]. Estas condições permitem uma partição eficiente e controlada, dispensando o uso de surfactantes ou ambientes lesivos. Assim, a combinação destas características alia a seletividade dos processos de extração líquido-líquido ao controlo rigoroso de volumes em microescala, possibilitando o desenvolvimento de plataformas miniaturizadas, automatizáveis e energeticamente eficientes, aptas para operações biocompatíveis e isentas de solventes tóxicos [26].

Existem diversas abordagens microfluídicas para a manipulação de alvos biológicos, desde pequenas moléculas bioativas a macromoléculas funcionais, células, tecidos e veículos de entrega de fármacos. Estas incluem sistemas em gotas óleo-água, microcanais com superfícies funcionalizadas e técnicas assistidas por campos externos [21]. Contudo, muitas destas estratégias recorrem a interfaces orgânicas, modificações de superfície ou condições operacionais exigentes, o que pode comprometer a biocompatibilidade, a robustez e a versatilidade dos dispositivos. Em resposta a estas limitações,

a integração de SAB com microfluídica representa uma abordagem tecnicamente complementar e promissora para operações realizadas em ambientes inteiramente aquosos. Explorando este potencial, o presente artigo de revisão analisa de forma integrada os avanços desta combinação tecnológica, com foco no seu uso em aplicações biológicas. São abordados processos de extração, separação, concentração seletiva e análise de nanopartículas, ácidos nucleicos, proteínas e células, bem como o desenvolvimento de tecnologias para processamento, encapsulação e entrega de fármacos, além da biofabricação de plataformas regenerativas. Por fim, discutem-se os principais desafios associados à miniaturização e translação destes microambientes aquosos para contextos reais. A Figura 3 proporciona uma visão integrada das principais funcionalidades, operações e contextos de utilização explorados, enquanto a Tabela 1 sintetiza as estratégias descritas, organizadas de acordo com a aplicação visada, o tipo de SAB, a arquitetura dos dispositivos e os alvos biológicos [27-63].

Microambientes Aquosos para o Isolamento de Nanopartículas Biológicas

Dadas as suas funções centrais na comunicação intercelular e no transporte de material genético e proteico, as nanopartículas biológicas, como vesículas extracelulares e partículas semelhantes a vírus, constituem alvos promissores para o desenvolvimento de terapias inovadoras, vacinas e biomarcadores de diagnóstico [64]. No entanto, os métodos convencionais de separação, como a ultracentrifugação, a precipitação, a cromatografia de afinidade e a filtração por membranas, são morosos, dispendiosos ou frequentemente associados a baixos rendimentos e perdas de material biológico [65,66].

A conjugação de SAB com microfluídica tem melho-

Tabela 1 - Estratégias integradas baseadas em SAB e microfluídica aplicadas à manipulação de alvos biológicos.

Aplicação	SAB	Dispositivo microfluídico	Alvo biológico
Isolamento de Nanopartículas Biológicas	PEG 1k-35k g mol ⁻¹ + DEX 40k-500k g mol ⁻¹ [27,28] ou (K ₂ HPO ₄ /KH ₂ PO ₄) ou (NH ₄) ₂ SO ₄ ou Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ [28].	Litografia suave em PDMS [27,28].	Vesículas extracelulares [27]; partículas do Vírus da Imunodeficiência Humana (VIH) [28].
Separação e Enriquecimento de Ácidos Nucleicos	PEG 6k-35k g mol ⁻¹ + DEX 10k g mol ⁻¹ [29-32].	Litografia suave em PDMS, com campo elétrico aplicado [29-32].	Fragmentos e moléculas de ADN (75-48502 pares de bases), marcados com YOYO-1, fluoresceína, Cy3 ou Cy5 [29-32].
Purificação e Análise de Proteínas	PEG 1k-35k g mol ⁻¹ + DEX 10k-500k g mol ⁻¹ [29,33-35] ou K ₂ HPO ₄ /KH ₂ PO ₄ [36-39] ou (NH ₄) ₂ SO ₄ [40] ou Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ [41] ou K ₂ HPO ₄ [42] ou KH ₂ PO ₄ [43] ou tensoativo zwitteriônico 3-10 ou SDS ou Triton X-114 [44]; Tergitol 15-S-7 + Na ₂ HPO ₄ /C ₆ H ₅ O ₇ [45]; [C ₄ mim][BF ₄] + D-frutose [46]; [N ₄₄₄₄][Cl] + K ₂ HPO ₄ /KH ₂ PO ₄ [47].	Micromaquinação em PMMA ou litografia suave em PDMS, ambos com campo elétrico aplicado [29,33,34]; litografia suave em PDMS [35,37-39,44,47]; fotolitografia e gravação húmida, em vidro sodalime [36]; montagem de capilares cilíndricos e quadrados em vidro de borossilicato [40]; gravação a laser de CO ₂ em vidro Pyrex [41]; <i>Micronit Microfluidics</i> em vidro [42,45,46]; gravação a laser e prensagem a quente a vácuo em PMMA [43].	Albumina [29,33,34,36,37,40,41,46]; γ-globulinas [34,37]; anidrase carbônica [29]; β-galactosidase [29,36]; proteína fluorescente verde [36,37]; glutathione S-transferase [36]; insulina [37]; proteína A [37]; proteínas de membrana [44]; α-amilase [42]; R-ficoeritrina [45]; ribonuclease A e a sua forma PEGuilada [38]; proteína fluorescente vermelha [39]; VEGF ₁₆₅ [43]; PSA [47]; atividade enzimática da dextranase [35].
Controlo e Processamento de Biofármacos	PEG 3,35k-8k g mol ⁻¹ + K ₂ HPO ₄ /KH ₂ PO ₄ , podendo conter NaCl [37,48-50].	Litografia suave em PDMS [37,48-50].	IgG e IgG-FITC [37,48-50].
Separação e Fracionamento Celular	PEG 3,35k-35k g mol ⁻¹ + DEX 40k-500k g mol ⁻¹ [51-53] ou K ₂ HPO ₄ /KH ₂ PO ₄ [54].	Litografia suave em PDMS [51,53]; maquinação CNC, moldagem por injeção e impressão 3D em plástico, com aplicação de força centrífuga [52]; canais hidrofóbicos tratados com solução de tricloro(octadecilsilano) em tolueno [54].	Leucócitos [51,53]; eritrócitos [51,52,54]; plasma rico em plaquetas, camada leucoplaquetária (<i>buffy coat</i>), neutrófilos [52].
Encapsulação e Biofabricação	PEG 8k-35k g mol ⁻¹ ou TN-PEG 10k g mol ⁻¹ ou TA-PEG 10k g mol ⁻¹ + DEX 32k-500k g mol ⁻¹ [55-62] ou MgSO ₄ [62]; PEG/DEX com (NaC ₆ H ₅ O ₆) _n [63].	Litografia por luz difusa traseira ou litografia suave em PDMS [55-59,62]; capilares de vidro coaxiais hidrofóbicos [60]; alinhamento coaxial de capilares de vidro [63]; ponteira de pipeta extrudida [61].	Formação de microgotículas e microcápsulas [55,57,60]; encapsulação de células (micropartículas, eritrócitos, células endoteliais); [56,57,62,63]; entrega seletiva de células e moléculas [58]; estimulação subcelular <i>in situ</i> [59]; microimpressão de biomateriais [61].

Abreviaturas e Fórmulas Químicas: [C₄mim][BF₄] – tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazólio; (NaC₆H₅O₆)_n – alginato de sódio; Cy3 – cianina-3 (fluoróforo); Cy5 – cianina-5 (fluoróforo); DEX – dextrano; FITC – isotiocianato de fluoresceína; IgG – imunoglobulina G; K₂HPO₄/KH₂PO₄ – tampão fosfato; k – milhar (10³, usado para indicar massas molares); Na₂HPO₄/C₆H₅O₇ – tampão McIlvaine; Na₃C₆H₅O₇ – citrato de trissódio; [N₄₄₄₄][Cl] – cloreto de tetrabutilamónio; PDMS – polidimetilsiloxano; PEG – polietilenoglicol; PEGuilada – conjugada com polietilenoglicol; PMMA – polimetilmetacrilato; PSA – antígeno específico da próstata; SDS – dodecil sulfato de sódio; TA-PEG – pentaeritritol tetra(aminopropil)polioxiétileno; TN-PEG – pentaeritritol tetra(succinimidooxiglutaro)polioxiétileno; VEGF165 – fator de crescimento endotelial vascular 165; YOYO-1 – corante intercalante fluorescente para ADN.

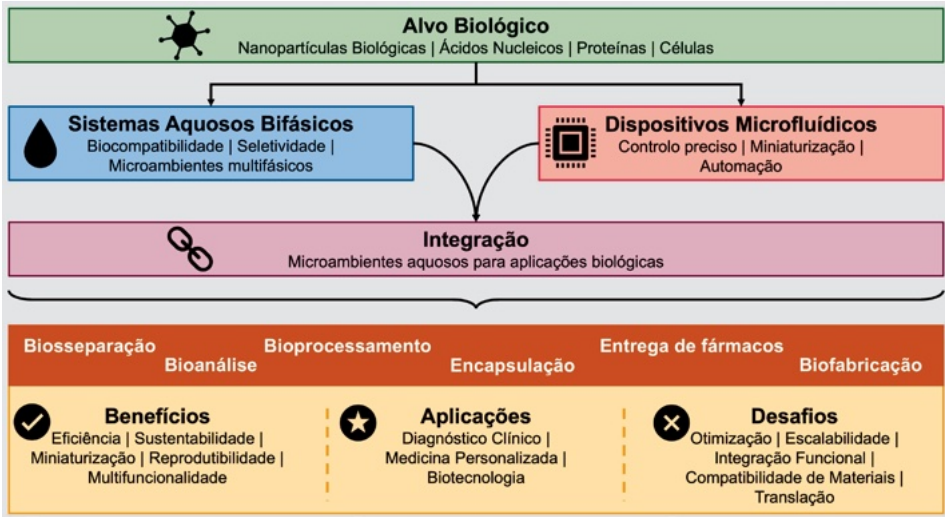


Figura 3 - Complementaridade entre SAB e microfluídica, evidenciando o potencial para gerar microambientes aquosos adequados a aplicações com alvos biológicos.

rado o isolamento e a manipulação de nanopartículas em amostras biológicas (Tabela 1). No caso das vesículas extracelulares, sistemas microfluídicos baseados em PEG e DEX demonstraram elevada eficácia na recuperação a partir de pequenos volumes de plasma humano, com eficiência superior a 80% e remoção significativa de proteínas contaminantes (65,4%) (Figura 4) [27]. No caso das partículas semelhantes a vírus, entre diversos sistemas avaliados, destacou-se o SAB constituído por PEG e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ devido ao elevado coeficiente de partição ($K_d = 4,4$) que se manteve consistente após miniaturização em microdispositivos ($K_d = 3,9$) [28].

Embora se encontre ainda numa fase exploratória, a aplicação de SAB microfluídicos na recuperação de vesículas extracelulares e partículas semelhantes a vírus permite um isolamento seletivo e escalável, essencial para aplicações em biosseparação e bioanálise. No entanto, subsistem desafios na otimização das condições de extração e na adaptação destes microssistemas a processamentos de alto rendimento, particularmente em contextos analíticos e clínicos.

Microambientes Aquosos para a Separação e Enriquecimento de Ácidos Nucleicos

Os ácidos nucleicos, nomeadamente o ácido desoxirribonucleico (ADN) e o ácido ribonucleico (ARN), são essenciais para o diagnóstico molecular, deteção de mutações e estudos de expressão génica [67]. Os métodos tradicionais de extração e purificação, com recurso a solventes químicos, precipitação alcoólica, colunas de sílica, eletroforese e cromatografia, envolvem múltiplas etapas manuais, uso de reagentes tóxicos, longos tempos de processamento e equipamentos complexos [68]. Estas limitações dificultam a automação e aplicação em dispositivos miniaturizados.

A integração de SAB com microfluídica, usando interfaces líquido-líquido sob campo elétrico e fases PEG/DEX, tem permitido controlar e visualizar a acumulação, transporte e separação de ADN (Tabela 1). Inicialmente, verificou-se que o ADN não atravessava livremente a interface, separando-se apenas sob a aplicação de campos elétricos intensos [29]. A separação dependeu fortemente do comprimento do ADN, com moléculas mais curtas a libertarem-se mais facilmente, atestando o papel da interface como filtro passivo por tamanho [30]. Transitando para um protótipo operativo, foi desenvolvido um dispositivo microfluídico para separação e concentração contínua de ADN, controlada por tamanho e campo elétrico (Figura 5) [31]. Recentemente, o fenómeno físico foi aprofundado, elucidando padrões de concentração resultantes de instabilidades moleculares [32].

Ainda que restritos, os avanços na aplicação de SAB e microfluídica para a manipulação de ADN sugerem novas abordagens de separação seletiva, com base no tamanho molecular e aplicação de campos elétricos, promissoras para o desenvolvimento de biossensores e dispositivos de diagnóstico. Requer ainda investigação adicional para clarificar os efeitos da intensidade do campo elétrico no desempenho global do sistema, de modo a assegurar a sua adaptação a diferentes tipos de amostras e alvos, incluindo o ARN.

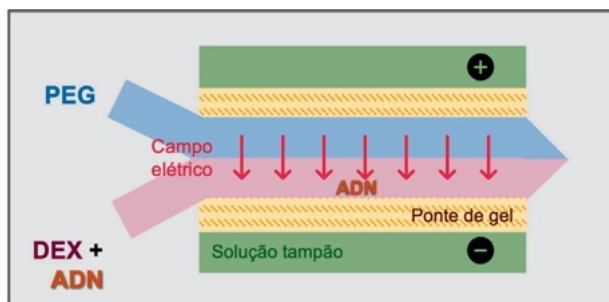
Purificação e Análise de Proteínas em Microescala

Sendo cruciais para a regulação e funcionamento dos sistemas biológicos, as proteínas desempenham um papel central em aplicações biotecnológicas e clínicas [69]. No entanto, a sua separação e análise recorrem, tradicionalmente, a técnicas como cro-



Figura 4 - Sistema microfluídico baseado em SAB para isolar vesículas extracelulares de plasma humano. Adaptado de dados apresentados na literatura [27].

Figura 5 - Sistema microfluídico baseado em SAB, seguindo uma abordagem de interface líquido-líquido sob a aplicação de campo elétrico, para separar e enriquecer ácidos nucleicos por tamanho. Adaptado de dados apresentados na literatura [31].



matografia líquida de alta eficiência, eletroforese em gel e precipitação. Apesar da ampla utilização, estas apresentam tempos de processamento prolongados, elevado consumo de reagentes, e compatibilidade limitada com processos de miniaturização [70].

Explorando a versatilidade dos constituintes dos SAB e diversas arquiteturas dos dispositivos microfluídicos, têm sido desenvolvidas abordagens para uma manipulação eficaz de proteínas (Tabela 1). A albumina, pela sua abundância em amostras biológicas e relevância como modelo, tem sido a principal proteína alvo [33,40,41,46]. Dispositivos que utilizam interfaces líquido-líquido de PEG/DEX com aplicação de campo elétrico demonstraram eficiência na partição eletroforética [33]. A substituição do DEX por sais orgânicos e inorgânicos permitiu desenvolver dispositivos capilares coaxiais com múltiplas interfaces, otimizando parâmetros como fluxo e pH, alcançando extrações superiores a 70% em tempos reduzidos [40,41]. Alternativamente, os líquidos iônicos foram introduzidos como constituintes ajustáveis dos SAB, trazendo benefícios como menor viscosidade [46].

Para além da albumina, estes sistemas permitiram separar proteínas com variadas características físico-químicas, incluindo enzimas, fatores de crescimento, γ -globulinas, hormonas e proteínas recombinantes. A partição foi controlada para otimizar separações específicas e integradas com técnicas como a microscopia de fluorescência para medições rápidas e automatizadas [29,34,37]. Além disso, microssistemas à base de PEG e K_2HPO_4/KH_2PO_4 aceleraram a extração e purificação de enzimas, como a α -amilase, atingindo equilíbrios em segundos e eficiência superior à macroescala [42].

Após validação com proteínas modelo, a robustez da tecnologia foi avaliada em amostras biológicas complexas, incluindo lisados e extratos celulares [36,44,45]. Ficou demonstrada a elevada seletividade, inclusive na recuperação eficiente de proteínas recombinantes e remoção de impurezas, como o ADN genómico (Figura 6A) [36]. Estratégias complementares com surfactantes melhoraram a purificação de proteínas de membrana e da proteína de algas R-ficoeritrina, encurtando os tempos de processamento [44,45]. No contexto da separação *in situ*, onde a separação da proteína é efetuada diretamente no seu meio de produção, técnicas baseadas em microgotículas reforçaram a importância das propriedades físico-químicas para purificação seletiva e possibilitaram a integração de múltiplas etapas (como cultura, lise, purificação e análise) num único dispositivo [38,39].

No campo da bioanálise, a combinação de SAB com microfluídica viabilizou a deteção de biomarcadores em amostras de sangue, como VEGF165 e PSA, com limites de deteção ultrabaixos e elevada remoção

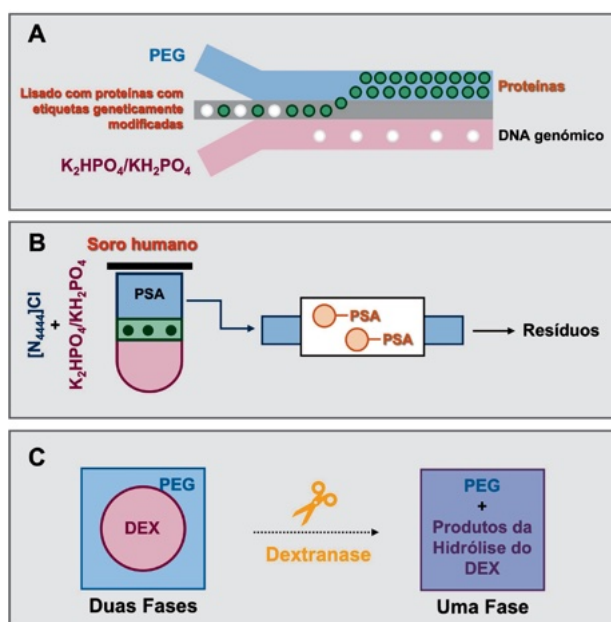


Figura 6 - Sistemas microfluídicos baseados em SAB para purificar proteínas de lisados celulares (A), detetar biomarcadores tumorais (B) e realizar análises *in situ* (C). Adaptado de dados apresentados na literatura [35,36,47]

de interferentes [43,47]. No caso específico do PSA, a extração foi realizada fora do microdispositivo, o que comprometeu a integração e automação total do processo (Figura 6B) [47]. Abordagens mais recentes comprovaram ainda a viabilidade de monitorização enzimática *in situ* através de alterações visuais nas fases do SAB, sem necessidade de marcação (Figura 6C) [35].

Face ao exposto, a integração de SAB em dispositivos microfluídicos tem possibilitado não só a manipulação de uma ampla gama de proteínas, mas também o desenvolvimento de estratégias de separação e análise *in situ*. Estas capacidades tornam-na promissora para diagnóstico molecular e ensaios bioquímicos, embora ainda requeira otimização dos constituintes e da automação dos sistemas, bem como adaptação eficiente a amostras clínicas.

Microplataformas para o Controlo e Processamento de Biofármacos

Os biofármacos, como os anticorpos monoclonais, são fundamentais no tratamento de um vasto conjunto de doenças [71]. Contudo, o seu processamento requer elevados níveis de pureza, bem como um controlo rigoroso dos custos de produção [72]. Ultimamente, têm sido consideradas abordagens que integram SAB e microfluídica, permitindo um controlo mais preciso dos processos e melhorias na eficiência de purificação (Tabela 1).

A imunoglobulina G (IgG) tem sido adotada como biofármaco modelo, sendo eficientemente extraída em dispositivos miniaturizados baseados em SAB de PEG e K_2HPO_4/KH_2PO_4 , operando em modo contínuo e aplicáveis a culturas celulares (Figura 7) [37,48,49].

Estes sistemas possibilitaram ainda a seleção rápida de condições de extração (até oito em paralelo), com variação dos pesos moleculares de PEG e dos ligandos de afinidade, integrando ainda uma etapa de isolamento com colina para reforçar a robustez em matrizes complexas, como soro fetal bovino [50].

De forma geral, a integração de sistemas aquosos bifásicos com microfluídica facilita a triagem de condições de extração e permite a miniaturização das etapas de fabrico de IgG. Apesar da evidência de preservação dos rendimentos em macroescala, continuam a existir constrangimentos quanto à aplicabilidade a outros biofármacos.

Separação e Fracionamento Celular em Microescala

A separação celular constitui uma etapa fundamental nos domínios biotecnológico e clínico, com aplicações que englobam a caracterização e o isolamento de subpopulações celulares, bem como a deteção de células raras em biópsias líquidas [73]. Embora bem estabelecidas, as técnicas convencionais como a centrifugação em gradientes de densidade, citometria de fluxo e separação magnética apresentam complexidade dos protocolos, elevado consumo de amostras e reagentes, e miniaturização limitada [74].

A integração de SAB com microfluídica tem possibilitado a separação celular com base em propriedades físico-químicas e afinidades de partição (Tabela 1). Sistemas poliméricos separaram eficazmente leucócitos e eritrócitos segundo a afinidade por DEX ou PEG (Figura 8) ou recorrendo a interfaces dinâmicas criadas por fluxo laminar e força centrífuga [51,53]. Esta abordagem permitiu ainda automatizar etapas de fracionamento e reco-

lha, preservando a integridade celular e mantendo um desempenho comparável aos métodos manuais [52]. Complementarmente, SAB salinos permitiram concentrar eritrócitos, mas revelaram instabilidade, agregação celular e baixa compatibilidade com microambientes miniaturizados [54].

Embora a sua consolidação tecnológica ainda não esteja atingida, os SAB microfluídicos destacam-se pela sua eficácia na separação e análise de células, com especial relevância para o uso de polímeros, devido à sua biocompatibilidade e capacidade de controlo espacial. Carece, no entanto, de avanços para integração em dispositivos miniaturizados para uso clínico e *point-of-care*.

Encapsulação e Biofabricação em Microssistemas Aquosos

O desenvolvimento de sistemas biocompatíveis em meio inteiramente aquoso tem impulsionado progressos na encapsulação e entrega de fármacos, bem como em processos de biofabricação [75–77]. As técnicas convencionais de encapsulação e entrega de fármacos apresentam limitações de controlo do tamanho e morfologia, instabilidade e libertação descontrolada [78,79], enquanto a biofabricação clássica enfrenta desafios relacionados com a complexidade dos processos e a viabilidade funcional [80]. Neste contexto, a conjugação de SAB com dispositivos microfluídicos tem permitido o desenvolvimento de processos de encapsulação uniforme, libertação controlada e biofabricação de estruturas biológicas complexas, assegurando controlo físico-químico e manutenção da funcionalidade (Tabela 1).

No desenvolvimento de novas estratégias de encapsulação, conseguiu-se o controlo preciso da

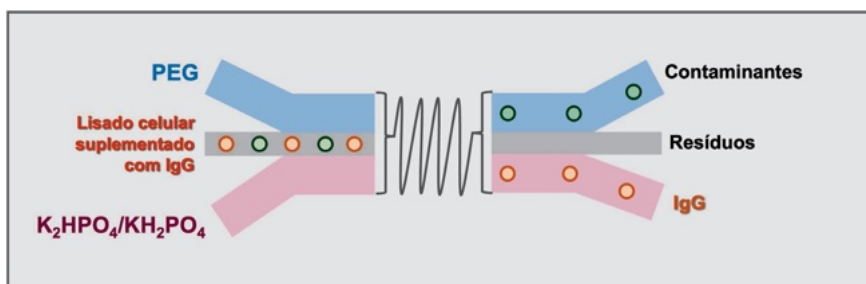


Figura 7 - Sistema microfluídico baseado em SAB para extrair IgG de lisados celulares. Adaptado de dados apresentados na literatura [49].

Figura 8 - Sistema microfluídico baseado em SAB para fracionar seletivamente células sanguíneas. Adaptado de dados apresentados na literatura [51].

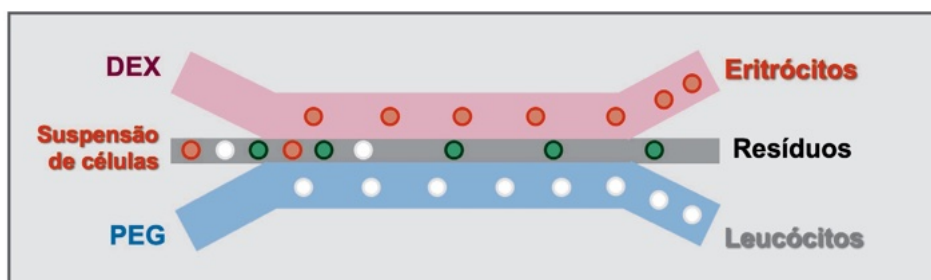
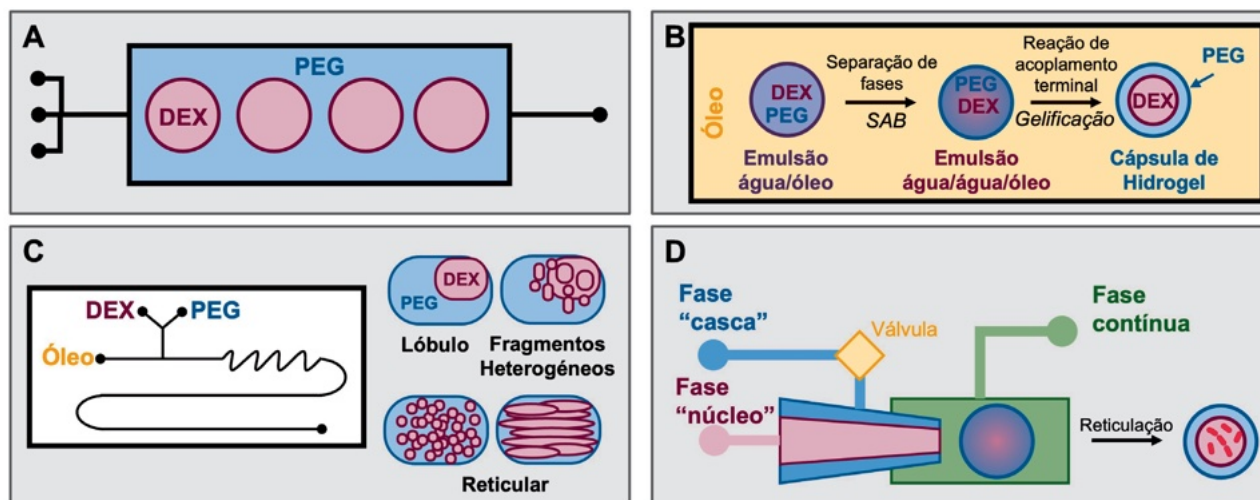


Figura 9 – Estratégias microfluídicas baseadas em SAB para gerar microgotículas (A), microcápsulas (B), microambientes heterogêneos (C) e encapsular células (D). Adaptado de dados apresentados na literatura [55,57,60,63].



formação de microgotículas em SAB baseados em PEG e DEX, utilizando microcanais arredondados multinível que facilitaram a fabricação e uniformizaram as gotículas (Figura 9A) [55]. Microcanais com largura variável eliminaram a necessidade de bombas externas, simplificando e tornando os dispositivos portáteis, com utilização comprovada na encapsulação de micropartículas e eritrócitos de rato [56]. Gotículas monodispersas de DEX e tetra-PEG separaram-se espontaneamente em fases, formando microcápsulas uniformes com núcleo aquoso e casca reticulada (Figura 9B) [60]. Além disso, a modulação da arquitetura interna permitiu criar microambientes dinâmicos e heterogêneos, com potencial aplicação na encapsulação celular (Figura 9C) [57].

No campo da encapsulação celular, sistemas PEG/MgSO₄ demonstraram maior eficiência na geração de microgotículas estáveis e biocompatíveis do que os sistemas PEG/DEX [62], embora menos eficazes na separação celular [54]. Outras abordagens envolveram a criação de microcápsulas com estrutura núcleo-cápsula na presença de alginato de sódio (Figura 9D) e o controle do posicionamento espacial de células em microcanais [58,63]. Estes sistemas permitiram manter a funcionalidade celular em suportes 3D, criar padrões e co-culturas sem adesivos sintéticos, bem como realizar tratamentos localizados com tripsina [58,63]. Adicionalmente, possibilitaram a estimulação subcelular localizada, entregando compostos a regiões intracelulares específicas para terapias direcionadas e investigação avançada [59].

Um exemplo de aplicação em biofabricação encontra-se em sistemas PEG/DEX, que possibilitaram a impressão de biomateriais com alta resolução e viabilidade celular preservada [61]. Ao promoverem

a auto-organização celular em estruturas 3D sem suportes sólidos, estes sistemas assinalam um marco promissor para a medicina regenerativa.

Mesmo sendo uma tecnologia emergente, a integração de SAB e dispositivos microfluídicos permite redefinir estratégias de encapsulação, liberação controlada e biofabricação, proporcionando condições biocompatíveis. Persistem, porém, desafios relacionados com o *design* microfluídico complexo e a caracterização das interações entre fases aquosas e os alvos biológicos.

Conclusões e Direções Futuras

Este artigo de revisão explora as perspectivas da integração de SAB com dispositivos microfluídicos para manipulação de alvos biológicos, possibilitando a criação de microambientes aquosos que respondem às limitações dos métodos clássicos. Esta união tecnológica, ao aliar eficiência e miniaturização, constitui um avanço relevante em biosseparação, bioanálise, desenvolvimento e entrega de biofármacos, bem como em processos de biofabricação.

A Tabela 2 sintetiza as vantagens complementares dos SAB e dos dispositivos microfluídicos, destacando como estas tecnologias se potencializam mutuamente em aplicações com alvos biológicos. Os SAB proporcionam alta seletividade, biocompatibilidade e preservação da integridade em matrizes complexas, enquanto a microfluídica assegura controle rigoroso de fluidos, menor consumo de reagentes e monitorização em tempo real. Ao otimizar a partição, concentração e encapsulação de biomoléculas e células, bem como a fabricação de sistemas biocompatíveis, esta combinação revela-se crucial para a implementação eficiente de aplicações biológicas em contextos reais.

Tabela 2 - Comparação das características e desempenho dos SAB, dispositivos microfluídicos e da sua integração para o desenvolvimento de microambientes aquosos aplicáveis a alvos biológicos. Os símbolos indicam a vantagem relativa de cada tecnologia em cada critério: ✓ vantajoso, ■ moderado/variável e ✗ limitado.

Critério	SAB		Microfluídica		Integração SAB + Microfluídica
Eficiência de separação	✓	Alta seletividade, modulável via composição e condições operacionais; adequado para purificação de biomoléculas.	■	Manipula microvolumes com elevada precisão; pode necessitar de módulos adicionais para melhorar a eficiência de separação.	✓ Combina a seletividade do SAB com a precisão microfluídica para separações e análises rápidas, encapsulação direcionada e biofabricação eficiente.
Volume de amostra e reagentes	■	Eficaz para volumes médios a grandes; eficiência reduzida em microvolumes devido a limitações de escalabilidade.	✓	Excelente para processamento e análise de amostras escassas, com consumo mínimo de reagentes.	✓ Minimiza volumes e reagentes, mantendo desempenho analítico em escala micro; viabiliza encapsulação e biofabricação eficientes em pequenas escalas.
Velocidade do processo	✗	Pode requerer tempos de equilíbrio relativamente longos para partição e separação completas.	✓	Permite processos rápidos, aptos para monitorização em tempo real.	✓ Integra extração, separação, encapsulação e/ou deteção em fluxo contínuo ou <i>in situ</i> , acelerando o tempo total do processo.
Sustentabilidade ambiental	■	Baseado em solventes aquosos, com alinhamento a princípios da Química Verde condicionado a constituintes seguros e biodegradáveis.	✓	Reduz significativamente o consumo de reagentes e geração de resíduos por miniaturização.	✓ Plataforma integrada de baixo impacto ambiental, promovendo análises, encapsulação e biofabricação com dependência reduzida de recursos.
Automatização e integração	✗	Geralmente manual; requer integração externa para automação.	■	Grau variável de automação, dependendo do <i>design</i> e elementos funcionais incorporados.	✓ Suporta automação completa, integrando etapas de preparação, separação, encapsulação e/ou deteção em sistemas compactos.
Custo e portabilidade	■	Custo relativamente baixo, porém, com maior necessidade de mão-de-obra e tempo operacional.	■	Investimento inicial elevado em microdispositivos; custo operacional reduzido a longo prazo.	✓ Solução económica e portátil, ideal para dispositivos <i>point-of-care</i> e análises <i>in situ</i> .

Apesar das vantagens promissoras, a integração de SAB em dispositivos microfluídicos permanece limitada, com diversidade reduzida nas combinações de componentes e arquiteturas disponíveis. A sua operacionalização enfrenta barreiras técnicas, incluindo a manipulação de fases líquidas micro-métricas, o controlo rigoroso de parâmetros para garantir a estabilidade bifásica, a extração seletiva de espécies de matrizes reais e a compatibilidade material-solvente. É ainda necessária a integração contínua com sensores, atuadores e sistemas de automação para monitorização em tempo real e translação tecnológica. Torna-se, assim, crucial adotar uma estratégia assente em quatro vertentes tecnológicas interdependentes para viabilizar estes microambientes aquosos em aplicações biológicas:

Vertente Físico-Química – Seleção cuidadosa dos constituintes do SAB e ajuste de parâmetros como pH, temperatura e força iónica para garantir estabilidade das fases, elevada eficiência de separação e compatibilidade com os materiais do microdispositivo.

Vertente Microestrutural – *Design* geométrico dos canais e controlo rigoroso dos fluxos para manter interfaces estáveis, evitar misturas indesejadas e otimizar a eficiência dos processos.

Vertente Funcional-Analítica – Integração de sensores avançados e sistemas automatizados para monitorização e controlo em tempo real, garantindo deteção rápida e precisa, reduzindo erros e permitindo acompanhamento dinâmico da libertação ou funcionalidade das biomoléculas extraídas ou encapsuladas, bem como dos sistemas biofabricados.

Vertente Translacional – Validação da reprodutibilidade e escalabilidade dos dispositivos, preservando a integridade, estabilidade e funcionalidade dos alvos biológicos. O *design* adaptável e robusto permite transitar da prova de conceito para uso laboratorial, clínico, industrial ou *point-of-care*.

Os desenvolvimentos previstos para a integração de SAB e microfluídica apontam para a criação de soluções mais orientadas para desafios concretos de separação, bioanálise e desenvolvimento de sistemas biocompatíveis, com ênfase em abordagens aplicáveis *in situ*. A miniaturização, automação e uso de novos componentes de SAB e materiais de fabrico reforçam a sua versatilidade e sustentabilidade, favorecendo a evolução para aplicações práticas. Esta combinação pode impulsionar o desenvolvimento de novas soluções em biotecnologia, medicina personalizada e diagnóstico clínico, promovendo o acesso equitativo a tecnologias analíticas e terapêuticas, mesmo em contextos com recursos limitados.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito dos projetos CICECO – Aveiro Institute of Materials, UIDB/50011/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/50011/2020), UIDP/50011/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/50011/2020) & LA/P/0006/2020 (DOI: 10.54499/LA/P/0006/2020), e INESC MN, UIDB/0536/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/05367/2020) & UIDP/0536/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/05367/2020), financiados por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). Este trabalho foi financiado por fundos

nacionais (OE), através da FCT/MCTES, no âmbito do projeto ILSurvive, PTDC/EMD-TLM/3253/2020 (DOI: 10.54499/PTDC/EMD-TLM/3253/2020). Maria S. M. Mendes agradece à FCT pela bolsa de doutoramento 2022.11229.BD (DOI: 10.54499/2022.11229.BD). Francisca A. e Silva agradece à FCT pelo contrato de investigador CEECIND/03076/2018/CP1559/CT0024 (DOI: 10.54499/CEECIND/03076/2018/CP1559/CT0024) ao abrigo do Estímulo ao Emprego Científico.

Referências

- [1] M. W. Beijerinck, *Parasiten Und Infektionskrankheiten* **1896**, 2, 679–699.
- [2] P.-Å. Albertsson, *Nature* **1958**, 182, 709–711. DOI: 10.1038/182709a0.
- [3] A. G. Teixeira, R. Agarwal, K. R. Ko, J. Grant-Burt, B. M. Leung, J. P. Frampton, *Adv. Healthcare Mater.* **2018**, 7, 1701036. DOI: 10.1002/adhm.201701036.
- [4] A. Segaran, L. S. Chua, *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, 276, 133856. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133856.
- [5] G. Tubio, B. Nerli, G. Pico, *J. Chromatogr. B Biomed. Sci. Appl.* **2004**, 799, 293–301. DOI: 10.1016/j.jchromb.2003.10.060.
- [6] M. Perumalsamy, M. I. Batcha, *Process Biochem.* **2011**, 46, 494–497. DOI: 10.1016/j.procbio.2010.09.023.
- [7] C. L. Liu, D. T. Kamei, J. A. King, D. I. C. Wang, D. Blankschtein, *J. Chromatogr. B Biomed. Sci. Appl.* **1998**, 711, 127–138. DOI: 10.1016/S0378-4347(98)00013-9.
- [8] S. Y. Lee, I. Khoiroh, C. W. Ooi, T. C. Ling, P. L. Show, *Sep. Purif. Rev.* **2017**, 46, 291–304. DOI: 10.1080/15422119.2017.1279628.
- [9] E. A. Oke, S. P. Ijardar, *Biochem. Eng. J.* **2021**, 176, 108211. DOI: 10.1016/j.bej.2021.108211.
- [10] R. Sadeghi, J. A. P. Coutinho, *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2024**, 12, 15838–15874. DOI: 10.1021/acssuschemeng.4c05745.
- [11] R. Sadeghi, B. Hamidi, N. Ebrahimi, *J. Phys. Chem. B* **2014**, 118, 10285–10296. DOI: 10.1021/jp505383r.
- [12] A. Chakraborty, K. Sen, *J. Chromatogr. A* **2016**, 1433, 41–55. DOI: 10.1016/j.chroma.2016.01.016.
- [13] J. C. Merchuk, B. A. Andrews, J. A. Asenjo, *J. Chromatogr. B Biomed. Sci. Appl.* **1998**, 711, 285–293. DOI: 10.1016/S0378-4347(97)00594-X.
- [14] H. Passos, A. C. A. Sousa, M. P. Pastorinho, A. J. A. Nogueira, L. P. N. Rebelo, J. A. P. Coutinho, M. G. Freire, *Anal. Methods* **2012**, 4, 2664–2667. DOI: 10.1039/c2ay25536g.
- [15] A. Ebrahimi, G. Pazuki, M. Mozaffarian, F. G. Ahsaie, H. Abedini, *Sci. Rep.* **2025**, 15, 16014. DOI: 10.1038/s41598-025-01195-9.
- [16] A. Dimitrijević, S. Marić, A. Jocić, D. Tekić, J. Mušović, J. S. Amaral, *Foods* **2024**, 13, 954. DOI: 10.3390/foods13060954.
- [17] G. M. Whitesides, *Nature* **2006**, 442, 368–373. DOI: 10.1038/nature05058.
- [18] J. Novotný, F. Foret, *J. Sep. Sci.* **2017**, 40, 383–394. DOI: 10.1002/jssc.201600905.
- [19] T. A. Duncombe, A. M. Tentori, A. E. Herr, *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* **2015**, 16, 554–567. DOI: 10.1038/nrm4041.
- [20] N. Wongkaew, M. Simsek, C. Griesche, A. J. Baeumner, *Chem. Rev.* **2019**, 119, 120–194. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00172.
- [21] A.-G. Niculescu, C. Chircov, A. C. Bîrcă, A. M. Grumezescu, *Int. J. Mol. Sci.* **2021**, 22, 2011. DOI: 10.3390/ijms22042011.
- [22] X. Chen, *Microchem. J.* **2016**, 127, 52–61. DOI: 10.1016/j.microc.2016.02.005.
- [23] V. Carvalho, R. O. Rodrigues, R. A. Lima, S. Teixeira, *Micromachines* **2021**, 12, 1149. DOI: 10.3390/mi12101149.
- [24] R. Garasukis, C. Hackl, A. Charvat, S. G. Mayr, B. Abel, *Curr. Opin. Biotechnol.* **2023**, 81, 102948. DOI: 10.1016/j.copbio.2023.102948.
- [25] S. Hardt, T. Hahn, *Lab Chip* **2012**, 12, 434–442. DOI: 10.1039/C1LC20569B.
- [26] T. Ahmed, C. Yamanishi, T. Kojima, S. Takayama, *Annu. Rev. Anal. Chem.* **2021**, 14, 231–255. DOI: 10.1146/annurev-anchem-091520-101759.
- [27] B. H. Han, S. Kim, G. Seo, Y. Heo, S. Chung, J. Y. Kang, *Lab Chip* **2020**, 20, 3552–3559. DOI: 10.1039/D0LC00345J.
- [28] M. J. Jacinto, R. R. G. Soares, A. M. Azevedo, V. Chu, A. Tover, J. P. Conde, M. R. Aires-Barros, *Sep. Purif. Technol.* **2015**, 154, 27–35. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.09.006.
- [29] T. Hahn, G. Münchow, S. Hardt, *J. Phys. Condens. Matter* **2011**, 23, 184107. DOI: 10.1088/0953-8984/23/18/184107.
- [30] T. Hahn, S. Hardt, *Soft Matter* **2011**, 7, 6320–6326. DOI: 10.1039/c1sm05309d.
- [31] T. Hahn, S. Hardt, *Anal. Chem.* **2011**, 83, 5476–5479. DOI: 10.1021/ac201228v.
- [32] S. Hardt, J. Hartmann, S. Zhao, A. Bandopadhyay, *Phys. Rev. Lett.* **2020**, 124, 064501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.064501.
- [33] G. Münchow, S. Hardt, J. P. Kutter, K. S. Drese, *Lab Chip* **2007**, 7, 98–102. DOI: 10.1039/b612669n.
- [34] F. Gebhard, J. Hartmann, S. Hardt, *Soft Matter* **2021**, 17, 3929–3936. DOI: 10.1039/D0SM01921F.
- [35] D. Lai, J. P. Frampton, M. Tsuei, A. Kao, S. Takayama, *Anal. Chem.* **2014**, 86, 4052–4057. DOI: 10.1021/ac500657k.
- [36] R. J. Meagher, Y. K. Light, A. K. Singh, *Lab Chip* **2008**, 8, 527–532. DOI: 10.1039/b716462a.
- [37] D. F. C. Silva, A. M. Azevedo, P. Fernandes, V. Chu, J. P. Conde, M. R. Aires-Barros, *J. Chromatogr. A* **2017**, 1487, 242–247. DOI: 10.1016/j.chroma.2016.12.036.
- [38] D. H. Cid, R. C. Gallo-Villanueva, J. González-Valdez, V. H. P. González, M. A. Mata-Gómez, *Research Square Preprint* **2021**. DOI: 10.21203/rs.3.rs-967209/v1.
- [39] F. Moreno-Sibaja, D. Hernández-Cid, J. Ceballos-Medina, D. A. Cerón-Torres, J. A. Reyes-Avendaño, R. C. Gallo-Villanueva, V. H. Pérez-Gonzalez, M. A. Mata-Gómez, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **2026**, 101, 1324–1331. DOI: 10.1002/jctb.7816.
- [40] Y. Huang, T. Meng, T. Guo, W. Li, W. Yan, X. Li, S. Wang, Z. Tong, *Microfluid. Nanofluid.* **2014**, 16, 483–491. DOI: 10.1007/s10404-013-1245-2.
- [41] F. Raji, A. Rahbar-Kelishami, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* **2021**, 163, 108370. DOI: 10.1016/j.cep.2021.108370.
- [42] U. Novak, M. Lakner, I. Plazl, P. Žnidaršič-Plazl, *Microfluid. Nanofluid.* **2015**, 19, 75–83. DOI: 10.1007/s10404-015-1550-z.
- [43] X. He, J. Xu, X. Wang, C. Ge, S. Li, L. Wang, Y. Xu, *Lab Chip* **2023**, 23, 2469–2476. DOI: 10.1039/d3lc00225j.
- [44] R. Hu, X. Feng, P. Chen, M. Fu, H. Chen, L. Guo, B. F. Liu, *J. Chromatogr. A* **2011**, 1218, 171–177. DOI: 10.1016/j.chroma.2010.10.090.
- [45] M. Seruchik, F. A. Vicente, Ž. Brečko, J. A. P. Coutinho, S. P. M. Ventura, P. Žnidaršič-Plazl, *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2020**, 8, 17097–17105. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c05042.
- [46] U. Novak, A. Pohar, I. Plazl, P. Žnidaršič-Plazl, *Sep. Purif. Technol.* **2012**, 97, 172–178. DOI: 10.1016/j.seppur.2012.01.033.
- [47] F. C. Flora, S. B. Relvas, F. A. e Silva, M. G. Freire, V. Chu, J. P. Conde, *Biosensors* **2023**, 13, 334. DOI: 10.3390/bios13030334.
- [48] D. F. C. Silva, A. M. Azevedo, P. Fernandes, V. Chu, J. P. Conde, M. R. Aires-Barros, *J. Chromatogr. A* **2012**, 1249, 1–7. DOI: 10.1016/j.chroma.2012.05.089.
- [49] E. Espitia-Saloma, P. Vázquez-Villegas, M. Rito-Palomares, O. Aguilar, *Biotechnol. J.* **2016**, 11, 708–716. DOI: 10.1002/biot.201400565.

- [50] E. J. S. Brás, R. R. G. Soares, A. M. Azevedo, P. Fernandes, M. Arévalo-Rodríguez, V. Chu, J. P. Conde, M. R. Aires-Barros, *J. Chromatogr. A* **2017**, 1515, 252–259. DOI: 10.1016/j.chroma.2017.07.094.
- [51] M. Tsukamoto, S. Taira, S. Yamamura, Y. Morita, N. Nagatani, Y. Takamura, E. Tamiya, *Analyst* **2009**, 134, 1994–1998. DOI: 10.1039/b909597g.
- [52] B.-U. Moon, L. Clime, D. Brassard, A. Boutin, J. Daoud, K. Morton, T. Veres, *Lab Chip* **2021**, 4060–4070. DOI: 10.1039/D1LC00680K.
- [53] J. R. Soohoo, G. M. Walker, *Biomed. Microdevices* **2009**, 11, 323–329. DOI: 10.1007/s10544-008-9238-8.
- [54] K. Nishimura, C. Matsushita, K. Yamashita, M. Murata, K. Tsukagoshi, *Anal. Sci.* **2023**, 39, 537–546. DOI: 10.1007/s44211-022-00259-4.
- [55] D. Lai, J. P. Frampton, H. Sriram, S. Takayama, *Lab Chip* **2011**, 11, 3551–3554. DOI: 10.1039/c1lc20560a.
- [56] D. Choi, E. Lee, S.-J. Kim, M. Han, *Soft Matter* **2019**, 15, 4647–4655. DOI: 10.1039/C9SM00469F.
- [57] S. H. S. Lee, P. Wang, S. K. Yap, T. A. Hatton, S.A. Khan, *Biomicrofluidics* **2012**, 6, 022005. DOI: 10.1063/1.3694841.
- [58] J. P. Frampton, D. Lai, H. Sriram, S. Takayama, *Biomed. Microdevices* **2011**, 13, 1043–1051. DOI: 10.1007/s10544-011-9574-y.
- [59] Q. Zhang, T. Xie, X. Yi, G. Xing, S. Feng, S. Chen, Y. Li, J.-M. Lin, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15, 45640–45650. DOI: 10.1021/acsami.3c09665.
- [60] T. Watanabe, I. Motohiro, T. Ono, *Langmuir* **2019**, 35, 2358–2367. DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b04169.
- [61] H. Tavana, S. Takayama, *Biomicrofluidics* **2011**, 5, 013404. DOI: 10.1063/1.3516658.
- [62] M. Mastiani, N. Firoozi, N. Petrozzi, S. Seo, M. Kim, *Sci. Rep.* **2019**, 9, 15561. DOI: 10.1038/s41598-019-51958-4.
- [63] K. Zhu, Y. Yu, Y. Cheng, C. Tian, G. Zhao, Y. Zhao, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, 11, 4826–4832. DOI: 10.1021/acsami.8b19234.
- [64] D. K. Jeppesen, Q. Zhang, J. L. Franklin, R. J. Coffey, *Trends Cell Biol.* **2023**, 33, 667–681. DOI: 10.1016/j.tcb.2023.01.002.
- [65] M. Y. Konoshenko, E. A. Lekchnov, A. V. Vlassov, P. P. Laktionov, *Biomed. Res. Int.* **2018**, 2018, 8545347. DOI: 10.1155/2018/8545347.
- [66] N. Kushnir, S. J. Streatfield, V. Yusibov, *Vaccine* **2012**, 31, 58–83. DOI: 10.1016/j.vaccine.2012.10.083.
- [67] M. Moccia, B. Pascucci, M. Saviano, M. T. Cerasa, M. A. Terzidis, C. Chatgililoglu, A. Masi, *Int. J. Mol. Sci.* **2023**, 25, 146. DOI: 10.3390/ijms25010146.
- [68] S. C. Tan, B. C. Yiap, *Biomed. Res. Int.* **2009**, 2009, 574398. DOI: 10.1155/2009/574398.
- [69] R. Montoya, P. Deckerman, M. O. Guler, *BBA Adv.* **2025**, 7, 100149. DOI: 10.1016/j.bbadv.2025.100149.
- [70] S. Liu, Z. Li, B. Yu, S. Wang, Y. Shen, H. Cong, *Adv. Colloid Interface Sci.* **2020**, 284, 102254. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102254.
- [71] K. Rajewsky, *Nature* **2019**, 575, 47–49. DOI: 10.1038/d41586-019-02840-w.
- [72] U. Gottschalk, *Biotechnol. Prog.* **2008**, 24, 496–503. DOI: 10.1021/bp070452g.
- [73] M. C. Miller, P. S. Robinson, C. Wagner, D. J. O'Shannessy, *Cytometry Part A* **2018**, 93, 1234–1239. DOI: 10.1002/cyto.a.23571.
- [74] N. Rahmanian, M. Bozorgmehr, M. Torabi, A. Akbari, A.-H. Zarnani, *Prep. Biochem. Biotechnol.* **2017**, 47, 38–51. DOI: 10.1080/10826068.2016.1163579.
- [75] Q. Ma, Y. Song, W. Sun, J. Cao, H. Yuan, X. Wang, Y. Sun, H. C. Shum, *Adv. Sci.* **2020**, 7, 1903359. DOI: 10.1002/adv.201903359.
- [76] Y. Chao, H. C. Shum, *Chem. Soc. Rev.* **2020**, 49, 114–142. DOI: 10.1039/C9CS00466A.
- [77] S. Daradmare, C.-S. Lee, *Colloids Surf. B Biointerfaces* **2022**, 219, 112795. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2022.112795.
- [78] S. Misra, S. K. Mitra, *Adv. Mater. Interfaces* **2025**, 12, 2400402. DOI: 10.1002/admi.202400402.
- [79] T. C. Ezike, U. S. Okpala, U. L. Onoja, C. P. Nwike, E. C. Ezeako, O. J. Okpara, C. C. Okoroafor, S. C. Eze, O. L. Kalu, E. C. Odoh, U. G. Nwadike, J. O. Ogbodo, B. U. Umeh, E. C. Ossai, B. C. Nwanguma, *Heliyon* **2023**, 9, e17488. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17488.
- [80] J. Soroia, W. Yanen, Q. Wei, K. Zhang, T. Lu, B. Zhang, *Biodes. Manuf.* **2018**, 1, 265–279. DOI: 10.1007/s42242-018-0029-7.

>

***Francisca A. e Silva**

Departamento de Química, Universidade de Aveiro.

CICECO – Instituto de Materiais de Aveiro.

Investigadora Júnior no CICECO – Instituto de Materiais de Aveiro e no Departamento de Química da Universidade de Aveiro, ao abrigo do Programa de Estímulo ao Emprego Científico da FCT. Desenvolve processos sustentáveis de extração e pré-tratamento de amostras biológicas e integra estas tecnologias em dispositivos miniaturizados, criando estratégias avançadas de bioanálise focadas no diagnóstico clínico e soluções *point-of-care*.

francisca.silva@ua.pt

ORCID.org/0000-0001-6735-5437

>

João P. Conde

Departamento de Bioengenharia, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Instituto de Engenharia de Sistemas

e Computadores – Microsistemas e Nanotecnologias (INESC-MN).

Professor Catedrático no Departamento de Bioengenharia do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, onde exerce atualmente o cargo de Presidente do Departamento. É também Diretor do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores – Microsistemas e Nanotecnologias (INESC-MN). As suas áreas de investigação incluem dispositivos inovadores de filmes finos, sistemas microfluídicos *lab-on-chip* para biossensores e plataformas *cell-chip* com aplicações biomédicas.

joao.conde@tecnico.ulisboa.pt

ORCID.org/0000-0002-5677-3024

>

Mara G. Freire

Departamento de Química, Universidade de Aveiro.

CICECO – Instituto de Materiais de Aveiro.

Investigadora Coordenadora no CICECO

– Instituto de Materiais de Aveiro e no Departamento de Química da Universidade de Aveiro, onde é Vice-Diretora do CICECO e Vice-Presidente do Conselho Científico da Universidade. Dedicase ao desenvolvimento de processos sustentáveis e biocompatíveis para o processamento de biofármacos, implementando soluções inovadoras para a produção, purificação, preservação, formulação e libertação controlada.

maragfreire@ua.pt

orcid.org/0000-0001-8895-0614

>

Maria S. M. Mendes

Departamento de Química, Universidade de Aveiro.

CICECO – Instituto de Materiais de Aveiro.

Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores – Microsistemas e Nanotecnologias (INESC-MN).

Mestre em Bioquímica pela Universidade de Aveiro, encontra-se atualmente a

realizar o doutoramento em Engenharia Química na mesma instituição, em colaboração com o Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores – Microsistemas e Nanotecnologias (INESC-MN). A sua tese centra-se no desenvolvimento de técnicas de pré-tratamento de soro humano, com vista à sua integração com dispositivos microfluídicos para a deteção *point-of-care* de biomarcadores tumorais.

msilvinamm@ua.pt

ORCID.org/0000-0001-6631-9821

Sistemas de Defesa Antioxidantes

>
 Lisa Sequeira
 Sofia Benfeito
 Fernanda Borges*
 Daniel Chavarria*

Antioxidant Defense Systems. *The overproduction of free radicals, particularly reactive oxygen species (ROS), is closely associated with the disruption of redox signaling pathways and the onset of oxidative stress. These reactive oxygen species can cause extensive damage to biomolecules, and the mechanisms underlying their interactions remain an active area of research. To counteract the harmful effects of ROS, eukaryotic cells possess endogenous antioxidant defense mechanisms that rapidly metabolize these toxic species, thereby minimizing free radical-induced injuries. These antioxidant defenses comprise both enzymatic and non-enzymatic components, which act in a balanced and coordinated way. This article aims to explore the types and roles of antioxidant systems involved in cellular protection against oxidative damage.*

A produção excessiva de radicais livres, principalmente as denominadas espécies reativas de oxigénio (EROs), está frequentemente associada à perturbação das vias de sinalização redox e à alteração do stress oxidativo. As espécies reativas de oxigénio podem induzir danos em biomoléculas, e os mecanismos pelos quais interagem continuam a ser um tópico de investigação relevante. Para combater os efeitos nocivos significativos das EROs, as células eucariotas possuem mecanismos endógenos de defesa antioxidante que metabolizam estas espécies tóxicas, prevenindo rapidamente lesões graves provocadas por radicais livres. A defesa antioxidante é composta principalmente por sistemas enzimáticos e não enzimáticos, que cooperam de forma equilibrada e coordenada. Este artigo tem como objetivo analisar o tipo e o papel dos sistemas antioxidantes disponíveis para a defesa celular contra danos oxidativos.

Introdução

Embora o oxigénio seja um componente essencial aos organismos aeróbios, a formação *in situ* de EROs (espécies reativas de oxigénio) ocorre no decurso de diversos processos biológicos. No entanto, quando produzidos em excesso, estes subprodutos metabólicos podem constituir uma ameaça aos sistemas biológicos mais vulneráveis, desempenhando um papel crucial em diversos processos de dano oxidativo de moléculas biológicas e consequentes efeitos prejudiciais no organismo [1].

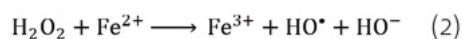
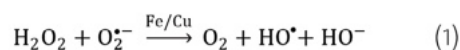
As principais EROs são o anião radical superóxido ($O_2^{\bullet-}$), o peróxido de hidrogénio (H_2O_2), o oxigénio singuleto (1O_2) e o radical hidroxilo ($HO^{\bullet}$). Nesta designação estão ainda classicamente englobados o ozono (O_3), os óxidos de nitrogénio (NO_2 , NO), os radicais peróxido ($RO_2^{\bullet}$), os radicais alcóxido ($RO^{\bullet}$) e o ácido hipocloroso ($HOCl$) [2]. As espécies consideradas mais reativas, devido à sua eletrofilicidade, são o $HO^{\bullet}$ e 1O_2 seguidas do $O_2^{\bullet-}$ e do H_2O_2 , sendo estas formas interconvertíveis através de processos redox [3].

Em situação de homeostasia existe um equilíbrio entre a formação deste tipo de espécies oxidantes e os mecanismos de proteção antioxidante endógenos. Contudo, quando os níveis de produção de EROs aumentam, ou os níveis de defesas antioxidantes

endógenas diminuem, ocorre uma perturbação do equilíbrio oxidante/antioxidante, a favor do primeiro. Este desequilíbrio redox é designado de *stress oxidativo*. Neste contexto, as EROs podem originar danos oxidativos em moléculas biológicas (ex.: ácidos nucleicos, ácidos gordos polinsaturados, proteínas, hidratos de carbono), provocando danos a nível celular, os quais podem estar na origem de diversas doenças [4].

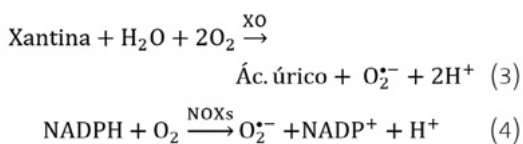
2. Espécies reativas de oxigénio: reatividade vs. toxicidade

A toxicidade do $O_2^{\bullet-}$ e do H_2O_2 nos sistemas vivos é devida essencialmente à sua conversão em $HO^{\bullet}$ através de processos catalisados por metais de transição, como o ferro e o cobre, que envolvem as reações de Haber-Weiss (1) e de Fenton (2) [3].



Os estados de *stress oxidativo* podem também estar associados a um aumento da atividade dos sistemas

enzimáticos capazes de gerar EROs, tais como a xantina oxidase (XO) (3) e as NADPH oxidases (NOXs) (4) [3].



A ativação de outros sistemas enzimáticos, nomeadamente da atividade de fosfolipases, ciclo-xigenases e lipoxigenases, e a ativação da resposta fagocitária podem igualmente contribuir para uma produção excessiva de EROs [5].

As reações de Haber-Weiss e de Fenton, anteriormente mencionadas, são maioritariamente responsáveis pela formação do radical HO• ao nível dos sistemas biológicos. O radical HO• pode danificar os sistemas vivos participando essencialmente em três tipos de reações, das quais resultam, em regra, radicais menos reativos [6]:

- abstração de hidrogénio (ex.: reação com álcoois ou fosfolípidos);
- adição (ex.: reação com moléculas contendo anéis aromáticos);
- transferência de eletrões (ex.: reações envolvendo compostos orgânicos e inorgânicos).

As reações do radical HO• com moléculas biológicas situadas na vizinhança (moléculas-alvo) estão na origem de uma série de reações radiculares em cadeia que ocorrem a nível intracelular.

3. Sistemas de defesa antioxidantes endógenos

A maior parte dos organismos vivos possui sistemas de defesa antioxidantes intra- e extracelulares. A destoxificação das EROs é um dos pré-requisitos da vida aeróbia, implicando a existência de vários sistemas de defesa a nível celular, os quais desempenham um papel antioxidante. Nos sistemas biológicos aeróbios, animais ou vegetais, é possível encontrar sistemas enzimáticos e não enzimáticos, com propriedades antioxidantes, os quais protegem os componentes celulares dos processos oxidativos. A primeira linha de defesa antioxidante é composta por enzimas, sendo complementada por compostos de natureza química diversa [7,8].

Os sistemas endógenos de defesa antioxidante atuam essencialmente a três níveis: prevenção, remoção (*scavenging*) e reparação (Tabela 1) – e são constituídos por sistemas enzimáticos (ex.: superóxido dismutases [SODs], catalase e peroxidases) e não enzimáticos (antioxidantes endógenos, como por exemplo vitaminas E e C) [7].

A inter-relação entre as EROs e os sistemas antioxidantes endógenos é um processo complexo.

Os mecanismos pelos quais atuam não podem ser interpretados de forma individual e independente, uma vez que atuam de forma cooperativa e em cascata.

Tabela 1 – Exemplos de sistemas de defesa antioxidante endógenos.

Sistemas de Defesa Antioxidante Endógenos
1. Antioxidantes preventivos: previnem/minimizam a formação de radicais livres. a) Decomposição não radicalar de hidroperóxidos e de H ₂ O ₂ • catalase • glutathione peroxidase (GSH-Px) • glutathione-S-transferases (GSTs) b) Sequestração de metais de transição por quelatação • transferrina • ferritina • ceruloplasmina • albumina c) <i>Quenching</i> de oxigénio ativo • superóxido dismutases (SODs) • carotenoides
2. Antioxidantes <i>scavengers</i> de radicais: interceam radicais inibindo ou minimizando as reações de iniciação e interrompendo a propagação de processos radiculares. a) Enzimáticos • superóxido dismutases (SODs) • glutathione peroxidase (GSH-Px) • catalase b) Não enzimáticos hidrofílicos • vitamina C • ácido úrico • glutathione (GSH) c) Não enzimáticos lipofílicos • vitamina E • carotenoides • ubiquinol
3. Antioxidantes de reparação: participam na reparação e remoção de biomoléculas que sofreram danos oxidativos. • proteases • lipases • sistemas enzimáticos de reparação do DNA • transferases

3.1. Sistemas de defesa antioxidante enzimáticos

Os sistemas enzimáticos envolvidos nos processos de destoxificação e/ou eliminação de radicais livres a nível celular encontram-se amplamente distribuídos nos organismos vivos.

As enzimas constituem a primeira linha de defesa celular contra os danos oxidativos, estando a seu cargo a remoção de EROs como o O₂•⁻ e o H₂O₂. As SODs e peroxidases (ex.: glutathione peroxidase, catalase) caracterizam-se por uma elevada especificidade celular, apresentando localizações sub-celulares distintas e bem definidas, atuando, por vezes, de um modo complementar. A sua atividade catalítica envolve a participação de cofatores metálicos (ex.: cobre, zinco, manganésio, ferro e selénio) [7].

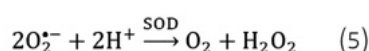
É consensual que os sistemas enzimáticos podem interagir dinamicamente exercendo a sua ação por um, ou mais, dos seguintes mecanismos [9]:

- *scavenger* de radicais livres;

- *quencher* de oxigênio singuleto;
- complexação de íons de metais de transição;
- inibição da atividade enzimática (ex.: lipoxigenase [LOX]);
- ação redutora.

3.1.1. Superóxido dismutases

O sistema enzimático SOD é constituído por três metaloproteínas, contendo ferro, cobre ou magnésio nos seus locais ativos, as quais são ubíquas nos sistemas biológicos animais e vegetais. As três metaloproteínas catalisam a dismutação do radical superóxido ($O_2^{\bullet-}$) segundo a reação (5):

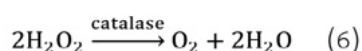


A reação descrita pode também ocorrer por via não enzimática, mas a uma velocidade consideravelmente menor [10].

O H_2O_2 formado pode por si só ser citotóxico, causando indiretamente danos oxidativos ao nível do DNA e das biomembranas, promovendo a libertação de Ca^{2+} a nível intracelular e a ativação de proteases e nucleases dependentes de Ca^{2+} . Alguns dos danos associados estão também relacionados com a formação de $HO^{\bullet}$, segundo as reações descritas anteriormente em (1) e (2) [10].

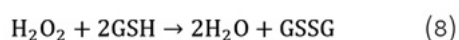
3.1.2. Catalase

A catalase está presente nos tecidos animais e vegetais em organelos sub-celulares denominadas peroxissomas. Esta metaloenzima desempenha um papel importante na sequestração intracelular do H_2O_2 , promovendo a sua decomposição em H_2O e O_2 (6) [11].



3.1.3. Glutathiona peroxidases

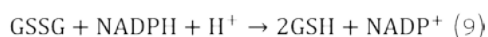
O sistema enzimático glutathiona peroxidase (GSH-Px) é constituído por enzimas que, nos animais, contêm selénio no seu centro ativo. Este sistema está amplamente presente nas plantas superiores, embora, ao contrário das suas homólogas animais, as GPxs vegetais contenham cisteína no centro ativo e utilizem preferencialmente tioredoxina como agente redutor. Nos animais, as enzimas GSH-Px promovem a redução de peróxidos (como hidroperóxidos orgânicos e H_2O_2) à custa da conversão da glutathiona reduzida (GSH) em glutathiona oxidada (GSSG) (7,8) [12].



É importante realçar que, a nível biológico, existe

um grau elevado de cooperação entre os diferentes sistemas enzimáticos descritos. Assim, a SOD, a glutathiona peroxidase e a catalase são corresponsáveis por manter, em condições fisiológicas, o equilíbrio de concentrações das EROs.

Muitas reações a nível celular, radiculares e não radiculares, podem conduzir à oxidação do grupo tiol a dissulfureto, por exemplo, à oxidação da GSH a GSSG. A regeneração da GSH a partir da sua forma oxidada é mediada pela ação da glutathiona redutase (GSSG-redutase). Trata-se de um sistema de regeneração dependente de NADPH, o qual é fundamental para a manutenção dos valores elevados da relação GSH/GSSG observados nas células normais (>100:1) e, portanto, na proteção do processo de oxidação (9) [11,13].



O processo redox de regeneração da glutathiona é cíclico e ocorre a uma velocidade de reação superior à dos processos responsáveis pela síntese de novas moléculas de glutathiona ou pela sua degradação [13].

3.2. Sistemas de defesa antioxidante não enzimáticos

Uma segunda linha de defesa antioxidante, fundamental nos sistemas biológicos, é aquela assegurada por sistemas do tipo não enzimático, nomeadamente os de natureza lipofílica (ex.: α -tocoferol, β -caroteno) e hidrofílica (ex.: ácido ascórbico, glutathiona). De forma geral, estes sistemas antioxidantes (Tabela 1) atuam na remoção de radicais livres residuais — ou seja, aqueles que não foram eliminados pelos antioxidantes preventivos — contribuindo para a inibição ou minimização das reações de iniciação e propagação dos processos em cadeias radiculares [14].

3.2.1. Vitaminas

A vitamina E compreende oito estruturas diferentes que partilham um núcleo comum, o anel 6-cromanol, e uma cadeia alquílica lateral localizada na posição 2. Na Natureza, distinguem-se duas classes principais: os tocoferóis (α , β , γ e δ) e os tocotrienóis. A cadeia lateral dos tocoferóis, designada por fitol ou fitil, deriva do 4',8',12'-trimetiltridecilo, enquanto a dos tocotrienóis apresenta três ligações duplas localizadas nas posições 3', 7' e 11'. O 2R,4'R,8'R- α -tocoferol (Figura 1), conhecido por α -tocoferol, é o composto mais abundante na Natureza e possui maior atividade biológica, devido a fatores estereoeletrônicos e indutivos. Por esta razão, na literatura científica, os termos vitamina E e α -tocoferol são frequentemente utilizados como sinónimos, embora os restantes derivados também apresentem atividade antioxidante [15].

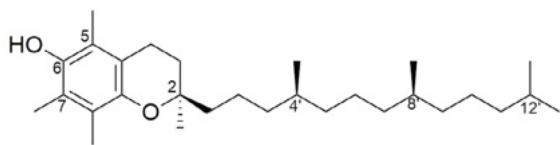


Figura 1 - Estrutura do 2R,4'R,8'R-α-tocoferol.

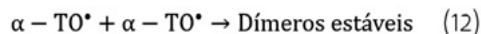
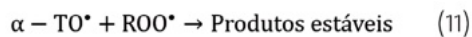
O α-tocoferol (vitamina E) encontra-se presente em numerosos sistemas biológicos animais e vegetais, onde desempenha *in vivo* uma atividade importante como antioxidante, participando nos processos de proteção das células e dos tecidos em relação a danos oxidativos induzidos pelos radicais livres [16]. O α-tocoferol, presente sobretudo ao nível das membranas biológicas, inibe ou retarda a peroxidação lipídica devido fundamentalmente à sua capacidade *scavenger* de radicais peróxido e *quencher* de $O_2^{2\bullet}$, impedindo desta forma o ataque dos referidos radicais não só a cadeias de ácidos gordos, mas também a proteínas, ao DNA e a outros tipos de substratos [16,17].

O mecanismo pelo qual o α-tocoferol exerce a sua ação tem sido objeto de vários estudos e pode ser descrito, de forma resumida, em duas etapas [17].

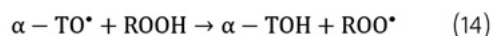
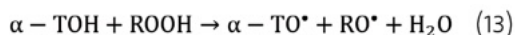
Na primeira etapa (*scavenging* de radicais peróxido), os radicais peróxido ($ROO^\bullet$) são captados por transferência de um átomo de hidrogénio proveniente do grupo hidroxilo (OH) do α-tocoferol, originando hidroperóxidos lipídicos ($ROOH$) e o radical α-tocoferoxilo ($\alpha\text{-TO}^\bullet$), também designado de radical cromanoxilo (10).



Numa segunda etapa (terminação e regeneração de α-tocoferol), de modo irreversível, o radical α-tocoferoxilo pode reagir com outros radicais peróxido, ou entre si, formando produtos não radicalares estáveis e, conseqüentemente, conduzindo à terminação do processo oxidativo (11,12). Os radicais α- $\text{TO}^\bullet$ não conseguem abstrair hidrogénio a partir de outras moléculas lipídicas, devido à deslocalização do eletrão desemparelhado através da estrutura aromática do anel cromanol. Contudo, esta estabilização não impede que ocorram as reações de terminação e regeneração.



Alguns estudos demonstraram que, em concentrações elevadas, o α-tocoferol pode originar a formação de radicais, atuando assim como agente pró-oxidante [18]. A capacidade de abstração de hidrogénio por parte do α-TOH ou do radical α- $\text{TO}^\bullet$, a partir de lípidos insaturados peroxidados, poderá constituir uma possível explicação para o efeito pró-oxidante observado nessas condições (13,14) [19].



A atividade antioxidante sinérgica entre o α-tocoferol e outros antioxidantes já foi demonstrada [20]: o radical α- $\text{TO}^\bullet$ formado no interior das biomembranas pode migrar para a superfície membranar, onde o α-TOH pode ser regenerado pela ação de um dador de hidrogénio. É provável que a vitamina C (ascorbato) interaja com o α- $\text{TO}^\bullet$ promovendo a sua reconversão e, desta forma, minimizando os danos oxidativos associados à peroxidação lipídica ao nível das lipoproteínas e das estruturas membranares. Além disso, alguns compostos de enxofre, como a glutatona, bem como o ubiquinol (forma reduzida da coenzima Q, $CoQH_2$), poderão igualmente participar no processo de regeneração *in vivo* do α- $\text{TO}^\bullet$ a α-TOH [20].

A vitamina C (ácido L-ascórbico) é hidrofílica e está envolvida em diversas reações metabólicas *in vivo*. A sua estrutura é constituída por um anel lactónico pentagonal, o qual possui um grupo enodiol adjacente a uma função carbonilo e dois centros quirais (posições 4 e 5) (Figura 2). O grupo enodiol, conjugado com o grupo carbonilo, é considerado o grupo funcional responsável pela participação do composto em processos redox [15].

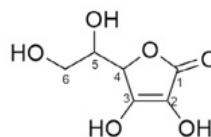


Figura 2 - Estrutura do ácido ascórbico.

O ácido ascórbico (AscH_2) é um diácido ($pK_1 = 4,25$; $pK_2 = 11,8$). Em solução aquosa ocorre a ionização do hidroxilo enólico em C-3, da qual resulta a formação do monoânion ascorbato (AscH^-) cuja carga se encontra estabilizada por ressonância e pelo estabelecimento de pontes de hidrogénio intramoleculares (Figura 3). A perda de um segundo próton implica a formação de uma carga negativa adicional, observando-se a formação de uma nova estrutura (Asc^{2-}) [21].

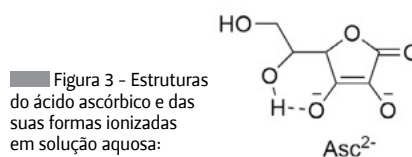
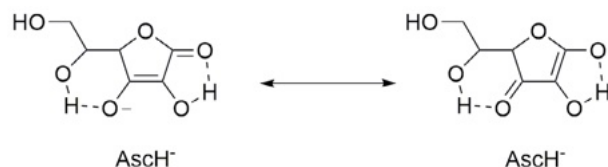


Figura 3 - Estruturas do ácido ascórbico e das suas formas ionizadas em solução aquosa: monoânion ascorbato (AscH^-) e dianion ascorbato (Asc^{2-}).

As propriedades antioxidantes da vitamina C estão geralmente associadas a processos redox envolvendo apenas a transferência de um elétron do monoânion ascorbato. Neste contexto, o AscH^- atua como *scavenger* de EROs e de outros radicais livres (ex.: radicais tiolo) [21].

A atividade sinérgica do ascorbato com outros sistemas de defesa antioxidante a nível celular foi já demonstrada. Cita-se a sua participação na regeneração do α -tocoferol (α -TOH) a partir do radical α -tocoferoxilo (α -TO $\cdot$) [21]. O ascorbato pode também agir como agente pró-oxidante na presença de metais de transição (ex.: ferro, cobre) devido à capacidade do Fe^{3+} e do Cu^{2+} serem reduzidos a Fe^{2+} e Cu^+ , respetivamente. Na presença de H_2O_2 , estes iões podem estimular a formação de $\text{HO}\cdot$ por meio da reação de Fenton, induzindo assim a peroxidação lipídica. O grau de oxidação dos metais de transição e a concentração de ascorbato determinam a atuação deste composto como agente pró- ou antioxidante [22].

3.2.2. Carotenoides e retinoides

Os carotenoides constituem um grupo de compostos isoprenoides, que apresentam diversas características estruturais, partilhando em comum longas cadeias carbonadas e um extenso sistema de ligações duplas conjugadas. Na Natureza ocorrem sob múltiplas configurações, sendo a configuração *trans* total a mais frequente [9,23].

Os carotenoides podem atuar como agentes antioxidantes em sistemas biológicos [9]. As propriedades antioxidantes do β -caroteno (Figura 4) – o carotenóide mais abundante – estão diretamente relacionadas com a sua estrutura química. O seu elevado grau de insaturação permite uma ampla deslocalização eletrónica, o que facilita a desativação de moléculas eletronicamente excitadas [24].

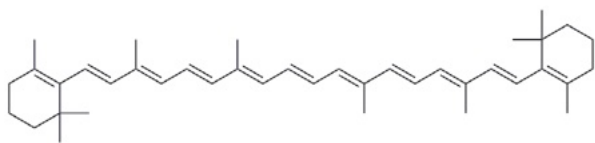


Figura 4 - Estrutura do β -caroteno.

Alguns autores referem que o β -caroteno pode atuar como *scavenger* de radicais peróxido em condições de baixa pressão parcial de oxigénio, devido ao seu extenso sistema de ligações duplas conjugadas. No entanto, essa mesma característica estrutural também torna a molécula suscetível ao ataque desses radicais [25].

Os retinoides de origem natural apresentam, tal como os carotenoides, propriedades antioxidantes. Este facto pode estar relacionado com a sua origem biossintética, visto serem precursores dos carotenoides

ou resultarem de reações de cisão da cadeia lateral destes. Possuem igualmente um sistema de ligações duplas conjugadas (ex.: retinol; Figura 5), o que lhes confere capacidade para interagir com espécies reativas e estabilizar radicais livres [26].

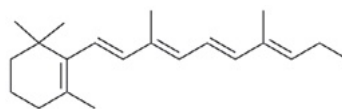


Figura 5 - Estrutura do retinol.

3.2.3. Tioantioxidantes

Os compostos contendo grupos tiol participam em inúmeros processos redox a nível celular devido à sua grande suscetibilidade à oxidação. São considerados como antioxidantes intracelulares, atuando diretamente através do *scavenger* de radicais livres ou participando em reações enzimáticas [27,28]. Destaca-se aqui o papel da glutatona (GSH) (Figura 6) e da *N*-acetilcisteína (NAC) (Figura 7).

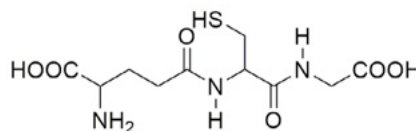


Figura 6 - Estrutura da glutatona (GSH).

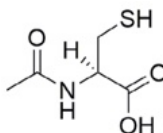


Figura 7 - Estrutura da *N*-acetilcisteína.

A glutatona encontra-se predominantemente na forma reduzida (GSH) e está presente, em concentrações relativamente elevadas, em quase todas as células e tecidos animais, assim como na maior parte das plantas. Quimicamente é um tripeptídeo (L- γ -glutamil-L-cisteinil-glicina) sintetizado a nível intracelular a partir dos aminoácidos glutamina, cisteína e glicina [29].

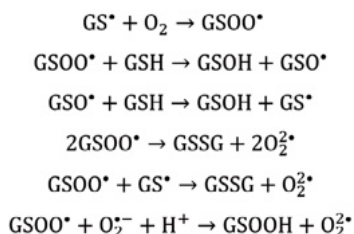
A GSH intervém no armazenamento e transporte do enxofre reduzido, essencial à síntese proteica, participa na formação dos desoxirribonucleótidos precursores do DNA e em vários mecanismos de proteção celular. Desempenha igualmente um papel importante na inativação de xenobióticos e na biossíntese de compostos endógenos [29]. A sua participação na manutenção do estado redox celular resulta quer da sua atuação como substrato ou co-substrato de várias enzimas, quer como *scavenger* de radicais livres e ERO [27,29].

Em condições de *stress* oxidativo, o estado redox da glutatona é alterado, podendo a acumulação da

forma oxidada (GSSG) resultar de um aumento da oxidação da GSH e/ou de uma diminuição da taxa de redução da GSSG [13].

A GSH desempenha um papel antioxidante importante, atuando como agente redutor de ligações dissulfureto (S-S) formadas durante processos patológicos, contribuindo para a reativação de enzimas e outras proteínas [11,28]. A interação da glutatona com outros antioxidantes hidrofílicos e lipofílicos está também descrita, podendo contribuir para a manutenção do ascorbato na sua forma reduzida [9,18] e participar na regeneração de antioxidantes lipofílicos, como o α -tocoferol, através da redução dos seus respectivos radicais [12,27].

Além do seu papel antioxidante, foi proposta a participação da glutatona em reações radiculares potencialmente prejudiciais. O grupo sulfidrilo (-SH) da GSH pode doar um átomo de hidrogênio ao radical hidroxilo ($\text{HO}^\bullet$), formando o radical glutationilo ($\text{GS}^\bullet$). Este radical pode envolver-se em reações de propagação de radicais livres, contribuindo para o aumento do *stress* oxidativo. Estudos recentes destacam que, a formação do radical $\text{GS}^\bullet$ pode, em determinadas condições, intensificar o dano oxidativo [30]. Tal efeito deve-se à sua capacidade de reagir com o oxigênio molecular (O_2) e com a GSH, originando uma série de espécies sulfuradas reativas que podem amplificar a formação de radicais derivados do oxigênio, conforme o seguinte esquema:



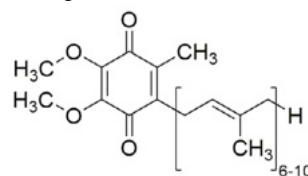
A NAC (Figura 7) desempenha um papel significativo nas reações mediadas por radicais livres em sistemas biológicos, tanto através do seu grupo tiol, atuando como *scavenger* de ERO, como por meio da sua participação na síntese de glutatona (L- γ -glutamil-L-cisteinil-glicina). O grupo tiol da NAC permite-lhe reagir diretamente com o radical hidroxilo ($\text{HO}^\bullet$), H_2O_2 e HOCl , embora a velocidade de reação com H_2O_2 seja relativamente lenta. Além disso, a NAC serve como precursora da cisteína, contribuindo para a síntese de glutatona, um antioxidante endógeno crucial na defesa contra o *stress* oxidativo [31].

3.2.4. Outros sistemas de defesa antioxidante

A coenzima Q_{10} (CoQ_{10} ; Figura 8), também conhecida por ubiquinona (na sua forma oxidada) ou ubiquinol (na forma reduzida), está presente em praticamente

todas as membranas celulares, com especial relevância na mitocôndria, onde participa ativamente na cadeia de transporte de eletrões. Além do seu papel bioenergético, o ubiquinol é um dos antioxidantes lipofílicos mais eficazes *in vivo*, capaz de neutralizar diretamente radicais livres como $\text{ROO}^\bullet$, $\text{O}_2^\bullet$ e $\text{HO}^\bullet$. Adicionalmente, a CoQ_{10} participa na regeneração de α -tocoferol (vitamina E) a partir do seu radical α -tocoferoxilo, contribuindo para a terminação de processos oxidativos em meio lipídico. A sua atividade é particularmente significativa em tecidos com atividade metabólica elevada, como o coração, fígado e rins. A capacidade da ubiquinona/ubiquinol de se reciclar continuamente entre formas oxidada e reduzida reforça a sua eficácia como componente do sistema antioxidante celular [32].

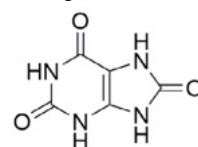
Figura 8 - Estrutura da co-enzima Q_{10} .



A L-carnitina é um composto quaternário de amônio, biossintetizado a partir da lisina e da metionina, cuja principal função é o transporte de ácidos gordos de cadeia longa para o interior da mitocôndria, onde são β -oxidados. Contudo, para além do seu papel metabólico, a L-carnitina possui propriedades antioxidantes indiretas, nomeadamente através da estabilização de membranas celulares, quelando iões metálicos (como Fe^{2+}), e reduzindo a formação de EROs durante o *stress* oxidativo mitocondrial. Estudos recentes indicam que a L-carnitina pode atenuar danos oxidativos em tecidos sujeitos a hipóxia ou isquemia, promovendo a integridade celular e diminuindo a peroxidação lipídica [33].

O ácido úrico (Figura 9) é um produto final do catabolismo das purinas e constitui um dos principais antioxidantes presentes no plasma humano. Apresenta uma elevada capacidade de neutralização de radicais peróxido ($\text{ROO}^\bullet$), oxigênio singuleto ($^1\text{O}_2$) e iões peroxinitrito ($\text{ONOO}^\bullet$), competindo em eficácia com outros antioxidantes hidrossolúveis. Em condições fisiológicas, o ácido úrico pode ter efeitos protetores ao nível endotelial e neurológico, contudo a sua concentração deve ser rigorosamente controlada, uma vez que níveis elevados estão associados a efeitos pró-oxidantes e processos inflamatórios [13].

Figura 9 - Estrutura do ácido úrico.



Outros compostos com funções antioxidantes incluem dipéptidos (como a carnosina), aminoácidos sulfurados (como a taurina), a bilirrubina (produto da degradação do heme) e a melatonina, que além da sua função reguladora do ritmo circadiano, atua como *scavenger* de EROs [32].

3.2.5. Sistemas de defesa fitoantioxidantes

Os sistemas de defesa antioxidante do tipo não enzimático não se limitam aos compostos de origem natural anteriormente referidos. Muitos outros compostos, especialmente os de origem vegetal, são obtidos através da dieta e contribuem significativamente para a proteção contra os danos oxidativos [34].

A maioria dos fitoantioxidantes são compostos fenólicos. O seu papel protetor nos processos redox está associado à sua capacidade *scavenger* de radicais livres, *quencher* do oxigênio singuleto, bem como às suas propriedades de quelação de metais de transição e modulação da atividade de determinadas enzimas, como a LOX [34,35].

3.2.5.1. Fenóis simples

Sob a designação de fenóis simples incluem-se compostos monofenólicos (ex.: *p*-cresol, 3-etilfenol – Figura 10a, 3,4-dimetilfenol), a vanilina (4-hidroxi-3-metoxibenzaldeído – Figura 10b), o ácido vanílico (Figura 10c) e compostos difenólicos (como a hidroquinona – Figura 10d), entre outros, os quais demonstraram possuir atividade antioxidante [36-38].

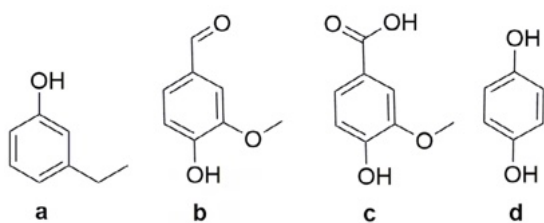


Figura 10 – Estrutura do 3-etilfenol (a), vanilina (b), ácido vanílico (c) e hidroquinona (d).

3.2.5.2. Ácidos fenólicos

Os ácidos hidroxibenzóicos (por exemplo, ácidos protocatecuico, siríngico e gálico – Figura 11a) e os seus derivados ocorrem em grande abundância nas plantas. Estes compostos têm demonstrado uma atividade antioxidante significativa, atribuída principalmente à sua capacidade *scavenger* de EROs [39]. Da mesma forma, os derivados do ácido cinâmico (ex.: ácidos *p*-cumárico, cafeico – Figura 11b, ferúlico – Figura 11c, sinápico e clorogénico) também apresentam propriedades antioxidantes, sendo capazes de neutralizar diversos radicais livres, incluindo $O_2^{\bullet-}$, $HO^{\bullet}$ e $ROO^{\bullet}$, entre outros [40].

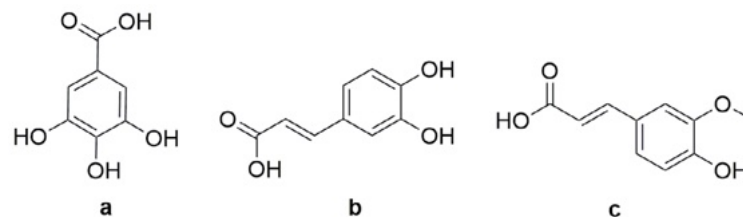


Figura 11 – Estrutura do ácido gálico (a), cafeico (b) e ferúlico (c).

3.2.5.3. Flavonoides

Os flavonoides estão amplamente distribuídos no reino vegetal, especialmente em plantas comestíveis. A sua estrutura química baseia-se no esqueleto do difenilpropano $C_6-C_3-C_6$ (Figura 12a), constituído por dois anéis fenólicos (A e B) ligados por uma cadeia de três carbonos que forma o anel heterocíclico C. As subclasses de flavonoides diferenciam-se pelo padrão de substituição do anel C e pela posição do anel B (Figura 1). As principais subclasses incluem flavonas, isoflavonas, flavonóis, flavanonas, flavanóis e antocianinas [41].

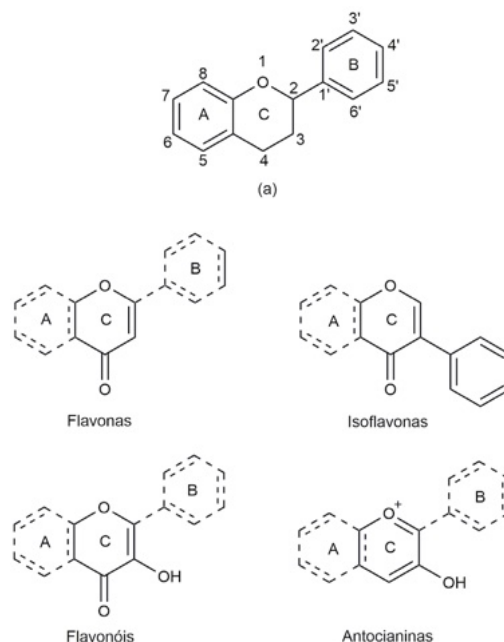


Figura 12 – Estrutura química geral de alguns flavonoides.

A avaliação da capacidade antioxidante de certos flavonoides, como a catequina e a quercetina, demonstrou que estes compostos possuem atividade *scavenger* de radicais livres como $O_2^{\bullet-}$, $HO^{\bullet}$ e $ROO^{\bullet}$, além de atuarem como *quenchers* de oxigênio singuleto (1O_2) e quelantes de iões metálicos de transição [42].

Além disso, alguns flavonoides têm a capacidade de inibir enzimas envolvidas na produção de radicais livres, como a LOX e a ciclooxigenase (COX), contribuindo assim para a redução do *stress* oxidativo [43].

3.2.5.4. Cumarinas e lignanos

Os compostos do tipo cumarínico, como a cumarina (Figura 13), demonstram eficácia na proteção contra o *stress* oxidativo, atuando de forma semelhante aos flavonoides. Diversos estudos descrevem a sua capacidade de atuar como *scavengers* de EROs, incluindo os radicais superóxido ($O_2^{\bullet-}$) e hidroxilo ($HO^{\bullet}$). Além disso, apresentam propriedades de quelação de íons metálicos de transição, como o ferro (Fe^{2+}/Fe^{3+}), o que contribui para a inibição da reação de Fenton e consequente formação de espécies oxidantes altamente reativas. Algumas cumarinas também evidenciam atividade inibitória sobre enzimas pró-oxidantes, como a LOX e a COX, desempenhando, assim, um papel importante na modulação do *stress* oxidativo e na resposta inflamatória. Mais recentemente, observou-se que determinadas cumarinas podem interferir com vias de sinalização celular associadas à inflamação potenciando os seus efeitos antioxidantes e anti-inflamatórios [44].

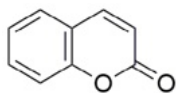


Figura 13 – Estrutura da cumarina.

3.2.5.5. Taninos

A designação genérica de taninos engloba um vasto conjunto de compostos polifenólicos com estruturas variadas (ex.: elagitaninos, galotaninos). A sua importância do ponto de vista biológico e farmacológico resulta da sua capacidade *scavenger* de EROs, a qual foi demonstrada em diversos sistemas experimentais (ex.: auto-oxidação do ácido ascórbico e do linoleato de metilo, lipoperoxidação mediada pela LOX, peroxidação lipídica em microsomas ou mitocôndrias, produção de radical superóxido no sistema hipoxantina-xantina oxidase). A atividade *scavenger* de radicais deste grupo de compostos está associada à sua capacidade dadora de prótons, com consequente formação de radicais fenólicos estáveis e bloqueio da cadeia de reações provenientes do processo de peroxidação lipídica e apresentando ainda ação quelante de íons metálicos de transição, os quais podem atuar como agentes pró-oxidantes [45].

4. Fontes de sistemas de defesa antioxidante não enzimáticos

Os antioxidantes endógenos, conforme referido, são compostos naturais que fazem parte do sistema de defesa das células aeróbicas, tanto animais como vegetais. Estes compostos estão amplamente distribuídos na Natureza, embora haja uma maior prevalência de uns em relação a outros em determinados sistemas biológicos. A Tabela 2 apresenta algumas das principais fontes dos referidos antioxidantes.

Tabela 2 – Exemplos de fontes de antioxidantes endógenos [14,15,23,32,43].

Antioxidante	Fonte
Ácido ascórbico	Frutos, vegetais frescos, cereais
Carotenoides e retinoides	Frutos, vegetais
Flavonoides e outros fenóis	Frutos, vegetais, especiarias
Glutathione	Frutos e vegetais frescos, cereais, carnes
Vitamina C	Chá
Vitamina E	Óleos vegetais, sementes, frutos, vegetais, cereais, frutos secos, carnes
Ubiquinol	Óleos vegetais, sementes oleaginosas, vegetais, carnes, peixes

5. Considerações sobre os sistemas de defesa antioxidante endógenos

Os sistemas antioxidantes endógenos são elementos fundamentais e componentes intrínsecos dos organismos vivos, o que pressupõe que estes possuem uma capacidade inata de proteção contra processos oxidativos.

O ser humano, tal como outros primatas, não é capaz de sintetizar alguns dos constituintes dos sistemas de defesa antioxidante anteriormente mencionados. No entanto, muitos desses compostos são obtidos através da dieta, sendo, por esse motivo, frequentemente designados por micronutrientes essenciais.

Os compostos com atividade antioxidante presentes nos alimentos tendem a apresentar baixa estabilidade química quando expostos a diversos processos de manipulação, processamento e fabrico a que estes são frequentemente submetidos. Fatores como o calor, a exposição ao oxigénio, a irradiação, a rutura da compartimentação celular, bem como alterações nos teores de água e oxigénio podem contribuir significativamente para a degradação parcial ou total desses compostos antioxidantes.

Estas alterações podem ter duas consequências principais. Por um lado, reduzem significativamente a capacidade antioxidante dos alimentos para proteger contra fenómenos oxidativos, com impacto direto na estabilidade de componentes oxidáveis como lípidos e proteínas. Por outro, resultam na perda do teor de micronutrientes essenciais com reconhecido valor nutricional, como as vitaminas C e E.

Face a este cenário, torna-se evidente a importância de preservar ao máximo, tanto quanto possível, os sistemas antioxidantes endógenos presentes nos alimentos. Para tal, é crucial aprofundar o conhecimento científico sobre a sua composição, mecanismos de ação e estabilidade química, incluindo o estudo dos mecanismos de ação, dos fatores pró-oxidantes que comprometem a sua eficácia e das possíveis interações sinérgicas entre os diversos componentes antioxidantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento concedido pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através dos contratos de Sofia Benfeito (2023.06106.CEECIND) e Daniel Chavarria (2024.07926.CEECIND).

Referências

- [1] J. A. Bertout, N. G. Mahutte, S. L. Preston, H. R. Behrman, *CHAPTER 20 - Reactive Oxygen Species and Ovarian Function*, in P. C. K. Leung, E. Y. Adashi (eds.), "The Ovary" 2nd edition, San Diego: Academic Press, **2004**, 353-368.
- [2] M. P. Murphy, H. Bayir, V. Belousov, C. J. Chang, K. J. A. Davies, M. J. Davies, T. P. Dick, T. Finkel, H. J. Forman, Y. Janssen-Heininger, D. Gems, V. E. Kagan, B. Kalyanaraman, N. G. Larsson, G. L. Milne, T. Nyström, H. E. Poulsen, R. Radi, H. V. Remmen, P. T. Schumacker, P. J. Thornalley, S. Toyokuni, C. C. Winterbourn, H. Yin, B. Halliwell, *Nat. Metab.* **2022**, 4, 651-662. DOI: 10.1038/s42255-022-00591-z.
- [3] F. Ferreira, R. Ferreira, J. Duarte, *RPCD* **2007**, 7, 257-275. DOI: 10.5628/rpcd.07.02.257.
- [4] I. Ferreira, R. Abreu, *Bioanálise* **2007**, 2, 32-39.
- [5] K. M. Engel, J. Schiller, C. E. Galuska, B. Fuchs, *Front. Physiol.* **2021**, 12, 732319. DOI: 10.3389/fphys.2021.732319.
- [6] T. K. Das, M. R. Wati, K. Fatima-Shad, *Arch. Neurosci.* **2015**, 2, e60038. DOI: 10.5812/archneurosci.20078.
- [7] O. M. Ighodaro, O. A. Akinloye, *Alex. J. Med.* **2018**, 54, 287-293. DOI: 10.1016/j.ajme.2017.09.001.
- [8] V. Pinilla-González, C. Rojas-Solé, F. Gómez-Hevia, T. González-Fernández, A. Cereceda-Cornejo, S. Chichiarelli, L. Saso, R. Rodrigo, *Foods* **2024**, 13, 1999. DOI: 10.3390/foods13131999.
- [9] E. Cadenas, L. Packer, *Antioxidants in health and disease*, in "Handbook of antioxidants", E. Cadenas, L. Packer (eds.), M. Dekker, New York, **1996**. DOI: 10.1201/9780203904046.
- [10] M. Zheng, Y. Liu, G. Zhang, Z. Yang, W. Xu, Q. Chen, *Antioxidants* **2023**, 12, 1675. DOI: 10.3390/antiox12091675.
- [11] L. Gebicka, J. Krych-Madej, *J. Inorg. Biochem.* **2019**, 197, 110699. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2019.110699.
- [12] S. Eren, D. Selami, *Glutathione Peroxidase*, in B. Margarete Dulce (ed.), "Health and Diseases in Glutathione System and Oxidative Stress" in Health and Disease, Rijeka, IntechOpen, **2020**, Cap. 3. DOI: 10.5772/intechopen.82965.
- [13] J. Sastre, F. V. Pallardó, J. Viña, *AGE* **1996**, 19, 129-139. DOI: 10.1007/BF02434082.
- [14] I. Mirończuk-Chodakowska, A. M. Witkowska, M. E. Zujko, *Adv. Med. Sci.* **2018**, 63, 68-78. DOI: 10.1016/j.advm.2017.05.005.
- [15] M. G. Traber, J. F. Stevens, *Free Radic. Biol. Med.* **2011**, 51, 1000-1013. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2011.05.017.
- [16] R. Brigelius-Flohé, *Free Radic. Biol. Med.* **2021**, 177, 381-390. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2021.02.029.
- [17] M. G. Traber, R. S. Bruno, *Chapter 7 - Vitamin E*, in B. P. Marriott, D. F. Birt, V. A. Stallings, A. A. Yates (eds.), "Present Knowledge in Nutrition" 11th edition, Academic Press, **2020**, 115-136.
- [18] A. Kanane, F. Rouaki, M. B. Errahmani, A. Laraba, H. Mesbah, A. Ammouche, *Int. J. Vitam. Nutr. Res.* **2019**, 87, 179-190. DOI: 10.1024/0300-9831/a000512.
- [19] E. M. Becker, S. S. Jørgensen, M. L. Andersen, L. H. Skibsted, *Eur. Food Res. Technol.* **2025**, 251, 227-232. DOI: 10.1007/s00217-024-04631-8.
- [20] V. E. Kagan, A. C. Straub, Y. Y. Tyurina, A. A. Kapralov, R. Hall, S. E. Wenzel, R. K. Mallampalli, H. Bayir, *Antioxid. Redox Signal.* **2024**, 40, 317-328. DOI: 10.1089/ars.2022.0154.
- [21] D. Njus, P. M. Kelley, Y.-J. Tu, H. B. Schlegel, *Free Radic. Biol. Med.* **2020**, 159, 37-43. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2020.07.013.
- [22] J. Shen, P. T. Griffiths, S. J. Campbell, B. Utinger, M. Kalberer, S. E. Paulson, *Sci. Rep.* **2021**, 11, 7417. DOI: 10.1038/s41598-021-86477-8.
- [23] A. J. Young, G. L. Lowe, *Antioxidants* **2018**, 7, 28. DOI: 10.3390/antiox7020028.
- [24] M. Zbyradowski, M. Duda, A. Wisniewska-Becker, Heriyanto, W. Rajwa, J. Fiedor, D. Cvetkovic, M. Pilch, L. Fiedor, *Nat. Commun.* **2022**, 13, 2474. DOI: 10.1038/s41467-022-30095-z.
- [25] S. A. R. Paiva, R. M. Russell, *J. Am. Coll. Nutr.* **1999**, 18, 426-433. DOI: 10.1080/07315724.1999.10718880.
- [26] R. Edge, T. G. Truscott, *Antioxidants* **2018**, 7, 5. DOI: 10.3390/antiox7010005.
- [27] P. Di Mascio, M. E. Murphy, H. Sies, *Am. J. Clin. Nutr.* **1991**, 53, 194S-200S. DOI: 10.1093/ajcn/53.1.194S.
- [28] K. Ulrich, U. Jakob, *Free Radic. Biol. Med.* **2019**, 140, 14-27. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2019.05.035.
- [29] D. A. Averill-Bates, *Chapter Five - The antioxidant glutathione*, in G. Litwack (ed.), "Vitamins and Hormones", vol. 121, Academic Press, **2023**, 109-141.
- [30] G. G. Borisenko, I. Martin, Q. Zhao, A. A. Amoscato, Y. Y. Tyurina, V. E. Kagan, *J. Biol. Chem.* **2019**, 279, 23453-23462. DOI: 10.1074/jbc.M400119200.
- [31] A. Zhikovich, *Chem. Res. Toxicol.* **2019**, 32, 1318-1319. DOI: 10.1021/acs.chemrestox.9b00152.
- [32] F. M. Gutierrez-Mariscal, A. P. Arenas-de Larriva, L. Limia-Perez, J. L. Romero-Cabrera, E. M. Yubero-Serrano, J. López-Miranda, *Int. J. Mol. Sci.* **2020**, 21, 7870. DOI: 10.3390/ijms21217870.
- [33] M. A. Virmani, M. Cirulli, *Int. J. Mol. Sci.* **2022**, 23, 2717. DOI: 10.3390/ijms23052717.
- [34] S. Bhattacharjee, P. Deb, R. Devi, *Phytoantioxidants and Their Role in Cellular Oxidative Stress*, in M. Rudrapal (ed.), "Phytoantioxidants and Nanotherapeutics", **2022**, 77-98.
- [35] A. Zeb, *J. Food Biochem.* **2020**, 44, e13394. DOI: 10.1111/jfbc.13394.
- [36] R. M. Giner, J. L. Ríos, S. Mániz, *Antioxidants* **2022**, 11, 343. DOI: 10.3390/antiox11020343.
- [37] S. N. Kumar, H. R. Nair, P. Kumar, *Food Humanit.* **2023**, 1, 1206-1212. DOI: 10.1016/j.foohum.2023.09.014.
- [38] G. Taner, D. O. Vardar, S. Aydın, Z. Aytaç, A. Basaran, N. Basaran, *Drug Chem. Toxicol.* **2017**, 40, 183-190. DOI: 10.1080/01480545.2016.1190740.
- [39] B. Velika, I. Kron, *Free Radic. Antioxid.* **2012**, 2, 62-67. DOI: 10.5530/ax.2012.4.11.
- [40] D. Chavarria, T. Silva, D. Martins, J. Bravo, T. Summavielle, J. Garrido, F. Borges, *Med. Chem. Comm.* **2015**, 6, 1043-1053. DOI: 10.1039/C5MD00018A.
- [41] M. C. Dias, D. C. G. A. Pinto, A. M. S. Silva, *Molecules* **2021**, 26, 5377. DOI: 10.3390/molecules26175377.
- [42] A. S. Arslan, I. Seven, S. I. Mutlu, G. Arkalı, N. Birben, P. T. Seven, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2022**, 231, 113200. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.113200.
- [43] M. H. Farzaei, A. K. Singh, R. Kumar, C. R. Croley, A. K. Pandey, E. Coy-Barrera, J. K. Patra, G. Das, R. G. Kerry, G. Annunziata, G. C. Tenore, H. Khan, M. Micucci, R. Budriesi, S. Momtaz, S. M. Nabavi, A. Bishayee, *Int. J. Mol. Sci.* **2019**, 20, 4957. DOI: 10.3390/ijms20194957.
- [44] B. Rostom, R. Karaky, I. Kassab, M. Sylla-Iyarreta Veitía, *Eur. J. Pharmacol.* **2022**, 922, 174867. DOI: 10.1016/j.ejphar.2022.174867.
- [45] I. C. Bocsan, D. C. Măgureanu, R. M. Pop, A. M. Levai, Ș. O. Macovei, I. M. Pătrașca, V. S. Chedea, A. D. Buzoianu, *Biomedicines* **2022**, 10, 2337. DOI: 10.3390/biomedicines10102337.

>

***Daniel Chavarria**

RISE-Health, Departamento de Biomedicina, Faculdade de Medicina da Universidade do Porto.

É investigador pós-doutorado no Departamento de Biomedicina da FMUP focando-se no desenvolvimento de novas entidades químicas com potencial aplicação terapêutica. Licenciado e mestre em Bioquímica pela FCUP, obteve o doutoramento em Ciências Farmacêuticas pela FFUP. Participou em projetos internacionais e publicou mais de 30 artigos científicos.

daniel.chavarria@med.up.pt

ORCID.org/0000-0002-7010-9808

>

***Fernanda Borges**

Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

RISE-Health, Departamento de Biomedicina, Faculdade de Medicina da Universidade do Porto.

É Professora Associada com agregação no Departamento de Química e Bioquímica da FCUP. A sua investigação centra-se na descoberta de fármacos para doenças neurodegenerativas, cancro e infeções. Publicou mais de 400 artigos e é a inventora principal de oito patentes internacionais.

fborges@fc.up.pt

ORCID.org/0000-0003-1050-2402

>

Lisa Sequeira

RISE-Health, Departamento de Biomedicina, Faculdade de Medicina da Universidade do Porto.

É investigadora pós-doutorada no Departamento de Biomedicina da FMUP e a sua investigação foca-se na descoberta e desenvolvimento de novas entidades químicas com potencial terapêutico para doenças neurodegenerativas e/ou infecciosas. Licenciada e mestre em Química pela FCUP, obteve o doutoramento em Ciências da Vida, do Ambiente e do Fármaco (Currículo: Ciências do Fármaco) pela Universidade de Cagliari, Itália.

lsequeira@med.up.pt

ORCID.org/0000-0002-5801-9455

>

Sofia Benfeito

RISE-Health, Departamento de Biomedicina, Faculdade de Medicina da Universidade do Porto.

É investigadora pós-doutorada no Departamento de Biomedicina da FMUP dedicando-se à síntese de novas entidades químicas capazes de prevenir a oxitose/ferroptose e a disfunção mitocondrial na ataxia de Friedreich. Licenciada e mestre em Química pela FCUP, obteve o doutoramento em Ciências Farmacêuticas pela FFUP. Participou em projetos internacionais e publicou mais de 40 artigos científicos.

sofiabenfeito@med.up.pt

ORCID.org/0000-0001-9645-8152

Biomonitorização de Alteradores Endócrinos Lipofílicos em Tecido Adiposo Humano

>

Sara Sousa*

Cristina Delerue-Matos

Conceição Calhau

Valentina Fernandes Domingues

Biomonitoring of Lipophilic Endocrine Disruptors in Human Adipose Tissue.

Endocrine disruptors are chemical substances capable of interfering with the endocrine system and exposure to these substances can lead to metabolic alterations linked to severe pathologies. These substances accumulate mainly in lipid-rich biological tissues such as adipose tissue. However, there is a lack of biomonitoring studies and analytical methodologies for the analysis of endocrine disruptors in adipose tissue. This article reports the development of an analytical method for the simultaneous extraction of lipophilic endocrine disruptors and its application for the biomonitoring of adipose tissue from Portuguese women. The detected concentrations were correlated with biochemical parameters associated with numerous metabolic processes. Additionally, in vitro studies were conducted to determine the impact of these substances on breast cancer cell mechanisms and on the vitamin D pathways.

Alteradores endócrinos são substâncias químicas capazes de interferir no sistema endócrino, cuja exposição pode resultar em alterações metabólicas associadas a patologias graves. Maioritariamente, estes acumulam-se em tecidos biológicos mais lipídicos como o tecido adiposo. Contudo, há uma escassez de estudos de biomonitorização e de metodologias para a análise de alteradores endócrinos no tecido adiposo. Este artigo reporta o desenvolvimento de um método analítico para a extração simultânea de alteradores endócrinos lipofílicos e a sua aplicação na biomonitorização destes em tecido adiposo de mulheres portuguesas. As concentrações detetadas foram correlacionadas com parâmetros bioquímicos associados a vários processos metabólicos. Adicionalmente, investigou-se, por estudos in vitro, o impacto destes compostos no mecanismo de células de cancro da mama e nas vias metabólicas da vitamina D.

Introdução

Diariamente somos inevitavelmente expostos a diversas substâncias químicas presentes no ambiente. Os poluentes ambientais podem incluir poluentes orgânicos persistentes (POP), poluentes emergentes, entre outros, como os bifenilos policlorados (PCB), pesticidas organoclorados (OCP) e organofosforados (OPP), retardadores de chama bromados (BFR), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), almíscares sintéticos (SM), metais pesados, fito-estrogénios, fármacos, ftalatos e bisfenóis. A persistência, capacidade de biomagnificação pela cadeia alimentar e efeitos nocivos destes poluentes torna-os num problema de saúde global ou de “Uma só Saúde” (*OneHealth*, a abordagem sinérgica e interdisciplinar entre a saúde humana, animal e ambiental) [1].

Alteradores endócrinos lipofílicos

Alguns poluentes ambientais são classificados como alteradores endócrinos, substâncias químicas exógenas capazes de atuar, bloquear ou inibir hormonas endógenas, perturbando o funcionamento normal do sistema endócrino [2]. Estes podem ser de origem natural ou antropogénica. Está demonstrado que a exposição a alteradores endócrinos está relacionada com alterações metabólicas, associadas a diversas patologias, tais como o cancro da mama e outros cancros hormono-dependentes, a diabetes, a obesidade, distúrbios reprodutivos, a deficiência de vitamina D, entre outros [3-5]. Além disso, as fases de desenvolvimento embrionário e neonatal são as mais vulneráveis à exposição de alteradores endócrinos, sendo que as principais vias de exposição

são através da placenta e do leite materno, ou seja, pela mãe. Assim, a biomonitorização destes compostos é importante, principalmente na população feminina em idade fértil [5]. Adicionalmente, a obesidade e o cancro da mama são patologias que aumentam mundialmente de ano para ano [6,7]. Em Portugal, o cancro da mama é a segunda maior causa de morte por cancro nas mulheres [8]. Estas patologias estão, por si só, associadas a alterações no metabolismo, o que cria uma pré-disposição a alterações metabólicas potencialmente intensificadas pela presença de alteradores endócrinos [5]. A deficiência de vitamina D também é prevalente na população portuguesa. Para além dos seus diversos benefícios, estudos demonstram que esta vitamina é capaz de inibir o crescimento e desenvolvimento de células cancerígenas da mama. Contudo, ainda pouco é conhecido sobre a relação entre alteradores endócrinos, deficiência de vitamina D e cancro da mama [6].

Existem poluentes ambientais alteradores endócrinos lipofílicos de diferentes classes químicas, como os:

- PCB, misturas sintéticas excelentes como isolamento elétrico, não inflamáveis e com alto ponto de ebulição e estabilidade química. Estes compostos foram aplicados em variados produtos, desde transformadores, materiais de construção e tintas [5];
- OCP, a primeira geração de pesticidas sintéticos que foram amplamente utilizados na agricultura e no controlo de pragas entre 1940 e 1970 [5];
- OPP, classe de pesticidas amplamente utilizados atualmente na agricultura, criados para substituir os OCP, mas apresentam maior toxicidade ambiental, animal e humana [9];
- BFR, um grupo de compostos sintéticos altamente persistentes, criados para reduzir a inflamabilidade de outros produtos, sendo aplicados em equipamentos eletrónicos, polímeros, roupas, plásticos, produtos têxteis, entre outros [5];
- OPE, retardantes de chama usados como substitutos dos BFR, mas facilmente transferidos do material onde foram adicionados para o ambiente [9];
- PAH, contaminantes orgânicos muito persistentes formados essencialmente durante a combustão incompleta e processos de pirólise, resultado de emissões de automóveis, incineração, fumo de cigarros, atividades industriais, entre outros [5];
- SM, conhecidos pelo seu aroma distinto e duradouro, motivo por que são muito utilizados em produtos de cuidado pessoal e domésticos, mas também na formulação de herbicidas e explosivos [5].

Devido à natureza lipofílica da maioria, estes compostos tendem a acumular-se em tecidos e fluidos lipídicos, como o tecido adiposo (nos adipócitos), frequentemente sem sofrer degradação ou excreção [5]. Em estudos de biomonitorização, prefere-se o uso de

matrizes não invasivas (saliva, cabelo, leite materno, urina ou ar exalado), pois não requerem nenhum tipo de procedimento invasivo. Contudo, amostras como saliva, soro ou ar refletem uma exposição recente, enquanto amostras de urina são úteis na avaliação de metabolitos. Assim, para avaliar a exposição a longo prazo, o tecido adiposo é considerado a matriz mais adequada para a biomonitorização, sendo este o principal reservatório destes compostos no corpo humano. No entanto, há poucos estudos de biomonitorização que utilizam esta matriz, em parte devido à necessidade de procedimentos invasivos para a sua colheita e à quantidade limitada de amostra disponível [5]. Antes deste trabalho apenas existia um estudo conduzido em Portugal [10].

Desenvolvimento e otimização do método analítico

Amostras biológicas, especialmente com alto teor lipídico, são matrizes extremamente complexas. Devido à baixa polaridade e alta lipofilicidade dos alteradores endócrinos, a extração, isolamento e concentração destes compostos não é fácil. Adicionalmente, é crucial realizar uma etapa de purificação para remover interferentes e melhorar a sensibilidade e seletividade do método analítico [5]. Por outro lado, existe cada vez mais uma preferência por métodos multi-analito e com baixo impacto ambiental.

Neste trabalho foi desenvolvido um método analítico para a extração simultânea de alteradores endócrinos lipofílicos de diferentes classes químicas em amostras de tecido adiposo humano. A metodologia desenvolvida recorreu à extração assistida por ultrassons (UAE), com base na literatura existente, para a análise de 74 alteradores endócrinos, incluindo OCP, OPP, OPE, BFR, PAH, PCB e SM. Este método de extração é uma alternativa a métodos convencionais, uma vez que não requer a utilização de grandes quantidades de solventes e de amostra, bem como apresenta baixo consumo de energia e tempo. Todos os analitos foram analisados por Cromatografia Gasosa (GC) com a exceção dos PAH, quantificados por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC). De forma a reduzir o teor lipídico do extrato, após UAE, avaliou-se a aplicação de vários processos de purificação como troca de solvente, precipitação lipídica e a extração em fase sólida dispersiva (*dispersive* SPE), sendo estes passos imprescindíveis para melhorar a qualidade da análise cromatográfica [11,12]. A metodologia desenvolvida foi otimizada para cada tipo de analito, resultando no procedimento simplificado representado na Figura 1. Esta metodologia foi validada para todos os alteradores endócrinos estudados, e demonstrou adequada linearidade, limites de deteção e quantificação, efeito matriz, incerteza combinada expandida, precisão e repetibilidade [11,12].

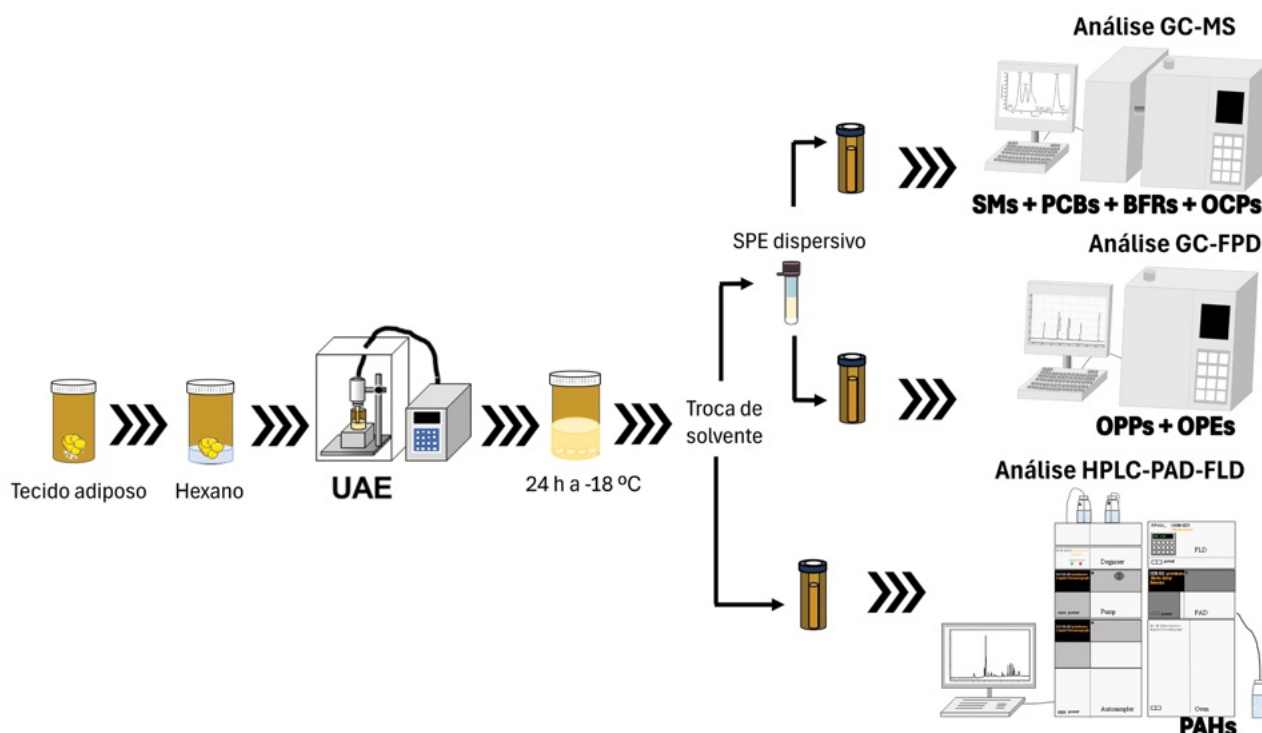


Figura 1 - Esquema da metodologia desenvolvida.

Biomonitorização em tecido adiposo

Após a validação da metodologia, procedeu-se à biomonitorização dos alteradores endócrinos lipofílicos selecionados em duas populações de mulheres portuguesas: mulheres obesas (em tecido adiposo subcutâneo e visceral) e mulheres com cancro de mama (em tecido adiposo mamário). A concentração total de alteradores endócrinos variou entre 0,03 e 17,1 $\mu\text{g/g}$ de tecido adiposo, tendo-se observado altas frequências de deteção para os SM, PCB, PAH e OCP. No total, foram detetados 37 compostos na população de mulheres obesas e 10 na população de mulheres com cancro da mama. As concentrações encontradas foram correlacionadas com parâmetros clínicos associados com vários processos metabólicos, como tabagismo, paridade, menopausa, idade, dislipidemia, hiperglicemia, hipertensão, síndrome metabólica, parâmetros antropométricos, perfil lipídico, tensão arterial, sensibilidade à insulina, além de parâmetros da função hepática, hormonais e inflamatórios. A análise estatística realizada suporta as evidências descritas na literatura, de como estes alteradores endócrinos podem interferir significativamente nos processos metabólicos [1,7,9,13].

Impacto no mecanismo celular de cancro da mama e nas vias metabólicas da Vitamina D

Com o intuito de avaliar o impacto de BFR (pouco estudados) no mecanismo celular de cancro da mama e nas vias metabólicas da vitamina D, foram

selecionadas duas linhas celulares (MCF-7, carcinoma de mama humano e HepG2, carcinoma hepático humano) e expostas individualmente a quatro BFR (PBT: 2,3,4,5,6-pentabromotolueno, HBB: hexabromobenzeno, HBCD: 1,2,5,6,9,10-hexabromociclododecano e TBB: 2,3,4,5-tetrabromobenzoato de 2-etil-hexilo. Alterações na viabilidade, proliferação e migração celular, ciclo celular e expressão genética foram avaliadas através de ensaios agudos e crónicos. Paralelamente, foram realizados ensaios com exposição adicional a 30 ou 60 ng/mL de calcitriol (a forma ativa da vitamina D), para avaliar a influência da presença desta vitamina no ciclo celular e expressão genética nas linhas celulares selecionadas. Os resultados confirmaram que a exposição a BFR altera o ciclo celular, a proliferação e a migração celular na linha celular de cancro de mama, além de comprometer os mecanismos de ativação/inativação, ação, sinalização e transporte da vitamina D [6,14].

Conclusão

A exposição e subsequente acumulação de alteradores endócrinos no tecido adiposo são motivo de preocupação, principalmente na mulher em idade fértil devido aos potenciais impactos imprevisíveis para a saúde das gerações futuras. Neste trabalho, foi desenvolvido um método analítico para a extração e análise de 74 alteradores endócrinos lipofílicos de diferentes classes químicas, que foi posteriormente aplicado na biomonitorização

destes compostos no tecido adiposo de mulheres portuguesas. Adicionalmente, o efeito dos BFR no mecanismo celular de cancro da mama e nas vias metabólicas da vitamina D foi estudado através de ensaios *in vitro*. Alinhado com a abordagem “Uma só Saúde” (*OneHealth*), este trabalho contribuiu para preencher lacunas na análise e biomonitorização destes compostos em tecido adiposo.

Agradecimentos

Sara Sousa agradece a todas as mulheres que participaram neste estudo e aos departamentos de Cirurgia Geral do Hospital de São João e Cirurgia de Mama e Plástica do Hospital de São José. Este trabalho teve apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através das bolsas de doutoramento SFRH/BD/137516/2018 e COVID/BD/153231/2023 e da FCT/MCTES (LA/P/0008/2020, DOI: 10.54499/LA/P/0008/2020, UIDP/50006/2020, DOI: 10.54499/UIDP/50006/2020 e UIDB/50006/2020, DOI: 10.54499/UIDB/50006/2020).

Referências

- [1] Sara Sousa, *Biomonitoring of lipophilic endocrine disruptors in women: cancer biology and Vitamin D pathways*. Tese de Doutoramento em Química Sustentável. Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, **2023**. hdl.handle.net/10216/156644.
- [2] Endocrine Society, *Endocrine-Disrupting Chemicals: endocrine.org/topics/edc* (acedido em 27/09/2023).
- [3] E. Ribeiro, C. Ladeira, S. Viegas, *Toxics* **2017**, 5, 5. DOI: 10.3390/toxics5010005.
- [4] B. Yilmaz, H. Terekeci, S. Sandal, F. Kelestimur, *Rev. Endocr. Metab. Disord.* **2020**, 21, 127-147. DOI: 10.1007/s11154-019-09521-z.
- [5] S. Sousa, M. L. Maia, C. Delerue-Matos, C. Calhau, V. F. Domingues, *Sci. Total Environ.* **2022**, 806, 150922. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150922.
- [6] S. Sousa, M. L. Maia, D. Pestana, D. Teixeira, M. Ângelo-Dias, C. Martins, L. M. Borrego, C. Delerue-Matos, C. Calhau, V. F. Domingues, A. Faria, *J. Steroid Biochem. Mol. Biol.* **2022**, 219, 106079. DOI: 10.1016/j.jsbmb.2022.106079.
- [7] S. Sousa, D. Pestana, G. Faria, C. Delerue-Matos, C. Calhau, V. F. Domingues, *Sci. Total Environ.* **2023**, 894, 165015. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165015.
- [8] LPCC, *CANCRO DA MAMA: ligacontracancro.pt/cancro-da-mama* (acedido em 18/04/2023).
- [9] S. Sousa, D. Rede, V. C. Fernandes, D. Pestana, G. Faria, C. Delerue-Matos, C. Calhau, V. F. Domingues, *Environ. Res.* **2023**, 239, 117337. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117337.
- [10] D. Pestana, G. Faria, C. Sá, V. C. Fernandes, D. Teixeira, S. Norberto, A. Faria, M. Meireles, C. Marques, L. Correia-Sá, A. Cunha, J. T. Guimarães, A. Taveira-Gomes, A. C. Santos, V. F. Domingues, C. Delerue-Matos, R. Monteiro, C. Calhau, *Environ. Res.* **2014**, 133, 170-177. DOI: 10.1016/j.envres.2014.05.026.
- [11] S. Sousa, D. Pestana, G. Faria, F. Vasconcelos, C. Delerue-Matos, C. Calhau, V. F. Domingues, *J. Pharm. Biomed. Anal.* **2020**, 191, 113598. DOI: 10.1016/j.jpba.2020.113598.
- [12] S. Sousa, P. Paíga, D. Pestana, G. Faria, C. Delerue-Matos, M. J. Ramalhosa, C. Calhau, V. F. Domingues, *Anal. Methods* **2023**, 15, 1722-1733. DOI: 10.1039/D2AY02075K.
- [13] S. Sousa, P. Paíga, D. Pestana, G. Faria, C. Delerue-Matos, M. J. Ramalhosa, C. Calhau, V. F. Domingues, *Chemosphere* **2024**, 353, 141673. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141673.
- [14] M. L. Maia, S. Sousa, D. Pestana, A. Faria, D. Teixeira, C. Delerue-Matos, V. F. Domingues, C. Calhau, *Environ. Pollut.* **2022**, 294, 118639. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118639.

>

Conceição Calhau

Nutrition e Metabolism, CINTESIS@RISE, NOVA Medical School, Universidade NOVA de Lisboa.

É Professora Catedrática da NOVA Medical School, Universidade NOVA de Lisboa. É Subdiretora para a Extensão à Comunidade da NOVA Medical School, Universidade NOVA de Lisboa desde 2022. É coordenadora da área Medicina Preventiva & Desafios Societais do CINTESIS e integra a área *Community Health and Societal Challenges* do Laboratório Associado RISE.

ccalhau@nms.unl.pt

ORCID.org/0000-0001-9567-3379

>

Cristina Delerue-Matos

REQUIMTE/LAQV, ISEP, Politécnico do Porto.

É Professora Coordenadora Principal do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto (ISEP/P.Porto). É coordenadora da área de Química Ambiental da REQUIMTE/LAQV. É vice-presidente para a investigação do P.Porto, desde 2022.

cmm@isep.ipp.pt

ORCID.org/0000-0002-3924-776X

>

*Sara Sousa

REQUIMTE/LAQV, ISEP, Politécnico do Porto.

É investigadora no projeto Pacto da Bioeconomia Azul no Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do Porto. As suas áreas de atuação são principalmente a Química Analítica e Química Sustentável. Em 2024 recebeu o prémio “2023 Best PhD Thesis” pela revista *Toxics* MDPI e em 2025 recebeu o prémio “Portuguese Young Chemists Award” pelo Grupo de Químicos Jovens da Sociedade Portuguesa de Química.

sirds@isep.ipp.pt

ORCID.org/0000-0002-8291-1160

>

Valentina Fernandes Domingues

REQUIMTE/LAQV, ISEP, Politécnico do Porto.

É Professora Coordenadora com Agregação no ISEP/P.Porto. Membro do Conselho Técnico-Científico, subdiretora do laboratório de Química e Biologia do Departamento de Engenharia Química e responsável pela cromatografia gasosa e microbiologia no grupo de investigação GRAQ. Desenvolve investigação em ciência ambiental, incluindo monitorização ambiental, biomonitorização, alimento, valorização de resíduo e química verde.

vfd@isep.ipp.pt

ORCID.org/0000-0003-3472-849X

A Vida como um Reflexo da Geoquímica Planetária

>

Carlos Ramos*
 José M. Orench-Benvenuti
 Lara Brito de Gouveia
 Paulo Rodrigues
 Madalena Carvalho
 Ana Colaço

Fátima Viveiros
 Catarina Silva
 Rute Cesário
 João Canário
 João C. Duarte
 Zita Martins

Life as a Reflection of Planetary Geochemistry.

The origin of life on Earth remains one of the greatest mysteries in modern science, with significant research on this topic focused on the geochemical and environmental conditions that enabled the transition from abiotic chemistry to functional organic systems. This review article presents a critical overview of the role of hydrothermal vents as potential cradles of life, discussing the main associated hypotheses: the "RNA World Hypothesis" and the "Metabolism First Hypothesis," in correlation with two distinct types of hydrothermal systems, i.e., deep-sea and shallow-water vents. Furthermore, it introduces and explores the more recently proposed "Managed Metabolism Hypothesis", an integrative framework that aims to reconcile and connect the dependencies of the two traditional theories. In particular, it highlights the possible complementarity between the physicochemical properties of shallow and deep hydrothermal environments, proposing that both may have played essential roles in life's emergence. To address the spatial separation paradox raised by this hypothesis, this article suggests reframing the discussion within the Hadean-Archean Earth's geological context, when hydrothermal systems' distribution and depth likely differed significantly from those observed today.

A origem da vida na Terra continua a ser um dos maiores mistérios da ciência moderna, com a investigação mais recente a focar-se nas condições geoquímicas e ambientais que possibilitaram a transição de uma química abiótica para uma química pré-biótica e posteriormente para sistemas orgânicos funcionais. Este artigo de revisão apresenta uma visão crítica do papel das fontes hidrotermais como potenciais berços da vida, discutindo as principais hipóteses: a "Hipótese do Mundo ARN" e a "Hipótese do Metabolismo Primeiro", em correlação com dois tipos distintos de sistemas hidrotermais, i.e., sistemas hidrotermais de grande profundidade e sistemas hidrotermais de superfície. Adicionalmente, é também introduzida e explorada a mais recente "Hipótese do Metabolismo Gerido", apresentada como uma abordagem integrativa que liga as eventuais dependências das duas teorias principais mencionadas. Em particular, é destacada a possível complementaridade entre as propriedades físico-químicas dos ambientes hidrotermais superficiais e profundos, propondo que ambos poderão ter desempenhado papéis essenciais no despontar da vida. Finalmente, para responder ao paradoxo da separação espacial colocado por esta hipótese, o artigo propõe uma reinterpretação à luz do contexto geológico da Terra durante o Hádico-Arcaico, período durante o qual a distribuição e profundidade dos sistemas hidrotermais seriam, provavelmente, significativamente diferentes das observadas na atualidade.

1. Introdução

A origem da vida na Terra, e a sua possível existência fora do nosso planeta, são duas das mais profundas e complexas questões colocadas pela ciência. A unidade básica da vida, como a conhecemos, depende de água, de energia, de elementos inorgânicos e de moléculas orgânicas, que servem como blocos fundamentais para os processos biológicos. Mas de onde vieram essas moléculas orgânicas? A ciência propõe duas grandes categorias de hipóteses para a sua origem, a exógena e a endógena.

A origem exógena sugere que moléculas orgânicas simples, como aminoácidos e bases nitrogenadas, podem ter chegado à Terra primitiva através de meteoritos ou cometas [1,2]. A apoiar esta hipótese existem descobertas como as resultantes de análises de meteoritos carbonáceos, que revelaram a presença de aminoácidos, polióis, e até bases nitrogenadas [3]. E também missões, como a Missão Rosetta, que detetou glicina e fósforo no cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko [4], a Missão Hayabusa2, que permitiu

identificar hidrocarbonetos aromáticos, compostos alifáticos e ácidos carboxílicos nas amostras recolhidas no asteroide Ryugu [5], e a Missão OSIRIS-REx, que identificou moléculas orgânicas ricas em carbono no asteroide Bennu [6].

A origem endógena argumenta que as moléculas orgânicas se formaram na Terra, a partir de compostos inorgânicos simples, sob as condições geoquímicas únicas do planeta ainda jovem, sendo apontadas as fontes hidrotermais costeiras de baixa profundidade e do mar profundo, como locais favoráveis para esta síntese [7].

Com esses blocos básicos disponíveis, quer de origem externa quer de origem interna, o desafio seguinte será entender como é que essas moléculas simples se organizaram, originando sistemas mais complexos, capazes de evoluir para sistemas vivos.

2. A origem endógena e as diferentes hipóteses

No âmbito das teorias que procuram explicar a origem endógena da vida na Terra, destacam-se três propostas principais: a hipótese do Mundo Ácido RiboNucleico (ARN) [8], a hipótese do Metabolismo Primeiro [9], e a hipótese do Metabolismo Gerido [10] (Tabela 1). A hipótese do Mundo ARN, tradicionalmente associada a fontes hidrotermais superficiais, propõe que moléculas de ARN terão sido as primeiras biomoléculas funcionais

a surgir, acumulando as funções de armazenamento genético, catálise e autorreplicação [11]. A presença de ARN catalítico nos ribossomas atuais é frequentemente citada como vestígio desse passado. No entanto, esta hipótese enfrenta desafios, como a instabilidade da ribose em condições pré-bióticas e a dificuldade da polimerização espontânea de ARN sem a existência de enzimas [8]. Por sua vez, a hipótese do Metabolismo Primeiro, associada a fontes hidrotermais profundas, propõe que redes de reações químicas autocatalíticas terão surgido antes do ARN, promovidas por gradientes eletroquímicos e por catálise das moléculas orgânicas que as integram nas superfícies de minerais ali existentes [9,12]. A limitação central desta hipótese reside na ausência de um mecanismo de retenção e transmissão de informação, o qual se adivinha essencial para a transição de redes químicas simples para sistemas metabólicos organizados. Um exemplo frequentemente citado é o modelo de rede autocatalítica de Kauffman que, embora capaz de manter a sua própria dinâmica, permanece vulnerável a alterações ambientais por não possuir uma estrutura estável na retenção de informação relevante de geração para geração [13]. Por último, a hipótese do Metabolismo Gerido propõe que redes autocatalíticas primitivas teriam evoluído a par de moléculas reguladoras do tipo ARN no interior do mesmo sistema, favorecendo a transição para redes metabólicas mais organizadas [14] (Figura 1).

Tabela 1 – Síntese das teorias atualmente aceites sobre as origens da vida na Terra.

Hipótese	Ideia Principal	Ambiente de Suporte	Principal Desafio
Mundo ARN [8]	O ARN surgiu primeiro atuando simultaneamente como material genético e catalisador.	Fontes hidrotermais superficiais com ciclos de seco/húmido e radiação UV, e síntese abiótica de moléculas orgânicas essenciais.	Instabilidade do ARN e dificuldade de polimerização espontânea.
Metabolismo primeiro [9]	As redes metabólicas surgiram antes do material genético.	Fontes hidrotermais profundas alcalinas.	Ausência de um mecanismo claro de retenção/genética para evolução.
Metabolismo gerido [10]	Os ciclos autocatalíticos foram regulados por moléculas semelhantes ao ARN.	Combinação de ambientes superficiais e profundos.	Explicar o mecanismo inicial de seleção e controlo.

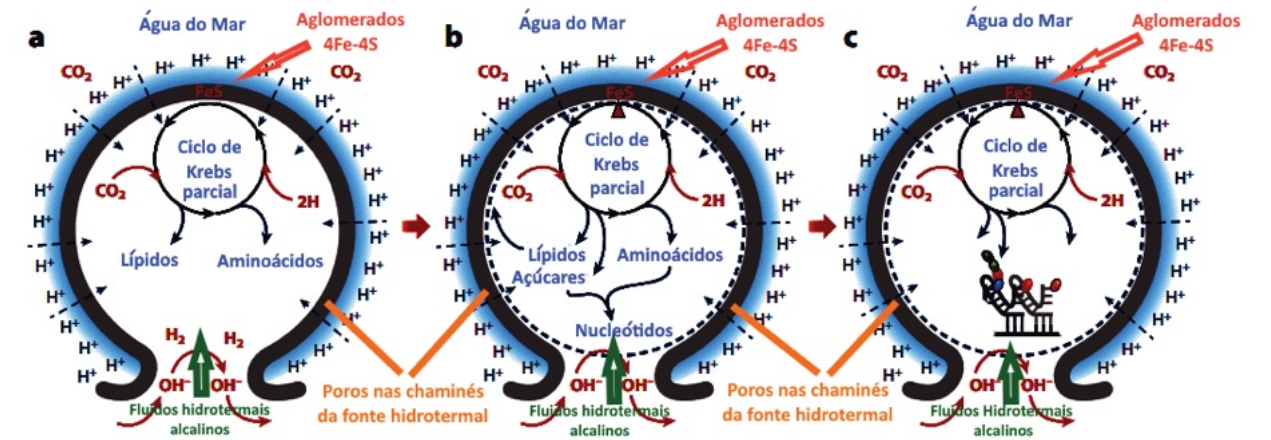


Figura 1 – Etapas da evolução das protocélulas com coevolução de metabolismo e ARN: a) Nos poros inorgânicos das fontes hidrotermais, a separação entre fluidos alcalinos e águas oceânicas ácidas gera um fluxo de prótons através das paredes ricas em minerais de FeS. Essas estruturas facilitam reações de um ciclo de Krebs reverso (incompleto), fixando

carbono e produzindo lípidos e aminoácidos. b) Em ambiente alcalino, os lípidos formam uma bicamada de ácidos gordos (linha tracejada), revestindo o poro. O aumento do desequilíbrio metabólico impulsiona a síntese de nucleótidos. c) A polimerização dos nucleótidos dá origem às primeiras moléculas de ARN. Imagem adaptada de Harrison et al. [14].

Esta evolução conjunta teria permitido ultrapassar a chamada barreira de cooperação (Figura 2) [10], que limita o desenvolvimento de sistemas mais complexos. Essa barreira decorre da presença de reações secundárias ou parasíticas, designadas como reações “não cooperativas” que, não contribuindo para os objetivos do sistema, comprometem a sua eficiência e dificultam o aparecimento de funcionalidades biológicas avançadas [10].

3. Os possíveis berçários

3.1. Fontes hidrotermais superficiais, em alinhamento com a “Hipótese do Mundo ARN”

Localizadas em ambientes costeiros ou lacustres, as fontes hidrotermais superficiais exibem condições ambientais dinâmicas, caracterizadas por ciclos de húmido/seco, exposição quase contínua à radiação UV solar, manutenção de gradientes térmicos locais, e a formação de precipitados abundantes, ricos em íons metálicos, argilas e fosfatos (Figura 3) [15]. Em conjunto, estas condições suportam

a “Hipótese do Mundo ARN” [8]. Os nucleótidos, como unidades estruturais do ARN, têm na sua composição três componentes: um grupo fosfato, um açúcar (ribose no caso do ARN moderno), e uma base nitrogenada (adenina, guanina, citosina ou uracilo) [16]. Na química pré-biótica, é plausível que estes componentes tenham sido sintetizados a partir de moléculas mais simples, como formaldeído (HCHO), cianeto de hidrogénio (HCN) e amoníaco (NH₃) presente na atmosfera primordial [15,16]. Um exemplo clássico é a reação de formose, favorecida por condições alcalinas e pela presença de catalisadores minerais, como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), que permite a síntese de glic aldeído a partir de formaldeído ($2\text{HCHO} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$). Por reações subsequentes, este composto origina uma série de açúcares, sendo a ribose (C₅H₁₀O₅) o mais complexo [15-17]. Em paralelo, experiências laboratoriais demonstraram que o HCN polimeriza [18] formando bases nitrogenadas em solução alcalina e na presença de íons, como Fe²⁺, Cu²⁺ ou Ni²⁺ (Material Suplementar – Tabela S1) [18-23].

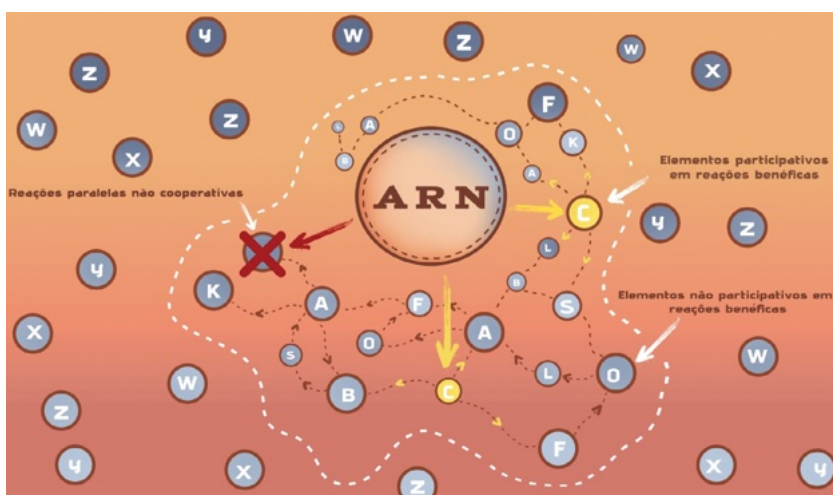
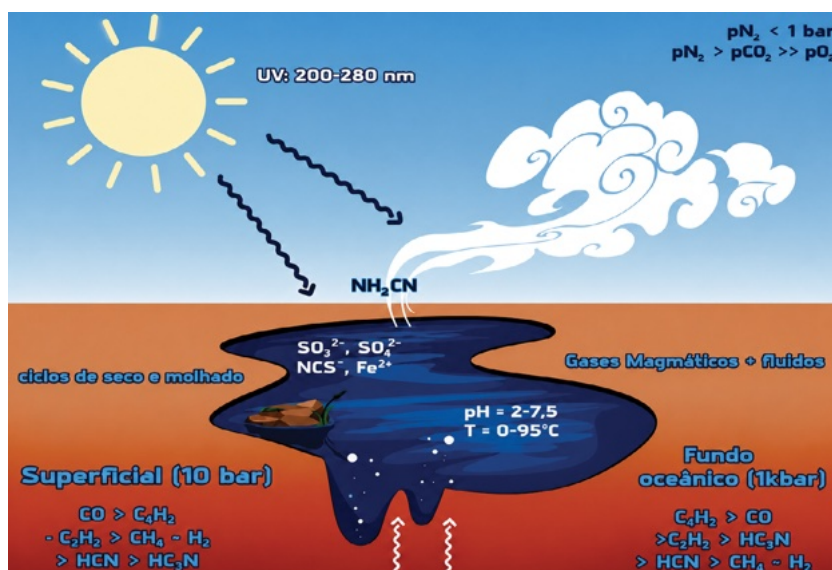


Figura 2 – Representação gráfica de moléculas do tipo ARN suprimindo moléculas não catalíticas, limitando assim as chamadas reações “não cooperativas”, e promovendo reações autocatalíticas que melhoram o sistema. Imagem adaptada de Fedor et al. [10].

Figura 3 – Uma fonte hidrotermal costeira e/ou de baixa profundidade, sobre magma rico em carbono e nitrogénio, apresenta margens que expandem e recuam, criando ciclos húmido/seco. A água é enriquecida com sulfitos (SO₃²⁻), sulfatos (SO₄²⁻) e ferro (Fe²⁺). Gases, como o monóxido de carbono (CO), diacetileno (C₂H₂), acetileno (C₂H₂), cianoacetileno (HC₃N), cianeto de hidrogénio (HCN), hidrogénio (H₂) e metano (CH₄), emergem em proporções variáveis. Na superfície, estas moléculas sofrem fotólise, formando cianamida. Na água, o cianeto reage com sulfatos, gerando tiocianato (NCS⁻), e com eletrões, produzindo açúcares simples e precursores de aminoácidos. Imagem adaptada a partir de Rimmer e Shorttle [15].



A formação de nucleósidos catalisada pelos ciclos húmido/seco e pela presença de minerais, como a montmorilonite, ocorrerá através de uma síntese por desidratação, onde uma base nitrogenada (e.g., adenina, citosina) reage com a ribose, formando uma ligação β -N-glicosídica [17,24]. Os fosfatos presentes nos fluidos destas fontes hidrotermais podem ter tido papel fundamental na constituição do grupo fosfato, completando-se a síntese dos nucleótidos [25]. Finalmente, os ciclos de húmido/seco nestas fontes de baixa profundidade podem ter facilitado a polimerização destes nucleótidos em cadeias do tipo das de ARN, através da criação de ligações fosfodiéster [25]. Uma hipótese complementar e relevante é a “Hipótese da Argila” que destaca o papel das argilas como moldes estruturais para esta polimerização [26]. A investigação geológica mais recente, focada no período do Hádico e o início do Arcaico, há mais de 3,5 mil milhões de anos, indica que a crosta terrestre seria dominada por rochas magmáticas, como basaltos e komatiitos, ricas em ferro (Fe) e magnésio (Mg). A interação destas rochas com a água do mar terá resultado na formação de argilas Fe-Mg, sendo exemplo a montmorilonite, uma argila esmectite do tipo 2:1, caracterizada por uma folha octaédrica entre duas folhas tetraédricas de sílica. Tal estrutura confere-lhe propriedades únicas, como a capacidade de troca catiónica, devido à substituição de Si^{4+} por Al^{3+} ou Fe^{3+} , e a criação de microambientes ácidos que facilitam reações químicas. Em solução aquosa, os nucleótidos seriam absorvidos nas superfícies da montmorilonite e, posteriormente, ter-se-iam polimerizado, formando oligómeros de ARN com 30 a 50 monómeros. Este processo é favorecido pelos espaços interlamelares da argila, que concentram os nucleótidos, e pela carga negativa das suas superfícies, que estabiliza as moléculas durante a reação [26]. Assim, estes oligómeros são vistos como um suporte relevante para a “Hipótese do Mundo ARN”. Finalmente, um ponto importante: para que todas estas reações possam acontecer de forma controlada, devem ocorrer em espaço confinado, evitando-se que as moléculas envolvidas nas reações se dispersem. A geração abiótica de ácidos gordos em fontes hidrotermais superficiais poderá ter ocorrido por reações do tipo Fischer-Tropsch (FTT) [27], onde CO e CO_2 são reduzidos na presença de metais como Fe e Ni, formando cadeias de hidrocarbonetos [27,28]. Os reagentes e condições necessários para alimentar estes processos derivam de processos geoquímicos, como a serpentinização, que produz H_2 , gerando um ambiente alcalino (pH 8-10), o que favorece a síntese de compostos orgânicos nas superfícies catalisadoras existentes [29]. Nestas condições, os ácidos gordos acabam por se desprotonar, tornando-se anfífilos, o que leva a que se auto-organizem em vesículas lipídicas. Os ciclos de húmido/seco favorecem a concentração e a auto-organização destas estruturas por

pressão espacial e aumento da alcalinidade, permitindo a formação de proto-membranas capazes de encapsular outras biomoléculas [27].

3.2. As fontes hidrotermais de águas profundas e o aparecimento de redes autocatalíticas

As fontes hidrotermais de fundo oceânico ocorrem em vários campos, dispersos por diferentes profundidades. Alguns exemplos são: a) o Campo Hidrotermal Logachev (3000 m de profundidade) na Dorsal Mesoatlântica; b) o Campo Hidrotermal Lucky Strike (1700 m de profundidade) localizado no Mar dos Açores; c) o Campo Hidrotermal Rainbow (2300-2800 m de profundidade) localizado na Dorsal Mesoatlântica; ou d) o Campo Hidrotermal D. João de Castro (6-40 m de profundidade) localizado entre as ilhas Terceira e São Miguel no arquipélago dos Açores.

Normalmente, a maioria destes sistemas expele fluidos ácidos, existindo ainda os campos ditos “híbridos” com um pH baixo, mas ricos em H_2 , como são exemplo os campos Rainbow no Oceano Atlântico, Von Damm e Piccard no Mar das Caraíbas, Kairei no Oceano Pacífico, e ainda Logachev, também no Oceano Atlântico [30]. Paralelamente, um novo tipo de fontes hidrotermais com fluidos a apresentarem um pH alcalino tem vindo a ser o novo alvo da investigação da origem da vida, sendo as fontes frequentemente associadas à “Hipótese de Metabolismo Primeiro”. Os exemplos de fontes mais famosas são as que compõem o Campo Hidrotermal Lost City [31], localizado a norte dos Açores, e o Campo Hidrotermal Strytan [32], na Islândia. Os estudos mais recentes de modelação da geologia do planeta Terra sugerem que no Hádico-Arcaico estas fontes hidrotermais alcalinas seriam muito mais comuns em virtude das características da ainda jovem crosta terrestre, constituída por rochas ultramáficas em contacto direto com a água do mar, favorecendo uma grande incidência de processos de serpentinização e originando, assim, uma grande quantidade de fluidos alcalinos ricos em H_2 e CH_4 . A inexistência de continentes e de uma tectónica de placas como a moderna resultou num fundo oceânico homogéneo, mas ao mesmo tempo dinâmico, marcado por zonas de *rift* muito mais espalhadas e abundantes, e atividade vulcânica intensa.

Nas atuais fontes hidrotermais alcalinas (FHA) observa-se a existência de um gradiente de pH (9-11 nos fluidos alcalinos vs. 6-8 na água do mar) [12,29]. Sendo um resultado indireto do processo geoquímico de serpentinização, tais gradientes geram forças eletroquímicas que, nas paredes porosas das chaminés hidrotermais contendo Fe e Mg, podem ter sido a fonte de energia que impulsionou o surgimento das primeiras redes autocatalíticas abióticas [9,12]. Este processo de serpentinização fornece ainda hidrogénio molecular (H_2), metano (CH_4) e OH^- , criando-se assim condições redutoras para a síntese de moléculas/iões orgânicos

mais complexos, como formato (HCOO^-), formaldeído (HCHO), acetato (CH_3COO^-), piruvato ($\text{CH}_3\text{COCOO}^-$) e tiol (R-SH), todos relevantes para o surgimento das primeiras cadeias metabólicas (Figura 4) [32,33].

Uma das reações cruciais na origem da vida poderá ter ocorrido com a formação pré-biótica de tioésteres. Em ambiente redutor, o acetato reage com um tiol, produzindo um tioéster que estruturalmente se assemelha à atual acetil-CoA, onde adicionalmente a presença de metaloenzimas modernas tornam possível contextualizar a origem da molécula [34]. Aglomerados de Fe-S em superfícies de Fe, Ni ou molibdênio (Mo) teriam catalisado a redução de CO_2 e gerado ácido tioacético, intermediário que evoluiria para esses tioésteres energéticos (Figura 5) [35,36].

A via de Wood-Ljungdahl, considerada uma das mais antigas vias metabólicas conhecidas, depende de aglomerados Fe-S e de cofatores com tióis, como a coenzima A, para formar acetil-CoA a partir de CO_2 e H_2 [35]. Num contexto pré-biótico, os aglomerados Fe-S, presentes em superfícies de metais de transição como Fe, Ni e Mo, poderiam ter catalisado a redução de CO_2 e a formação inicial de ácido tioacético (CH_3CSOH) [37]. Esta molécula de ácido tioacético,

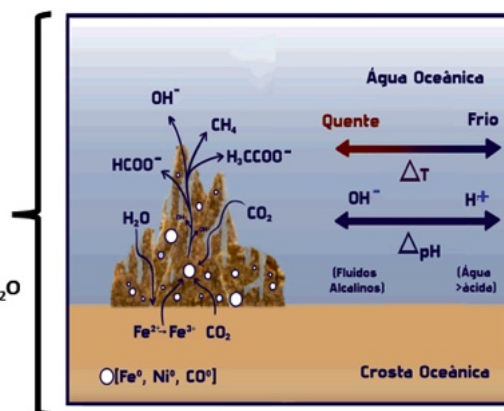
ao reagir com um tiol, formou tioésteres altamente energéticos, precursores de acetil-CoA. O aparecimento deste equivalente pré-biótico constituiu, assim, uma transição crítica de catálise mineral para química orgânica parcialmente autônoma, abrindo caminho para ciclos metabólicos como o ciclo de Krebs, processo pelo qual todos os organismos vivos geram energia na forma de trifosfato de adenosina (ATP) (Figura 6) [38]. Essas etapas terão sido determinantes na passagem de sistemas puramente geoquímicos para sistemas capazes de fixação de carbono, transdução de energia e, por fim, vida.

Adicionalmente, e ainda que como descrito, a investigação mais recente se foque nas fontes hidrotermais alcalinas, importa mencionar um trabalho pioneiro desenvolvido em 1988 por Günter Wächtershäuser [39], e reforçado por Karl Popper [40]. Wächtershäuser propõe que a primeira fonte de energia importante para o futuro despontar da vida na Terra terá sido a formação exergônica (*i.e.*, que liberta energia para o ambiente durante o processo) de pirite (FeS_2) a partir de H_2S e de íons Fe^{2+} . É sugerido o ambiente em que tais reações ocorreriam, *i.e.*, aqueles que hoje se sabem ser os ambientes das fontes hidrotermais

Figura 4 - Os diferentes substratos, reações químicas e compostos gerados numa fonte hidrotermal do tipo alcalino [29,30]. Imagem adaptada de Belthle *et al.* [33].

Síntese Abiótica de :

- **Formato**
(Catalisadores FeS ou NiS)
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \longrightarrow \text{HCOO}^- + \text{H}^+$
- **Acetato**
(Catalisadores)
 $2\text{HCOO}^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{CO}_2$
- **Piruvato a partir de Acetato**
(Catalisadores)
 $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{CO}_2 + \text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_3\text{COCOO}^- + \text{H}_2\text{O}$
- **Tiol**
(Catalisadores FeS ou NiS)
 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{S} \longrightarrow \text{CH}_3\text{SH} + \text{H}_2$



GEOQUÍMICA E O NASCIMENTO DO METABOLISMO: A PONTE PARA A BIOQUÍMICA

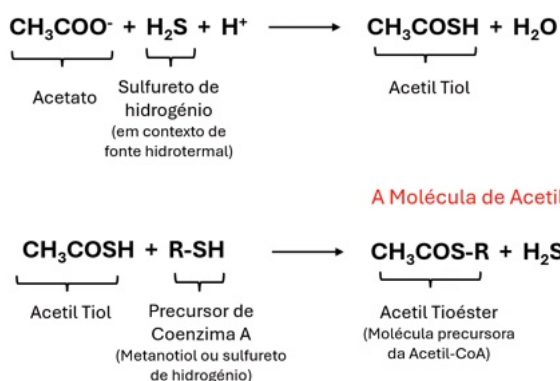


Figura 5 - A síntese abiótica de uma molécula semelhante ao acetil-CoA, tendo como exemplo H_2S a funcionar como um tiol, num contexto pré-biótico [35,36].

A GEOQUÍMICA E O APARECIMENTO DO METABOLISMO: A PONTE PARA A BIOQUÍMICA – ACETIL-CoA

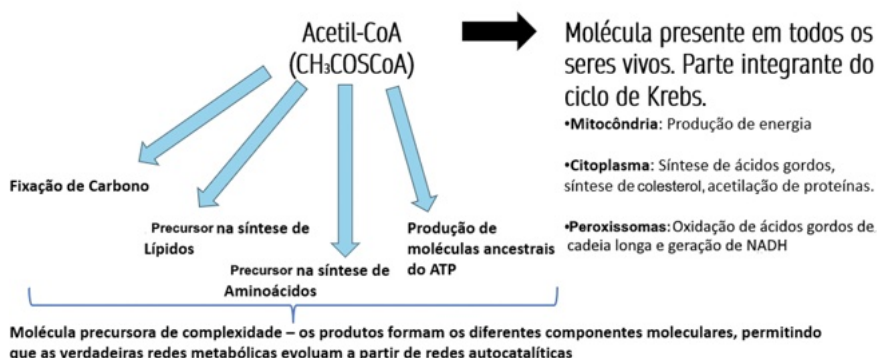


Figura 6 – A molécula de acetil-CoA está presente em várias dimensões espaciais e funcionais no metabolismo moderno [38].

ácidas de fundo oceânico. A reação descrita, termodinamicamente favorável devido à insolubilidade da pirite, liberta prótons e elétrons que poderiam ter sido diretamente aproveitados por sistemas pré-bióticos, dispensando acopladores energéticos complexos exigidos por vias como a metanogénese ou a redução de enxofre. Wächtershäuser observa que algumas arqueias hipertermófilas, dando como exemplo a *Pyrodicticum occultum*, formam revestimentos de pirite quando em cultura, sugerindo a conservação de um metabolismo ancestral baseado nessa reação. O autor argumenta no seu estudo que os centros ferro-enxofre ubiquamente presentes em enzimas modernas, como as ferridoxinas e hidrogenases, serão vestígios desta reação primitiva e prevê que organismos autotróficos produtores de pirite poderiam viver e crescer em meios contendo FeCO_3 ou FeS e CO_2 sem necessidade de H_2 ou enxofre. Em resumo, esta hipótese defende a importância evolutiva do enxofre e do ferro, procura explicar a relativa acidez exibida por muitas arqueias, e fornece um quadro geoquímico coerente para a transição entre processos abióticos e a bioquímica autotrófica inicial, contribuindo de forma sólida para o debate sobre as fontes energéticas que terão dado origem às primeiras redes autocatalíticas, geração de moléculas orgânicas e importantes, e possível despontar dos primeiros sistemas vivos com origem em fontes hidrotermais ácidas de fundo oceânico.

4. Complementaridade de processos e funções

4.1. A Hipótese do Metabolismo Gerido

A vida, tal como a conhecemos na Terra, baseia-se em três funções fundamentais e interdependentes (Figura 7): a) Replicação, que envolve o armazenamento, processamento e transmissão da informação adquirida para as gerações seguintes; b) Metabolismo, responsável pela captura e utilização de energia para a síntese molecular necessária para manter o

próprio sistema; e c) Compartimentalização, que define a estrutura física (por exemplo, membranas) responsável por isolar o sistema vivo do meio externo, controlar a troca seletiva de moléculas, fluidos e iões entre ambos os ambientes, e manter uma homeostasia dinâmica [41]. Assim, para que um sistema seja considerado vivo, é necessário que estas três funções estejam presentes e operem em simultâneo. Com base nesta premissa, surgiu a “Hipótese do Metabolismo Gerido” [10], que propõe uma coevolução entre metabolismo, compartimentalização e moléculas reguladoras de tipo ARN, que terão assumido as funções de gestão e otimização de todo o sistema químico, tornando-o funcional. A origem da vida é, assim, entendida como o despontar de uma coordenação interdependente da capacidade de fixação de carbono, geração de energia química, e gestão de informação, integrando-se numa só proposta as características centrais da “Hipótese do Mundo ARN” [8] e da “Hipótese do Metabolismo Primeiro” [9].

4.2. O paradigma da “Hipótese do Metabolismo Gerido”

A “Hipótese do Metabolismo Gerido” [10] defende a presença simultânea dos processos descritos nas “Hipótese do Mundo ARN” [8] e “Hipótese do Metabolismo Primeiro” [9] como premissa obrigatória para o aparecimento do primeiro sistema vivo. No entanto, estando estas teorias associadas a tipos de fontes hidrotermais espacialmente separadas, surge o paradoxo inerente. Como podem as três funções ser garantidas num mesmo sistema, se de acordo com as duas hipóteses primárias estas emergem em ambientes espacialmente díspares? Para abordar este paradoxo, existem atualmente duas linhas de investigação assentes em dois cenários. No primeiro cenário, Krishnamurthy *et al.* [42] demonstram que α -cetoácidos como piruvato, glioxilato e oxaloacetato, reagindo com cianeto e fontes de amoníaco, como

Figura 7 – As três funções primárias consideradas essenciais para que um sistema na Terra seja considerado Vida: Replicação, Metabolismo e Compartimentalização. Imagem adaptada de Bartlett et al. [41].



diamidofosfato ou ureia em condições simuladas de fontes hidrotermais superficiais, conduzem à síntese de orotato, um intermediário na via de síntese de nucleótidos, e à formação de hidantoínas. Moléculas precursoras de aminoácidos, como a alanina, o ácido aspártico e a glicina, terão funcionado como precursores de sistemas capazes de fixar carbono, constituindo etapas compatíveis com a emergência de um protometabolismo. Este estudo indica, assim, uma possível coevolução entre metabolismo e ARN, apoiando a manutenção dos processos previstos na “Hipótese do Metabolismo Gerido”, em fontes hidrotermais de superfície. No segundo cenário, que considera fontes hidrotermais profundas, Longo e Damer [43] definem como ponto de partida para a origem da vida a emergência de um protometabolismo e a geração de vesículas lipídicas a partir de moléculas orgânicas. Estas moléculas são sintetizadas em reações entre CO₂ e H₂, alimentadas por gradientes de pH sob superfícies de minerais com características catalíticas. A novidade deste estudo resulta da demonstração de que a síntese de moléculas de tipo ARN poderá ocorrer nos poros das chaminés destas fontes hidrotermais por via da polimerização de monômeros, alcançando até quatro unidades do tipo de nucleótidos previamente sintetizados na superfície de minerais, como pirite e esfalerite, a atuarem como catalisadores de reações envolvendo moléculas de CO₂, H₂S e H₂. Este processo acontece porque os poros concentram essas moléculas e os gradientes térmicos, gerados pelas diferenças de temperatura entre o interior quente dos poros e o exterior mais frio, favorecem este tipo de polimerização. Adicionalmente, géis minerais que revestem os poros terão ajudado a superar o problema da água salina, que normalmente dificulta a ligação química entre nucleótidos, permitindo a sua polimerização [45].

Finalmente, à medida que as protocélulas se formam, com a montagem das respetivas protomembranas, o ARN terá tido as condições para evoluir em tamanho e complexidade, atuando como molécula de gestão de informação e regulação das reações químicas dos processos metabólicos existentes. Assim, Longo e Damer [43] defendem que a coevolução entre ARN e metabolismo também seria viável neste contexto de fonte hidrotermal profunda. Desta forma, ambos os cenários reforçam a viabilidade da “Hipótese do Metabolismo Gerido” ao demonstrar que ARN e metabolismo poderiam ter emergido de forma interdependente num mesmo sistema geoquímico, quer em fontes hidrotermais superficiais, quer profundas.

5. A “Hipótese do Metabolismo Gerido” no contexto da geologia do Hádico e início do Arcaico

Avanços recentes no conhecimento da geologia do Hádico, e início do Arcaico, sugerem um novo cenário unificador para a origem da vida, mantendo como eixo central os sistemas hidrotermais. Durante o Hádico (4,5–4,0 Ga), a crosta terrestre era caracterizada por uma abundância de fontes hidrotermais, tanto alcalinas quanto ácidas, distribuídas de forma ubíqua numa crosta oceânica relativamente pouco profunda, composta por uma geologia máfica/ultramáfica rica em olivina, piroxena, feldspatos, óxidos e silicatos [46]. Adicionalmente, muitas destas fontes estariam cobertas por sedimentos vulcânicos porosos e carbonáceos, como os observados no *Greenstone Belt* de Barberton [45,46]. A infiltração contínua dos fluídos hidrotermais terá criado sistemas geoquímicos dinâmicos que se comportavam como microrreatores químicos. Esses sedimentos, ricos em superfícies minerais reativas (*e.g.*, sílica, sulfitos), e parcialmente

protegidos da intensa radiação UV, facilitavam a síntese, concentração, estabilização e complexificação de moléculas pré-bióticas, como a síntese de bases nitrogenadas, a formação de vesículas lipídicas e o estabelecimento de redes químicas autocatalíticas. Resumidamente, a permeação constante das camadas sedimentares porosas pelos fluidos hidrotermais permitiu o desenvolvimento de condições físico-químicas dinâmicas, incluindo gradientes de pH, temperatura e concentração de elementos como C, H, N, O, P e metais de transição, favorecendo a coexistência de múltiplos processos pré-bióticos. Assim, torna-se plausível a existência de campos hidrotermais de natureza mista, capazes de sustentar em simultâneo a síntese de ARN, a formação de vesículas e o estabelecimento de ciclos metabólicos primitivos [45]. Desta forma, tal contexto geológico sugere uma possível interconectividade entre diferentes tipos de ambientes, permitindo que moléculas primitivas de ARN, potencialmente sintetizadas em sedimentos vulcânicos de fontes hidrotermais de superfície de características ácidas, fossem transportadas ou migrassem facilmente para sistemas hidrotermais adjacentes, ácidos ou alcalinos, onde redes autocatalíticas e protocélulas poderiam estar em formação. Este cenário integrado, que reflete as condições do nosso planeta Terra de há quatro mil milhões de anos, reforça a plausibilidade da “Hipótese do Metabolismo Gerido” [10] ao propor uma convergência funcional e espacial dos ambientes hidrotermais, unificando abordagens antes vistas como divergentes.

6. Conclusão

As fontes hidrotermais são cada vez mais reconhecidas como ambientes cruciais para a origem da vida na Terra primitiva. Os estudos geológicos mais recentes sugerem a possível coexistência, durante o Hádico e o início do Arcaico, de fontes hidrotermais alcalinas e ácidas, ambas em maior abundância do que hoje, e ainda a existência de sistemas hidrotermais cobertos por sedimentos vulcânicos que reuniriam todas as condições para a coexistência espacial e temporal de todo o tipo de reações pré-bióticas consideradas para as diferentes hipóteses sobre a origem da vida. É neste novo cenário misto de fontes hidrotermais alcalinas e ácidas, em alguns casos integradas em ambientes sedimentares de substratos vulcânicos coexistindo num oceano substancialmente menos profundo que os oceanos atuais, que este artigo propõe uma plausibilidade reforçada para a “Hipótese do Metabolismo Gerido”. Esta hipótese sugere uma evolução temporal e fisicamente interdependente entre metabolismo e ARN, integrando reações autocatalíticas com sistemas de gestão e transmissão de informação genética. Esta nova abordagem reforça, assim, a ideia de que a vida terá emergido como um processo integrado

com a evolução geológica do planeta, sendo dessa forma um reflexo da geodinâmica e da geoquímica da Terra. Ainda assim, apesar dos avanços teóricos e da visão proposta de analisar as diferentes hipóteses no âmbito de condições primitivas, subsistem lacunas críticas, como a demonstração experimental da síntese de nucleótidos dentro de protocélulas ou a estabilidade e replicação de polímeros precursores de ARN em ambientes instáveis e variáveis. Perante todos estes pressupostos, a investigação na procura da Origem da Vida afigura-se inevitavelmente uma tarefa interdisciplinar de grande porte, só possível de ser atendida com a integração de diversas áreas da ciência. Compreender a transição de um mundo abiótico para um sistema vivo parece, assim, apenas ser possível por via da integração de conhecimentos de diferentes áreas da ciência, *e.g.*, Química, Bioquímica, Biologia, Geologia, Geoquímica, Geofísica, Física e Modelação Computacional. O desafio é grande, mas a eventual recompensa acabará por ser a de uma resposta a uma das mais complexas questões colocadas pela ciência.

Agradecimentos

A equipa agradece o financiamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) para o projeto ORIGINS (022.05284.PTDC), assim como para a bolsa de doutoramento de José M. Orench-Benvenuti (2024.01442.BD). O Centro de Química Estrutural agradece o apoio financeiro da FCT através dos projetos UID/100/2025. O Instituto de Ciências Moleculares reconhece o apoio financeiro da FCT através do projeto LA/P/0056/2020. Este artigo é enquadrado no Colégio Polar e de Ambientes Extremos (Polar2E) da Universidade de Lisboa. Rute Cesário e Ana Colaço agradecem à FCT através de fundos nacionais via contrato CEEC 2021.03267.CEECIND/CP1651/CT0010 (DOI: 10.54499/2021.03267.CEECIND/CP1651/CT0010) e CEECIND/00101/2021 (DOI: 10.54499/2021.00101.CEECIND/CP1669/CT0001), respetivamente. Ana Colaço agradece também o apoio financeiro da FCT, através dos projetos UIDB/05634/2020 e UIDP/05634/2020. João Duarte agradece o financiamento da FCT I.P./MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) – UIDB/50019/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/50019/2020), UIDP/50019/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/50019/2020) e LA/P/0068/2020 (DOI: 10.54499/LA/P/0068/2020). João Duarte agradece ainda à FCT pelo contrato CEEC Institucional 2018, CEECINST/00032/2018/CP1523/CT0002 (DOI: 10.54499/CEECINST/00032/2018/CP1523CT0002). O IVAR agradece o apoio institucional da FCT através do Projeto UID/00643/2025.

Referências

- [1] P. Jenniskens, M. A. Wilson, D. Packan, C. O. Laux, C. H. Krüger, I. D. Boyd, O. P. Popova, M. Fonda, *Earth, Moon and Planets* **1998**, 82, 57-70. DOI: 10.1023/A:1017017728166.
- [2] Q. H. S. Chan, M. E. Zolensky, *Water and organics in meteorites*, in R. Thombre, P. Vaishampayan (eds.), "New Frontiers in Astrobiology", Elsevier, **2022**, 67-110. DOI: 10.1016/B978-0-12-824162-2.00008-7.
- [3] D. P. Glavin, C. M. O'D. Alexander, J. C. Aponte, J. P. Dworkin, J. E. Elsila, H. Yabuta, *The Origin and Evolution of Organic Matter in Carbonaceous Chondrites and Links to Their Parent Bodies*, in N. Abreu (ed.), "Primitive Meteorites and Asteroids", Elsevier, **2018**, 205-271. DOI: 10.1016/B978-0-12-813325-5.00003-3.
- [4] M. Taylor, N. Altobelli, B. Buratti, M. Choukroun, *Phil. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2017**, 375, 20160262. DOI: 10.1098/rsta.2016.0262.
- [5] H. Yabuta, G. D. Cody, C. Enggrand, Y. Kebukawa, [...], Y. Tsuda, *Science* **2023**, 379, 162173. DOI: 10.1126/science.abn9057.
- [6] D. S. Lauretta, H. L. Enos, A. T. Polit, H. L. Roper, C. W. V. Wolner, *OSIRIS-REx at Bennu: Overcoming challenges to collect a sample of the early Solar System*, in A. Longobardo (ed.), "Sample Return Missions", Elsevier, **2021**, 163-194. DOI: 10.1016/B978-0-12-818330-4.00008-2.
- [7] W. Martin, J. Baross, D. Kelley, M. J. Russel, *Nat. Rev. Microbiol.* **2008**, 6, 805-814. DOI: 10.1038/nrmicro1991.
- [8] P. Higgs, N. Lehman, *Nat. Rev. Genet.* **2015**, 16, 7-17. DOI: 10.1038/nrg3841.
- [9] F. AL Anet, *Curr. Opin. Chem. Biol.* **2004**, 8, 654-659. DOI: 10.1016/j.cbpa.2004.10.005.
- [10] J. E. Stewart, *Found. Sci.* **2019**, 24, 171-195. DOI: 10.1007/s10699-018-9563-1.
- [11] M. Fedor, J. Williamson, *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* **2005**, 6, 399-412. DOI: 10.1038/nrm1647.
- [12] G. Pillot, Ó. Santiago, S. Kerzenmacher, P.-P. Liebgott, *Life* **2023**, 13, 356. DOI: 10.3390/life13020356.
- [13] J. C. Xavier, S. Kauffman, *Phil. Trans. R. Soc. A* **2022**, 380, 20210244. DOI: 10.1098/rsta.2021.0244.
- [14] S. A. Harrison, H. Ramm, F. Liu, A. Halpern, R. N. Plmeira, N. Lane, *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **2023**, 54, 327-350. DOI: 10.1146/annurev-ecolsys-110421-101509.
- [15] P. B. Rimmer, O. Shorttle, *Life* **2019**, 9, 12. DOI: 10.3390/life9010012.
- [16] D. Wang, A. Farhana, *Biochemistry, RNA Structure*, in StatPearls Publishing, **2025** PMID: 32644425.
- [17] S. A. Benner, H.-J. Kim, M. A. Carrigan, *Acc. Chem. Res.* **2012**, 45, 2025-2034. DOI: 10.1021/ar200332w.
- [18] J. P. Ferris, L. E. Orgel, *J. Am. Chem. Soc.* **1966**, 88, 1074. DOI: 10.1021/ja00957a050.
- [19] M. Levy, S. L. Miller, J. Oró, *J. Mol. Evol.* **1999**, 19, 165-168. DOI: 10.1007/pl00006539.
- [20] R. Saladino, C. Crestini, G. Costanzo, R. Negri, E. Di Mauro, *Bioorg. Med. Chem.* **2001**, 9, 1249-1253. DOI: 10.1016/S0968-0896(00)00340-0.
- [21] M. Robertson, S. Miller, *Nature* **1995**, 375, 772-774. DOI: 10.1038/375772a0.
- [22] A. S. U. Choughuley, A. S. Subbaraman, Z. A. Kazi, M. S. Chadha, *Biosystems* **1977**, 9, 73-80. DOI: 10.1016/0303-2647(77)90014-4.
- [23] A. Choughuley, A. Subbaraman, Z. Kazi, M. Chadha, *Biosyst.* **1977**, 9, 73-80. DOI: 10.1016/0303-2647(77)90014-4.
- [24] T. P. Roche, D. M. Fialho, C. Menor-Salván, R. Krishnamurthy, G. B. Schuster, N. V. Hud, *Chem. Eur. J.* **2023**, 29, e202203036. DOI: 10.1002/chem.202203036.
- [25] M. Gull, H. A. Cruz, R. Krishnamurthy, M. Pasek, *Commun. Chem.* **2025**, 8, 187. DOI: 10.1038/s42004-025-01577-0.
- [26] J. T. Klopogge, H. Hartman, *Life* **2022**, 12, 259. DOI: 10.3390/life12020259.
- [27] S. Rajamani, A. Vlassov, S. Benner, A. Coombs, F. Olasagasti, D. Deamer, *Orig. Life Evol. Biosph.* **2008**, 38, 57-74. DOI: 10.1007/s11084-007-9113-2.
- [28] B. H. Patel, C. Percivalle, D. J. Ritson, C. D. Duffy, J. D. Sutherland, *Nat. Chem.* **2015**, 7, 301-307. DOI: 10.1038/nchem.2202.
- [29] L. Schwander, M. Brabender, N. Mrnjavac, J. L. E. Wimmer, M. Preiner, W. F. Martin, *Front. Microbiol.* **2023**, 14, DOI: 10.3389/fmicb.2023.1257597.
- [30] J. F. Holden, H. Sistu, *Front. Microbiol.* **2023**, 14, 1257597. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1093018.
- [31] C. Konn, J. L. Charlou, N. G. Holm, O. Mousis, *Astrobiology* **2015**, 15, 381-399. DOI: 10.1089/ast.2014.1198.
- [32] C. Gutiérrez-Ariza, L. M. Barge, Y. Ding, S. S. S. Cardoso, S. E. McGlynn, R. Nakamura, D. Giovanelli, R. Price, H. E. Lee, F. J. Huertas, C. I. Sainz-Díaz, J. H. E. Cartwright, *Prog. Earth Planet. Sci.* **2024**, 11, 11. DOI: 10.1186/s40645-023-00603-w.
- [33] K. S. Belthle, H. Tüysüz, *ChemCatChem* **2023**, 15, e202201462. DOI: 10.1002/cctc.202201462.
- [34] J.-H. Jeoung, S. Goetzl, S. E. Hennig, J. Fessler, C. Wörmann, J. Dendra, H. Dobbek, *Biol. Chem.* **2014**, 395, 545-558. DOI: 10.1515/hsz-2013-0290.
- [35] W. F. Martin *Front. Microbiol.* **2020**, 11, 817. DOI: 10.3389/fmicb.2020.00817.
- [36] E. Camprubi, S. F. Jordan, R. Vasiladiou, N. Lane, *IUBMB Life* **2017**, 69, 373-381. DOI: 10.1002/iub.1632.
- [37] W. Nitschke, M. J. Russell, *Phil. Trans. R. Soc. B* **2013**, 368, 20120258. DOI: 10.1098/rstb.2012.0258.
- [38] Y. Wang, H. Yang, C. Geerts, A. Furtos, P. Waters, D. Cyr, S. Wang, G. A. Mitchell, *Mol. Genet. Metab.* **2023**, 138, 106966. DOI: 10.1016/j.ymgme.2022.106966.
- [39] G. Wächtershäuser, *System. Appl. Microbiol.* **1988**, 10, 207-210. DOI: 10.1016/S0723-2020(88)80001-8.
- [40] K. Popper, *Nature* **1990**, 344, 387. DOI: 10.1038/344387a0.
- [41] S. Bartlett, M. L. Wong, *Life* **2020**, 10, 42. DOI: 10.3390/life10040042.
- [42] S. Pulletikurti, M. Yadav, G. Springsteen, R. Krishnamurthy, *Nat. Chem.* **2022**, 14, 1142-1150. DOI: 10.1038/s41557-022-00999-w.
- [43] A. Longo, B. Damer, *Life* **2020**, 10, 52. DOI: 10.3390/life10050052.
- [44] M. Dörr, P. M. G. Löffler, P.-A. Monnard, *Curr. Org. Synth.* **2012**, 9, 735-763. DOI: 10.2174/157017912803901691.
- [45] F. Westall, K. Hickman-Lewis, N. Hinman, P. Gautret, K. A. Campbell, J. G. Bréhéret, F. Foucher, A. Hubert, S. Sorieul, A. V. Dass, T. P. Kee, T. Georgelin, A. Brack, *Astrobiology* **2018**, 18, 259-293. DOI: 10.1089/ast.2017.1680.
- [46] N. Arndt, *Barberton Greenstone Belt*, in M. Gargaud et al. (eds.), "Encyclopedia of Astrobiology", Springer, Berlin, **2015**. DOI: 10.1007/978-3-662-44185-5_148.

>

Ana Colaço

Instituto de Investigação em Ciências do Mar – OKEANOS, Universidade dos Açores. Investigadora Principal em Ciências do Mar no Centro de Investigação Okeanos, da Universidade dos Açores. Doutorada em Ecologia e Biosistemática pela Universidade de Lisboa. Atua nas áreas de Biologia Marinha e Ciências do Ambiente, com trabalhos reconhecidos no estudo de ecossistemas marinhos profundos, biodiversidade bentônica, conservação dos habitats marinhos e efeitos ambientais de atividades antropogénicas no mar profundo. Licenciada

em Biologia (Recursos Faunísticos e Ambiente) pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

maria.aa.colaco@uac.pt

ORCID.org/0000-0002-6462-5670

>

*Carlos Ramos

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Ciências ULisboa).

Licenciado em Biologia com especialização em Biologia Celular e Biotecnologia pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, onde também

concluiu um *minor* em Geologia. Forte dedicação à compreensão das interações entre processos biológicos e geológicos, com um olhar interdisciplinar sobre a origem da vida, ecossistemas marinhos e dinâmica planetária. Encontra-se a terminar o seu Mestrado em Ciências do Mar, tendo como tema "A vida como reflexo da geoquímica planetária". É autor do projeto de comunicação de ciência "Um Minutinho de Ciência".
fc53525@alunos.ciencias.ulisboa.pt
ORCID.org/0009-0002-9431-0458

>

Catarina Silva

IVAR - Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos, Universidade dos Açores.

Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA).

Investigadora Pós doutorada no Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos, e no Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores. Doutorada em Geologia, com especialização em Vulcanologia pela Universidade dos Açores. Desenvolve investigação em vulcanologia e riscos geológicos, focando-se em monitori-

zação e avaliação de emissões geotérmicas, termologia hidrotermal e análise dos riscos naturais nos Açores. Participa ativamente em iniciativas de vigilância sismovulcânica, e monitorização geoquímica em ambientes vulcânicos. catarina.pp.silva@azores.gov.pt
ORCID.org/0000-0002-1196-306X

>

Fátima Viveiros

IVAR – Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos, Universidade dos Açores. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade dos Açores. Professora Associada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade dos Açores. Doutorada pela Universidade dos Açores em Geologia, especialidade de Vulcanologia. Também nesta universidade obteve os graus de licenciada em Biologia/Geologia, via ensino, e de mestre em Vulcanologia e Riscos Geológicos. A sua área de especialidade é a geoquímica de gases, com particular interesse no estudo de fumarolas hidrotermais e de zonas de emissão difusa de dióxido de carbono. Investigadora no Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos. Maria.FB.Viveiros@azores.gov.pt
ORCID.org/0000-0002-0442-7955

>

João C. Duarte

Instituto D. Luís, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Ciências ULisboa). Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Ciências ULisboa). Professor da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Doutorado em Geologia na Universidade de Lisboa, com tese sobre a tectónica do Golfo de Cádiz. Mestrado em Cartografia Geológica pela Universidade de Évora, e licenciatura em Geologia e Recursos Naturais. Os seus interesses de investigação centram-se nas ciências da Terra e do Ambiente, com ênfase em geologia dinâmica, tectónica, evolução de margens continentais, dissipação de maré e a fronteira das placas Açores Gibraltar.

jdduarte@ciencias.ulisboa.pt
ORCID.org/0000-0001-7505-3690

>

João Canário

Centro de Química Estrutural, Instituto Superior Técnico. Instituto de Ciências Moleculares, Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico. Professor Associado com Agregação no Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Doutorado em Ciências Ambientais pela Universidade Nova de Lisboa, com agregação em Química pelo Instituto Superior Técnico. Investigação centrada na biogeoquímica do mercúrio no ambiente, metilação em sedimentos costeiros, e ecossistemas polares. Trabalha também com elementos traço e com ciclos de contaminação no Ártico e Antártida, e alterações nas regiões polares devido às mudanças climáticas. joao.canario@tecnico.ulisboa.pt
ORCID.org/0000-0002-5190-446X

>

José M. Orench Benvenuti

Centro de Química Estrutural, Instituto Superior Técnico. Instituto de Ciências Moleculares, Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico. Estudante de Doutoramento em Química no Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Desenvolve investigação em biogeoquímica de fontes hidrotermais, com ênfase em astrobiologia e estudo da origem da vida da Terra, e aplicabilidade à habitabilidade das luas geladas do sistema solar. Tem o Mestrado em Ciências Biológicas pela Northern Illinois University, e a Licenciatura em Microbiologia Industrial pela University of Puerto Rico-Mayaguez. Os seus interesses de investigação incluem microbiologia, geociências ambientais e geoquímica, com especial atenção à formação de protocélulas. orench.benvenuti@gmail.com
ORCID.org/0009-0007-8748-3971

>

Lara Brito de Gouveia

Centro de Química Estrutural, Instituto Superior Técnico. Instituto de Ciências Moleculares, Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico. Estudante de Mestrado em Engenharia Química no Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Obteve a licenciatura em Engenharia Química no Instituto Superior Técnico. As suas áreas de interesse são a astrobiologia e cosmoquímica. Atualmente desenvolve trabalho relacionado com as fontes hidrotermais, onde foca o estudo da origem da vida na Terra e habitabilidade das luas geladas no sistema solar. lara.gouveia@tecnico.ulisboa.pt
Ciência ID/DC1B-59C5-7EEF

>

Madalena Carvalho

Centro de Química Estrutural, Instituto Superior Técnico. Instituto de Ciências Moleculares, Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico. Licenciada em Engenharia do Ambiente pelo Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Possui o Mestrado em Engenharia do Ambiente pelo Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. A sua tese de Mestrado incide sobre as espécies iónicas e metais traço em fluidos de fontes hidrotermais, e quais as implicações para a origem da vida na Terra e em luas geladas. Ist193536@tecnico.ulisboa.pt
Ciência ID/5515-A2DF-0BA7

>

Paulo Rodrigues

Centro de Química Estrutural, Instituto Superior Técnico. Instituto de Ciências Moleculares, Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico. Mestrado em Engenharia do Ambiente no Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Dissertação da tese de mestrado sobre o conteúdo mineral e elementos traço em fontes hidrotermais,

com vista à compreensão das condições da origem da vida e sua analogia com ambientes extraterrestres. paulo.rodrigues@tecnico.ulisboa.pt
Ciência ID/9619-687D-4DD3

>

Rute Cesário

Centro de Química Estrutural, Instituto Superior Técnico. Instituto de Ciências Moleculares, Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico. Doutorada em Engenharia do Ambiente pelo Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Investigadora na área de biogeoquímica do mercúrio em ambientes aquáticos. Professora Convidada no Instituto Superior Técnico, lecionando aulas laboratoriais ligadas à garantia de qualidade, análise de ambientes marinhos e bioquímica ambiental. rute.cesario@tecnico.ulisboa.pt
ORCID.org/0000-0003-1832-5391

>

Zita Martins

Centro de Química Estrutural, Instituto Superior Técnico. Instituto de Ciências Moleculares, Instituto Superior Técnico. Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico. Professora Associada com Agregação no Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Licenciatura em Química do Instituto Superior Técnico, e doutoramento em Química (Astrobiologia) pela Universidade de Leiden. Foi Royal Society University Research Fellow no Imperial College London, Professora Convidada na Université Nice Sophia Antipolis e Visiting Scientist na NASA Goddard. Investigadora nas áreas de astrobiologia e cosmoquímica. Preside ao comité de especialistas “Luas dos Planetas Gigantes” da Agência Espacial Europeia (ESA). zita.martins@tecnico.ulisboa.pt
ORCID.org/0000-0002-5420-1081

A Química da Pastelaria

A Química da Pastelaria é um projeto de divulgação científica e formação criado por Isa Ingrez, mestre em engenharia química e biológica e investigadora no setor alimentar, dedicado à exploração da ciência que sustenta a pastelaria. Através de conteúdos educativos nas plataformas Instagram e YouTube, o projeto traduz conceitos de química alimentar, ciência dos ingredientes e tecnologia de processos em explicações acessíveis e aplicadas ao contexto real da produção de bolos e sobremesas. Num setor onde a formação técnica continua frequentemente centrada na reprodução de receitas e técnicas empíricas, a Química da Pastelaria surge com a missão de aproximar profissionais e entusiastas da compreensão molecular dos fenómenos que ocorrem durante o processo de preparação. O objetivo é capacitar pasteleiros, *cake designers* e estudantes a interpretar receitas criticamente, diagnosticar falhas de produção e desenvolver formulações próprias com maior autonomia. Através de experiências, demonstrações práticas e explicações fundamentadas em ciência alimentar, a Química da Pastelaria contribui para tornar a química mais tangível, mostrando como os princípios científicos estão presentes no quotidiano de milhares de profissionais da gastronomia.

Veja mais em [instagram.com/quimicadapastelaria](https://www.instagram.com/quimicadapastelaria);
[youtube.com/@quimicadapastelaria](https://www.youtube.com/@quimicadapastelaria)

INGRÊZ
Química da Pastelaria

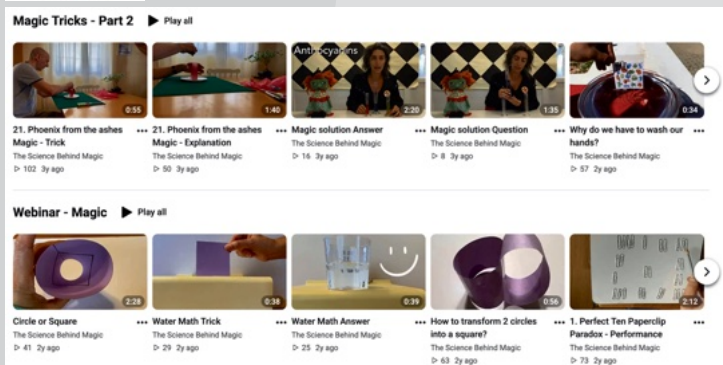
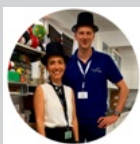


Demonstração experimental durante formação de Química da Pastelaria®.

>

Vasco Bonifácio

vasco.bonifacio@tecnico.ulisboa.pt



Truques de magia para explicar princípios científicos. @The Science Behind Magic.

>

Vasco Bonifácio

vasco.bonifacio@tecnico.ulisboa.pt

Ciência e Magia...

“The Science Behind Magic” é um canal do YouTube criado em 2022, resultado de uma parceria entre Rute Oliveira, professora de Física e Química e o químico escocês Adrian Allan. Apaixonado pela Magia, Adrian utiliza, há muitos anos, truques de magia nas suas aulas para introduzir novos conceitos científicos, mostrando que por detrás de um simples truque existe sempre muita ciência. O canal surgiu precisamente da vontade de partilhar estes recursos e de permitir que mais professores possam utilizá-los em contexto educativo. Cada atividade é acompanhada de um tutorial sobre a apresentação do truque e um segundo vídeo dedicado à explicação científica envolvida. Paralelamente, foi criado um *website* do projeto, apresentado no festival *Science on Stage*, em 2024, em Turku, na Finlândia.

Veja mais em [youtube.com/channel/UCQ12Nr_ibfT-ZOsOzIBQpNdw](https://www.youtube.com/channel/UCQ12Nr_ibfT-ZOsOzIBQpNdw); sites.google.com/view/thescience-behindmagic

Supersuits - A Curta Era que Mudou a Natação para Sempre

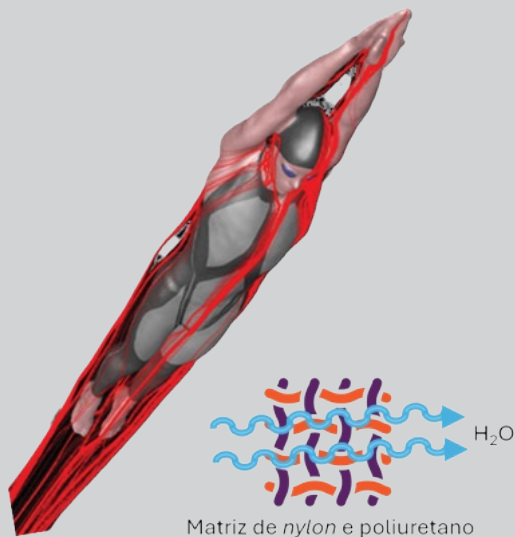
Entre 2008 e 2009, a natação mundial atravessou um dos períodos mais controversos da sua história recente. Não foi por causa de *doping* biológico, mas sim devido a uma inovação tecnológica que transformou piscinas em laboratórios de velocidade: os *supersuits*. Feitos de poliuretano e outros materiais não-têxteis, estes fatos revolucionaram o rendimento de tal maneira que, em apenas dois anos, centenas de recordes foram pulverizados. O fenômeno ficou registado como um dos exemplos mais claros de “dopagem tecnológica” no desporto.

O ponto de viragem surgiu em 2008 com o lançamento do Speedo LZR Racer. Criado com a colaboração de engenheiros aeroespaciais e testado em túneis de vento, o fato apresentava um conjunto de inovações inéditas na natação: superfícies hidrofóbicas extremamente lisas, costuras coladas em vez de cosidas, compressão firme e uniforme e painéis que modificavam as forças intermoleculares e reduziam o atrito de forma mensurável. O impacto foi imediato. Nos Jogos Olímpicos de Pequim, nesse mesmo ano, 25 recordes mundiais foram quebrados, um número incomum para um único evento, sobretudo numa modalidade onde a evolução costuma ser lenta e milimétrica.

Se 2008 levantou suspeitas, 2009 confirmou-as. Novas marcas entraram na corrida e produziram fatos com ainda mais poliuretano, alguns praticamente impermeáveis. Nos Campeonatos do Mundo de Roma, o efeito foi quase irrereal: mais de 40 recordes mundiais caíram apenas durante a competição. Ao longo do ano, entre marcas internacionais e nacionais, contabilizaram-se centenas de recordes batidos, muitos deles com margens de melhoria raramente vistas na história da modalidade. Treinadores, comentadores e antigos nadadores soaram o alarme.

A evolução era demasiado uniforme e demasiado acentuada para ser atribuída apenas ao treino ou ao talento. À medida que os tempos caíam, cresciam também as críticas. Vários atletas questionaram a justiça competitiva, argumentando que o acesso ao fato certo valia mais do que meses de trabalho no ginásio. Estava-se a quebrar a continuidade estatística da modalidade, essencial para o prestígio e análise do alto rendimento.

Em julho de 2009, a FINA (Federação Internacional de Natação; atualmente *World Aquatics*) votou uma mudança drástica de regulamentos, implementada a 1 de janeiro de 2010: apenas materiais têxteis seriam permitidos; proibição de todos os fatos em poliuretano



e derivados não-têxteis; limite de espessura e compressão; redução da área de cobertura: homens apenas da cintura aos joelhos, e mulheres dos ombros aos joelhos.

Após a proibição, tornou-se evidente o impacto artificial dos *supersuits*. Muitos recordes estabelecidos em 2009 permaneceram inquebráveis durante vários anos, desafiando os melhores nadadores do mundo, agora sem a ajuda do polímero mágico. A breve era dos *supersuits* deixou uma marca profunda. Mostrou que a inovação pode ser fascinante, mas também perigosa quando se transforma no principal fator competitivo. Foi um alerta para todo o desporto sobre a necessidade de garantir que a inovação tecnológica não se sobreponha ao mérito desportivo, preservando a igualdade de condições entre atletas e a integridade das competições. Ainda assim, este fenómeno mostra como a ciência consegue modificar do dia para a noite as nossas vidas com pequenas mudanças que se tornam inovações gigantescas, seja no dia a dia de um comum mortal, ou em desportos de alta competição.

Saiba mais em:

Speedo FastSkin LZR Racer, mundoeducacao.uol.com.br/quimica/vulcanizacao-borracha.htm (acedido em 19/03/2026).

Full Body Swimsuit Now Banned for Professional Swimmers, abcnews.com/Politics/full-body-swimsuit-now-banned-professional-swimmers/story?id=9437780 (acedido em 19/03/2026).

>

Grupo de Químicos Jovens

gqj@spq.pt

A Luz Invisível e as Cores Escondidas

>
Marta C. Corvo

Introdução

Imagina que tens uma lanterna capaz de revelar coisas invisíveis. Quando a ligas, alguns objetos continuam iguais, mas outros começam a brilhar com cores intensas. O mais surpreendente é que algumas substâncias presentes em alimentos, vitaminas e outros produtos do quotidiano conseguem fazer isto quando iluminadas com luz ultravioleta. Nesta atividade vamos descobrir um fenómeno fascinante chamado fluorescência.



Material

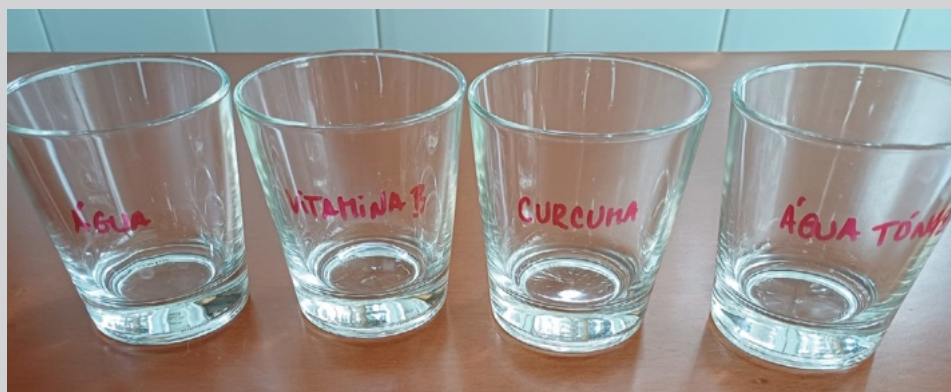
- Lanterna UV
- Quatro copos transparentes
- Copo medidor
- Água
- Água tônica (opcional)
- Comprimido de vitamina B₂ ou multivitamínico com vitamina B₂
- Curcuma em pó
- Colher de chá
- Papel de cozinha
- Marcador

ATENÇÃO: Não olhar diretamente para a luz UV nem a apontar para os olhos ou pele. A lanterna deve ser utilizada por um adulto ou sob supervisão. A água tônica é um refrigerante e não deve ser consumida durante a realização da atividade.

Procedimento:

1.

Identificar os copos como “água”, “vitamina B”, “curcuma” e, se usado, “água tônica”.



2.

Colocar cerca de 100 mL de água em cada copo. No copo “**vitamina B**”, dissolver um pequeno pedaço de comprimido de vitamina B₂ ou multivitamínico.

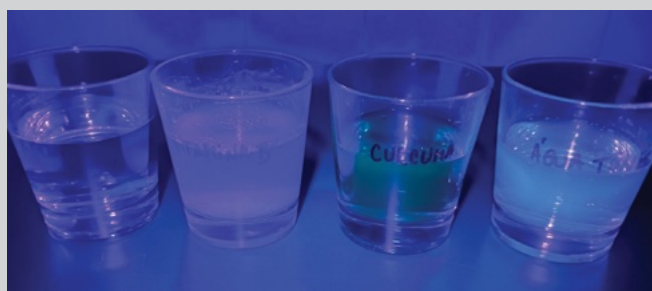
3.

Aquecer ligeiramente a água do copo “**curcuma**” com a ajuda de um adulto. Adicionar ¼ de colher de chá de curcuma ao copo com água morna, mexer bem e filtrar com papel de cozinha.



4.

Numa divisão escurecida, iluminar os copos com a lanterna UV. Quais brilham mais? Têm todos a mesma cor? Opcionalmente, incluir também água tónica.



Explicação

A luz ultravioleta, ou luz UV, é um tipo de luz com mais energia do que a luz visível. Apesar de não a conseguirmos ver, algumas substâncias conseguem absorver essa energia. Quando isso acontece, as suas moléculas absorvem energia durante um curto instante. Pouco tempo depois, essas moléculas libertam parte da energia absorvida sob a forma de luz visível. É essa luz que observamos como um brilho colorido. Este fenómeno chama-se fluorescência. A vitamina B₂, também conhecida por riboflavina, é uma substância naturalmente fluorescente e produz frequentemente um brilho amarelo-esverdeado quando iluminada com luz UV. A curcuma contém curcumina, um pigmento amarelo que também pode apresentar fluorescência. A água tónica também pode apresentar fluorescência. Neste caso, o brilho é produzido pela quinina, uma substância responsável pelo sabor característico desta bebida. Ao contrário dos materiais que “brilham no escuro”, as substâncias fluorescentes só brilham enquanto recebem luz UV. Quando a lanterna é desligada, o brilho desaparece quase imediatamente. Os cientistas utilizam a fluorescência em muitas áreas. Alguns marcadores fluorescentes

ajudam a estudar células, enquanto certas notas, passaportes e documentos importantes incluem materiais fluorescentes para dificultar falsificações. Podemos continuar a investigação explorando outros materiais do dia a dia. Será que o detergente da roupa fluoresce? E uma folha de espinafre? O papel branco, uma nota de euro, o azeite ou uma bebida energética produzem o mesmo efeito? Faz uma previsão antes de testar cada material e verifica se a tua hipótese estava correta.

> **Marta C. Corvo**

*Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa.
i3N|CENIMAT.*

Marta Corvo é investigadora no i3N|CENIMAT, Dep. Ciência dos Materiais da Faculdade de Ciências e Tecnologia da

Universidade NOVA de Lisboa, dedicada à ressonância magnética nuclear. Além da divulgação de ciência, interessa-se pelo desenvolvimento de novos materiais para captura de CO₂, armazenamento de energia e preservação de obras de arte.
marta.corvo@fct.unl.pt
ORCID.org/0000-0003-0890-6133

AI4Cat Summer School – Artificial Intelligence for Catalysis

A Comissão Organizadora tem o prazer de convidar todos os interessados a participar na *AI4Cat Summer School – Artificial Intelligence for Catalysis*, que decorrerá no Instituto Superior Técnico, em Lisboa, de 7 a 10 de setembro de 2026. Esta escola internacional é dedicada à aplicação da Inteligência Artificial à Catálise, uma área emergente que está a transformar a forma como se desenvolvem, compreendem e otimizam processos catalíticos. O programa científico combinará palestras por especialistas internacionais, sessões práticas e atividades de discussão, abordando temas como ciência de dados, aprendizagem automática (*machine learning*), modelos de linguagem, descoberta assistida por Inteligência Artificial e integração do conhecimento químico no desenvolvimento de modelos preditivos para aplicações em Catálise. A escola pretende proporcionar aos participantes uma formação sólida e atualizada, promovendo simultaneamente a interação entre investigadores das áreas da Catálise, Química Computacional, Ciência de Dados e Inteligência Artificial. A *AI4Cat Summer School* constitui uma oportunidade única para estudantes de doutoramento,



Mais informações: ai4cat.events.chemistry.pt

jovens investigadores e profissionais adquirirem novas competências e estabelecerem contactos científicos numa área de crescente relevância para a investigação química. A participação de jovens investigadores é particularmente encorajada. Esperamos por todos em Lisboa para explorar o futuro da Catálise na era da Inteligência Artificial.

XXX Encontro Galego-Português de Química

A Comissão Organizadora tem o prazer de convidar todos os interessados a participar no XXX Encontro Galego-Português de Química, que terá lugar em Pontevedra (Galiza, Espanha), de 18 a 20 de novembro de 2026. Organizado alternadamente pela Sociedade Portuguesa de Química e pelo *Colegio Oficial de Químicos de Galicia*, o Encontro celebra em 2026 a sua 30.^a edição, afirmando-se como um congresso internacional de referência e um ponto de encontro privilegiado para investigadores, profissionais e estudantes das diversas áreas da Química, tanto básica como aplicada. O programa científico incluirá comunicações orais e em painel, promovendo a apresentação e discussão de resultados de investigação, bem como o intercâmbio científico e a consolidação de colaborações ibéricas e internacionais. Este Encontro constitui um espaço dinâmico e estimulante para a partilha de conhecimento e para o debate dos desafios atuais e futuros da Química. Encoraja-se vivamente a participação de jovens investigadores, proporcionando-lhes a oportunidade de apresentar os seus trabalhos num ambiente próximo, colaborativo e cientificamente



Mais informações: encontrogalegoportugues.org

enriquecedor. Esperamos por todos em Pontevedra para celebrar três décadas de cooperação científica no XXX Encontro Galego-Português de Química!

Please join us in congratulating

Chemistry Europe Fellows Class 2024/2025



Lidia
Armelao



Wim
De Borggraeve



Catherine S. J.
Cazin



Denis
Jacquemin



Petra
de Jongh



Gilles
Gasser



György
Keglevich



Wolfgang
Kroutil



Inna
Melnik



Pierangelo
Metrangolo



Adriaan J.
Minnaard



Jean-Christophe
Monbaliu



Constantinos
Neochoritis



Shigeyoshi
Inoue



Andreas
Orthaber



Teresa M. V. D.
Pinho e Melo



Joanna
Gościańska



Israel
Fernández López



Antonio M. Echavarren



Sebastian
Hasenstab-Riedel



Petr
Štěpnička



Tom
Ward

Agenda

(por razões alheias ao *Química*, alguns dos eventos poderão sofrer ajustes de calendarização)

> agosto de 2026

18 - 23 de agosto de 2026, Tóquio, Japão
Tokyo Conference on Advanced Catalytic Science and Technology (TOCAT10)
tocat.catsj.jp/10

23 - 28 de agosto de 2026, Xangai, China
24th International Symposium on Homogeneous Catalysis (ISHC 2026)
ishc2026.casconf.cn

31 de agosto - 03 de setembro de 2026, Aveiro, Portugal
13th International Conference on High Pressure Bioscience and Biotechnology (HPBB 2026)
hpbb2026.events.chemistry.pt

31 de agosto - 9 de setembro, Glasgow, Reino Unido
EMLG/JMLG Annual Meeting 2026
strath.ac.uk/engineering/chemicalprocessengineering/emlgjmlg2026

setembro de 2026

2 - 4 de setembro de 2026, Valladolid, Espanha
IX Jornadas Ibéricas de Fotoquímica & II Conferência Franco-Ibérica de Fotoquímica (IX JIF) & (II FICP)
jif26.es/#

03 - 04 de setembro de 2026, Cascais, Portugal
XII Encontro Nacional de Ensino da Química (XIIENEQ)
xieneq.events.chemistry.pt

06 - 09 de setembro de 2026, Alicante, Espanha
44.^a Reunión Ibérica de Adsorción (44-RIA)
44ria.csidiomas.ua.es/es/inicio

06 - 09 de setembro de 2026, Munique, Alemanha
27th IUPAC International Conference on Physical Organic Chemistry
icpoc27.de

06 - 10 de setembro de 2026, Basileia, Suíça
EFMC International Symposium on Medicinal Chemistry (EFMC-ISMC 2026)
efmc-ismc.org

6 - 11 de setembro de 2026, La Serena, Chile
30.º Congresso Ibero-Americano de Catálise (CICAT 2026)
cicat2026.cl

06 - 11 de setembro de 2026, Viena, Áustria
European Peptide Symposium 2026
univie.eventsair.com/eps2026

06 - 11 de setembro de 2026, Sidney, Austrália
77th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry
ise-online.org/meetings/annual77/#gsc.tab=0

07 - 09 de setembro de 2026, Jena, Alemanha
GDCh Conference on Inorganic Chemistry 2026
veranstaltungen.gdch.de/microsite/index.cfm?l=11583&modus=

07 - 10 de setembro de 2026, Lisboa, Portugal
AI4Cat Summer School - Artificial Intelligence for Catalysis
ai4cat.events.chemistry.pt

08 - 12 de setembro de 2026, Lisboa, Portugal
11th IUPAC International Conference on Green Chemistry
greeniupac2026.org

09 - 10 de setembro de 2026, Roma, Itália
14th International Conference on Sustainable Development (ICSD 2026)
ecsdev.org/conference/14th-icsd-2026

09 - 14 de setembro de 2026, Erice, Itália
2026 International School on Mass Spectrometry (intSMS)
spettrometriadimassa.it/intsms2026

13 - 16 de setembro de 2026, Messina, Itália
XXX National Meeting on Medicinal Chemistry (NMMC2026)
nmmc2026.unime.it

14 - 16 de setembro de 2026, Braunschweig, Alemanha
30th Lecture Conference on Photochemistry (LCP 2026)
gdch.de/veranstaltungen/tagungen/gdch-tagungen-2026.html

14 - 17 de setembro de 2026, Mainz, Alemanha
47th FGMR Annual Discussion Meeting
gdch.de/veranstaltungen/tagungen/gdch-tagungen-2026.html

15 - 17 de setembro de 2026, Praga, Chéquia
26th Isoprenoid Conference
isopsoc.org/isoprenoids2026.html

21 - 23 de setembro de 2026, Krems, Áustria
Österreichische Chemietage 2026 - Austrian Chemistry Days 2026
chemietage.at

22 – 25 de setembro de 2026, Bayreuth, Alemanha
Electrochemistry 2026
chemistryviews.org/electrochemistry-2026

22 – 25 de setembro de 2026, Glasgow, Escócia
IWA World Water Congress & Exhibition 2026
worldwatercongress.org

23 – 24 de setembro de 2026, Lausana, Suíça
Ilmac 2026
ilmac.ch/en

27 de setembro – 01 de outubro de 2026, Perugia, Itália
25th European Symposium on Quantitative Structure-
-Activity Relationship (EuroQSAR 2026)
euroqsar.org

28 de setembro – 01 de outubro de 2026, Busan,
Coreia do Sul
Next Horizons in Polymers – IUPAC-PSK50 International
Conference
iupac.org/event/next-horizons-in-polymers/

29 de setembro de 2026, *online* (virtual)
6th Virtual ChemBioTalks 2026
universiteitleiden.nl/en/science/led3/chembiotalks

29 de setembro – 01 de outubro de 2026, Nuremberga,
Alemanha
POWTECH 2026 & PARTEC 2026
powtech-technopharm.com/en

30 de setembro – 02 de outubro de 2026, Coimbra,
Portugal
47th Congress on Phase Equilibria (JEEP2026)
jeep2026.events.chemistry.pt

30 de setembro – 02 de outubro de 2026, Verona, Itália
10th RSC-BMCS-SCI GPCRs in Medicinal Chemistry
rsc.org/events/find-an-event/10th-rsc-bmcs-sci-gpcrs-in-medicinal-chemistry

outubro de 2026

04 – 08 de outubro de 2026, Glasgow, Escócia
IWA World Water Congress & Exhibition 2026
worldwatercongress.org

06 – 09 de outubro de 2026, Tutzing, Alemanha
Polymer-solvent Complexes and Intercalates
(POLYSOLVAT-16)
iffindico.fz-juelich.de/e/polysolvat16

07 – 09 de outubro de 2026, Lisboa, Portugal
4th International Conference on Nitric Oxide Therapeutics
in Cancer and Other Diseases
iv-therapeutic.events.chemistry.pt

07 – 09 de outubro de 2026, Modena, Itália
9th MS Food Day
spettrometriadi massa.it/Congressi/9MS-FoodDay

13 – 16 de outubro de 2026, Santiago de Compostela,
Espanha
4th European Sample Preparation Conference
(EuSP2026) | 3rd Green and Sustainable Analytical
Chemistry Conference (GSAC2026)
usc.gal/en/conference/2026-eusp-gsac

14 – 16 de outubro de 2026, Coimbra, Portugal
XVIII Encontro de Química dos Alimentos (XVIII EQA 2026)
xviii eqa.events.chemistry.pt

29 – 30 de outubro de 2026, Londres, Reino Unido
Chemical Science Symposium 2026: Digital Chemistry
in the Age of AI and Machine Learning (RSC)
rsc.org/events/find-an-event/chemical-science-symposium-2026-digital-chemistry-in-the-age-of-ai-and-machine-learning

novembro de 2026

03 – 06 de novembro de 2026, Praga, Chéquia
12th International Symposium on Recent Advances in
Food Analysis (RAFA2026)
rafa2026.eu

11 – 12 de novembro de 2026, Barcelona, Espanha
Drug Discovery Chemistry Europe 2026
drugdiscoverychemistry.com/europe

15 – 19 de novembro de 2026, Kolkata, Índia
16th International Symposium on Ionic Polymeriza-
tion (IP'26)
iupac.org/event/16th-international-symposium-on-ionic-polymerization-ip26

16 – 18 de novembro de 2026, Newcastle, Austrália
6th International Conference on Emerging Advanced
Nanomaterials (ICEAN 2026)
<https://www.icean2026.com/>

18 – 20 de novembro de 2026, Pontevedra,
Espanha
XXX Encontro Galego-Português de Química
encontro galegoportugues.org

Boletim da Sociedade
Portuguesa de Química

abril-junho
Vol. 50 | N.º 181 | 2026

Química

