

## **A necessidade urgente de literacia em microbiologia para a sociedade**

Kenneth Timmis <sup>1\*</sup>, Ricardo Cavicchioli <sup>2</sup>, José Luis Garcia <sup>3</sup>, Balbina Nogales <sup>4</sup>, Max Chavarría <sup>5</sup>, Lisa Stein <sup>6</sup>, Terry J. McGenity <sup>7</sup>, Nicole Webster <sup>8</sup>, Brajesh Singh <sup>9</sup>, Jo Handelsman <sup>10</sup>, Victor de Lorenzo <sup>11</sup>, Carla Pruzzo <sup>12</sup>, James Timmis <sup>13</sup>, Juan Luis Ramos Martín <sup>14</sup>, Willy Verstraete <sup>15</sup>, Mike Jetten <sup>16</sup>, Antoine Danchin <sup>17</sup>, Wei Huang <sup>18</sup>, Jack Gilbert <sup>19</sup>, Rup Lal <sup>20</sup>, Helena Santos <sup>21</sup>, Sang Yup Lee <sup>22</sup>, Angela Sessitsch <sup>23</sup>, Paola Bonfante <sup>24</sup>, Lone Gram <sup>25</sup>, Raymond T. P. Lin <sup>26</sup>, Eliora Ron <sup>27</sup>, Ceren Karahan <sup>28</sup>, Jan Roelof van der Meer <sup>29</sup>, Seza Artunkal <sup>30</sup>, Dieter Jahn <sup>1</sup>, Lucy Harper <sup>31</sup>

*\*Autor para correspondência:* <sup>1</sup> Institute of Microbiology, Technical University Braunschweig, Alemanha, [ktimmis@gmail.com](mailto:ktimmis@gmail.com), <sup>2</sup> School of Biotechnology and Biomolecular Sciences, The University of New South Wales, Sydney, Áustralia, <sup>3</sup> Department of Environmental Biology, Centro de Investigaciones Biológicas (CIB) (CSIC), Madrid, Espanha, <sup>4</sup> Area Microbiologia, Dept. Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, Espanha, <sup>5</sup> Escuela de Química & Centro de Investigaciones en Productos Naturales (CIPRONA), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, <sup>6</sup> Dept. of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canadá, <sup>7</sup> School of Biological Sciences, University of Essex, Colchester, Reino Unido, <sup>8</sup> Australian Institute of Marine Science, Townsville and Australian Centre for Ecogenomics, University of Queensland, Brisbane, Queensland, Áustralia, <sup>9</sup> Hawkesbury Institute for the Environment, University of Western Sydney, Penrith, Áustralia, <sup>10</sup> Wisconsin Institute for Discovery, University of Wisconsin-Madison, Estados Unidos da America, <sup>11</sup> Systems Biology Program, Centro Nacional de Biotecnología, CSIC, Madrid, Espanha, <sup>12</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita (DISTAV), Università degli Studi di Genova, Itália, <sup>13</sup> Athena Institute, Vrije Universiteit Amsterdam, Países Baixos, <sup>14</sup> Estación Experimental del Zaidín-CSIC, Granada, Espanha <sup>15</sup> Center for Microbial Ecology and Technology (CMET), Ghent University, Bélgica, <sup>16</sup> Department of Microbiology, Radboud University Nijmegen, Países Baixos, <sup>17</sup> Institut Cochin INSERM U1016 – CNRS UMR8104 – Université Paris Descartes, Paris, França, <sup>18</sup> Department of Engineering Science, University of Oxford, Reino Unido, <sup>19</sup> Department of Pediatrics, University of California at San Diego, Estados Unidos da América, <sup>20</sup> Department of Zoology, Molecular Biology Laboratory, University of Delhi, India, <sup>21</sup> Instituto de Tecnologia Química e Biológica. Universidade Nova de Lisboa,

Oeiras, Portugal, <sup>22</sup> Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, República da Coreia, <sup>23</sup> Bioresources Unit, AIT Austrian Institute of Technology, Tulln, Áustria, <sup>24</sup> Department of Life Science and Systems Biology, University of Torino. Itália, <sup>25</sup> Department of Systems Biology, Technical University of Denmark, Lyngby, Dinamarca, <sup>26</sup> Department of Microbiology and Immunology, National University of Singapore, Singapura, <sup>27</sup> School of Molecular Cell Biology & Biotechnology, Tel Aviv University, Israel, <sup>28</sup> Department of Medical Microbiology, Ankara University, Turquia, <sup>29</sup> Institut de Microbiologie Fondamentale, University of Lausanne, Suíça, <sup>30</sup> Department of Clinical Microbiology, Haydarpasa Numune Training Hospital, Istanbul, Turquia, <sup>31</sup> Society for Applied Microbiology, London, Reino Unido.

Tradução: Cristiana A.V. Torres<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UCIBIO-REQUIMTE, Chemistry Department, Faculty of Sciences and Technology, Universidade NOVA de Lisboa, Portugal

## Sumário

Os micróbios e as suas atividades têm efeitos penetrantes, profundos e geralmente positivos no funcionamento, e como tal, na saúde e bem-estar dos seres humanos, e em todo o mundo biológico, na realidade em toda a superfície terrestre e na atmosfera. Coletivamente, e em parceria com o sol numa significativa extensão, os micróbios são o sistema de suporte de vida da biosfera. O que faz com que tenham de ser considerados em decisões que são tomadas por indivíduos e famílias no dia-a-dia, assim como, indivíduos e entidades a todos os níveis e classes na avaliação, planeamento e formulação de políticas pertinentes ao nível da comunidade local, nacional e mundial. Contudo, ao contrário de outros temas que têm um impacto pervasivo na espécie humana, como finanças, saúde e transportes, dos quais existe um conhecimento alargado, o conhecimento sobre atividades microbianas relevantes, o impacto que têm nas nossas vidas e como podem ser aproveitadas para o benefício da espécie humana – literacia em microbiologia – está em falta na população em geral, e nos subgrupos dos quais são constituídos os decisores. As escolhas que envolvem os impactos da atividade microbiana são muitas vezes opacas e a informação disponível é geralmente enviesada e incompleta, criando uma incerteza considerável. Como consequência, mesmo as “melhores” decisões, baseadas em evidências, geralmente conduzem a resultados imprevisíveis, não intencionados e muitas vezes não desejados. Assim, o que defendemos é que a literacia em

microbiologia para a sociedade é indispensável para que se tomem decisões pessoais informadas, e também para que se desenvolvam políticas, governamentais e empresariais, com contributos mais esclarecidos das partes interessadas em tais políticas. O entendimento das atividades-chave microbianas é tao essencial para a transição da infância para o estado adulto como algumas matérias que são ensinadas na escola, e devem como tal ser aprendidas durante o período escolar. A literacia em microbiologia precisa de ser tornar parte da descrição de funções do cidadão global. Para que seja mais fácil atingir a literacia em microbiologia para a sociedade, através da sua incorporação no programa escolar, propomos um conceito e formato básico de um ensino adaptável a todas as idades, desde o jardim de infância até ao ensino secundário e que posiciona as atividades-chave microbianas nos contextos de como elas afetam a nossa vida diária, de Grandes Desafios relevantes que a humanidade e o planeta Terra enfrentam, e de sustentabilidade dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Assim sendo, encorajamos microbiólogos, sociedades de microbiologia e profissionais literatos em microbiologia a participar e contribuir para esta iniciativa ajudando a evoluir o conceito inicial, procurando fundos para desenvolver materiais e ferramentas “amigas das crianças”, apelativas e aumentando o seu impacto e convencendo educadores, políticos, líderes empresariais e agências relevantes (governamentais e não-governamentais) para ajudar e promover esta iniciativa. A literacia em microbiologia para a sociedade tem que se tornar uma realidade.

## **O contexto**

### *Microbiomas e biomas*

As comunidades de microrganismos criam uma segunda pele em essencialmente todas as superfícies corporais, em contacto com o ambiente, de todos os macrorganismos da biosfera – animais e plantas. Estas peles microbianas constituem barreiras adicionais, dinâmicas e ecofisiológicas que aumentam as funções-barreira físicas e químicas (ex.: a ataques patogénicos) das superfícies epiteliais. No entanto, para além das suas atividades barreira, estas comunidades microbianas desenvolvem interações multifacetadas com os seus hospedeiros, providenciam funções essenciais e têm uma influência penetrante no bem-estar e características biológicas do seu hospedeiro. Por exemplo, os micróbios associados a plantas medeiam a aquisição de minerais essenciais, incluindo o azoto para crescimento (de facto, sem fixação de azoto mediada por via microbiana, não haveria suficiente produção de biomassa, por parte de plantas primárias, para a proliferação e evolução de consumidores animais), protegem contra infeções e produzem compostos semelhantes a gormonas que promovem o crescimento das plantas. Alguns micróbios presentes nas plantas são tóxicos para os animais e deste modo funcionam como uma defesa para as plantas

contra predadores. Os micróbios protegem os animais contra doenças, fermentam a comida dentro dos ruminantes (como as vacas) e digerem a comida para os insetos. Apesar de praticamente todos os macrorganismos estarem cobertos por uma superfície de comunidades microbianas, alguns também contêm os chamados microrganismos endossimbióticos que vivem dentro das células hospedeiras. Os endosimbiontes desempenham papéis importantes nos ciclos de vida de vários organismos, como os insetos (onde podem vir a determinar o sexo do hospedeiro), esponjas e plantas, e outros microrganismos, como os protozoários. Os organelos intracelulares responsáveis por capturar energia solar (plastídeos) em organismos fotossintéticos, e por gerar energia (mitocôndria) na maioria dos organismos, evoluíram a partir de bactérias endossimbióticas. O componente microbiano de um organismo, o chamado microbioma [microbioma: 'uma comunidade microbiana característica que ocupa um habitat razoavelmente bem definido e possui propriedades físico-químicas distintas. O termo, portanto, não se refere apenas aos microrganismos envolvidos, mas também abrange o seu campo de atividades (Whipps et al., 1988)], é uma característica essencial da identidade e ecofisiologia de um organismo: animais e plantas livres de germes são aberrações de laboratório com programas de desenvolvimento defeituosos e não convencionais, que os tornam impróprios e incapazes de sobreviver nos seus habitats naturais. O seu todo integrado, constituído por microbioma e hospedeiro, é denominado de bioma. Uma perturbação do microbioma, levando à chamada disbiose, pode perturbar o seu relacionamento com o hospedeiro e interromper as funções que contribuem para o bem-estar, como evidenciado pela perturbação provocada pelo herbicida glifosato na comunidade microbiana no intestino das abelhas, levando a um aumento na suscetibilidade a patógenos (Motta et al., 2018).

#### *Os seres humanos são 50% microbianos*

O bioma humano é, em termos de número de células, 50% microbiano (Sender et al., 2016). Os micróbios intestinais humanos digerem grande parte dos alimentos ingeridos e libertam os seus nutrientes em formas que podem ser assimiladas e utilizadas, fornecendo vitaminas essenciais, aminoácidos e outros micronutrientes que não podem ser produzidos pelo ser humano. Para além disso, produzem também compostos semelhantes a hormonas e, assim, agem como um segundo sistema endócrino (Brown and Hazen, 2015) e desempenham papéis (atualmente em estudo) em várias doenças físicas e mentais (Wang et al., 2017; Du Toit, 2019). Um exemplo clássico de disbiose do microbioma humano é a perturbação induzida por antibióticos na comunidade microbiana intestinal, levando a bactéria *Clostridium difficile* a ganhar vantagem e a causar colite pseudomembranosa (Bartlett, 1979). É crucial reconhecermos que, desde o nascimento até à morte, vivemos num relacionamento íntimo, dinâmico e mutuamente benéfico com os nossos parceiros

microbianos, uma relação recíproca e integrada que em grande parte especifica o que e como - e, portanto, quem - nós somos (e, é claro, quem eles são). Para atualizar Descartes: *Penso, logo, somos.*

*Podemos preocupar-nos com o quão pouco sabemos e podemos confiar nos nossos conhecidos, embora sabendo essencialmente nada sobre os nossos mais íntimos e influentes amigos. A obtenção da capacidade de maximizar o nosso bem-estar pessoal irá exigir que compreendamos*

- o que os nossos parceiros microbianos estão a fazer,*
- que impacto as suas atividades têm sobre nós,*
- como os nossos parceiros microbianos e as suas atividades são afetados pelo que fazemos e*
- como podemos melhorar as nossas parcerias para benefício mútuo*

#### *Os micróbios ao serviço da humanidade*

Os micróbios não nos afetam apenas como indivíduos, mas também têm sido explorados ao serviço da humanidade desde tempos antigos, inicialmente na produção de alimentos e bebidas fermentados (cerveja, vinho, laticínios), pão, materiais de encadernação (maceração de linho), manutenção da fertilidade do solo (uso de leguminosas contendo bactérias fixadoras de azoto, fertilização com biomassa bacteriana) e, posteriormente, na redução da poluição através da degradação de resíduos domésticos e industriais e no fornecimento de água potável. Em particular, a fermentação de alimentos para melhor conservá-los e melhorar o seu valor nutritivo e, posteriormente, as melhorias na higiene, através do tratamento microbiano de resíduos humanos e redução concomitante da sua carga patogénica, contribuiu significativamente para a ascensão da civilização e da qualidade e longevidade da vida humana.

Mais recentemente, os micróbios têm ocupado o centro do palco da crescente bioeconomia (ex.: ver Timmis et al., 2017a). Coincidentemente, houve uma grande mudança na estrutura económica global, designada por 4ª Revolução Industrial (4IR). Associada à conectividade ilimitada, inteligência artificial, uso intensivo de sensores, processamento de “big data”, robótica e muitos outros recursos, a 4IR também prevê a produção sustentável de bens no contexto de uma economia circular com desperdício-zero, sem emissões nocivas e na qual tudo é reciclado (Nielsen, 2017). Os processos mediados por microrganismos são ideais para a 4IR, porque não requerem condições extremas, entradas de alta energia e reagentes tóxicos. Os novos materiais, os resíduos criados e reagentes envolvidos são, geralmente, facilmente reciclados. Como consequência, as reações mediadas pela

biocatálise microbiana, que antes eram um complemento marginal aos processos químicos, e focadas na produção de um pequeno número de moléculas bioativas de alto valor acrescentado, emergiram como uma alternativa verdadeira e ambientalmente sustentável à reação química de matérias-primas renováveis em produtos, à escala industrial. No centro desses desenvolvimentos estão as fábricas de células (principalmente microbianas) e as enzimas obtidas através delas, naturais ou reprogramadas.

Uma seleção indicativa da vasta gama de processos microbianos atuais, além da biocatálise, inclui

- produção de diversos alimentos (iogurte, queijo, natto, proteína unicelulares, chocolate, linguiça maturada, pickles, probióticos), aromas alimentares (baunilha, molho de soja, kimchi, paa deak, soumbala) e suplementos alimentares (vitaminas, aminoácidos, ácido fólico, probióticos),
- produção de produtos farmacêuticos (antibióticos, hormonas, produtos biológicos), vacinas, sistemas de diagnóstico e monitorização de biossensores e produtos para cuidado pessoal,
- proteção e promoção do crescimento de plantas cultivadas,
- fermentação para a produção de diversos produtos químicos e biomateriais (bioplásticos, celulose microbiana),
- engenharia química verde, como eletrossíntese, e uso do dióxido de carbono de gases de efeito estufa como material para síntese química,
- produção de energia (biogás, células de combustível microbianas),
- recuperação de recursos naturais (por exemplo, metais, por biolexiviação industrial, que se encontra a substituir processos térmicos altamente poluentes),
- tratamento de resíduos e biorremediação de zonas poluentes,
- biolimpeza, biorestauro e biopreservação de objetos históricos de património cultural (monumentos, estátuas, frescos, pinturas, documentos).

Além disso, existe uma vasta gama de novas aplicações em desenvolvimento incluindo terapias microbianas para doenças causadas por disbiose da microbiota (colite pseudomembranosa, doença inflamatória intestinal, obesidade, diabetes e várias condições psicológicas; Rossen et al., 2015), reprogramação de biologia sintética de células biotecnologicamente relevantes e organismos para alcançar altos níveis de produção/atividade, bioengenharia ao nível do ecossistema, entre outros. A incrível versatilidade metabólica dos microrganismos gera continuamente novas oportunidades para a produção sustentável de produtos químicos e materiais especializados e a granel (Lee et al., 2019).

A capacidade de reconhecer novas oportunidades na altura certa, para avaliar com precisão os benefícios e possíveis riscos, e tomar decisões baseadas em evidências para ações necessárias que

facilitam a sua exploração, é essencial para economias baseadas no conhecimento biocêntrico de modo a serem competitivas e progredirem significativamente em direção a práticas sustentáveis. É absolutamente necessário ter conhecimento da microbiologia subjacente em todos os níveis da cadeia de decisão, incluindo o público em geral como partes interessadas.

As decisões políticas baseadas no conhecimento de processos microbiológicos serão a base do progresso futuro do bem-estar, da conquista da sustentabilidade e do avanço da civilização. A rapidez e direção de nosso progresso futuro depende muito do grau de nosso compromisso para

- explorar agnosticamente processos microbiológicos e, assim, evoluir continuamente a nossa capacidade de prever e identificar novas possíveis aplicações comerciais baseadas em micróbios <sup>1</sup>
- aproveitar adequadamente novas aplicações para melhoria da saúde humana e planetária,
- expandir e aprimorar aplicativos contemporâneos, e
- desenhar decisões adequadas (baseada em evidências) e sistemas de alocação de recursos que incentivam e facilitam atividades de investigação, desenvolvimento e comercialização, e adequadamente incorporar preferências relevantes das partes interessadas.

### *Os micróbios afetam-nos de maneira generalizada e profunda pessoal e coletivamente*

Os micróbios podem afetar as nossas vidas de muitas maneiras e são, portanto, importantes para muitas decisões pessoais que tomamos, como dar à luz por cesariana (asséptica) ou parto natural (colonização do recém-nascido pelos micróbios maternos; Wampach et al., 2018), amamentar [entrega ao bebê de anticorpos protetores contra patogênicos, oligossacáridos do leite humano favorecendo bifidobactérias das quais se pensa orquestrarem o desenvolvimento saudável do sistema imunológico (Gomez de Agüero et al., 2016; Moossavi et al., 2018), micróbios maternos presentes no leite materno etc. (Milani et al., 2017)], uso frequente de desinfetantes potentes para limpar a casa (reduzir a exposição dos bebês à diversificação de microbiomas e aos seus benefícios para a saúde: Finlay e Arrieta, 2016; Gilbert e Yee, 2016; Bach, 2018; Sharma e Gilbert, 2018; ou mesmo hospitais: ver Caselli, 2017), serem vacinados ou tratados para uma infecção (Lane et al., 2018), o uso de produtos de limpeza para uso doméstico contendo fósforo (Richards et al., 2015;

<sup>1</sup> As novas descobertas são os resultados da investigação. A investigação está, no entanto, organizada em disciplinas e grupos de áreas relacionadas, que até certo ponto, agem como impedimentos para descobertas de natureza transdisciplinar. É importante ressaltar que muitas das mudanças necessárias para a proteção do meio ambiente, saúde humana e segurança alimentar requerem transdisciplinaridade, planejamento e implementação de investigação. Por a microbiologia ser tão ampla na sua natureza e aplicações, e tão difundida nos seus impactos na vida e no planeta, a literacia em microbiologia tornaria os investigadores inerentemente mais interdisciplinares. De facto, isso aceleraria o desenvolvimento de soluções inovadoras e opções de gestão para muitos dos problemas ambientais / de saúde críticos que atualmente enfrentamos.

pode contribuir para a eutrofização de algas nocivas nas águas locais), o uso de sabões germicidas (podem causar disbiose da microbiota da pele; Gilbert e Yee, 2016), adoção de um cão de companhia (facilita o intercâmbio de microbiota, Trinh et al., 2018; aumenta a entrada de fósforo na bacia hidrográfica, Hobbie et al., 2017) ou que alimentos comer (por exemplo, carne bovina, que tem uma pegada substancial de metano; carne e laticínios cujo consumo está correlacionado com cânceros, zur Hausen et al., 2017; outras carnes e vegetais: proveniência, prazo de validade, associações com fatores de risco conhecidos etc.) e como armazenar e prepará-los, quanto ventilar/humidificar/desumidificar as nossas casas, e assim por diante.

Isto pode ser exemplificado pela consideração de como apenas uma atividade em que nos envolvemos com um prazer considerável - férias e lazer - pode expor-nos a diversas infecções e doenças causadas por bactérias, algumas ameaçando a vida, ausentes ou menos prevalentes no nosso ambiente doméstico, através de:

- tomar banho, em água doce e do mar (por exemplo, *Cryptosporidium*, *Vibrio vulnificus*, *Leptospira*, etc.) e em condições inadequadas, como piscinas cloradas e especialmente banheiras de hidromassagem (*Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Legionella*, *Candida*, *Trichophyton*, *Giardia*, etc.),
- comida, alimentos crus ou contaminados, especialmente marisco (por exemplo: *Salmonella*, *Vibrio*, EHEC, *Campylobacter*, *Listeria*, *Norovirus*, vírus da hepatite e diversos parasitas) e até alimentos cozidos adequadamente contendo toxinas estáveis ao calor (incluindo a neurotoxina letal da maré vermelha e várias micotoxinas),
- bebida, líquidos contaminados (por exemplo, água, sumos de frutas, etc.),
- atividade sexual, com novos parceiros (DST clássicas, mas também HIV, etc.),
- seleção do destino de férias, onde agentes infecciosos como febre amarela, malária, vírus Zika, vírus da hepatite, dengue vírus, doença de Lyme e tuberculose, pode ser endêmica e
- seleção de acomodações e instalações de bem-estar, incluindo navios de cruzeiro (por exemplo, *Cyclospora*, *Norovirus*, *Legionella* e micobactérias).

Obviamente, as viagens de negócios podem expor-nos a perigos, e o turismo médico pode levar a mais riscos associados à cirurgia e ao hospital.

As atividades microbianas influenciam igualmente os empreendimentos coletivos, e sua consideração é essencial para muitas decisões estratégicas/políticas, como a introdução de um nova matéria-prima/criação de um novo resíduo numa indústria/ instalação de produção, introdução de um novo ingrediente num produto alimentar, estabelecimento de uma nova cadeia de alimentos,

introdução de uma nova medida de saúde pública, implementação de novas práticas agrícolas ou introdução de novas medidas para proteger os sistemas marinhos de degradação.

*Se quisermos tomar – seja ao nível pessoal ou político - decisões efetivas com alta probabilidade de originar resultados previsíveis e pretendidos, precisamos de saber quais as atividades microbianas que são relevantes e como essas atividades podem impactar e serem afetadas pela sua implementação. As decisões rotineiras das nossas vidas precisam ser informadas por um entendimento básico de*

- *quais as consequências adversas que podem resultar das nossas ações, e*
- *como podemos modificar o nosso comportamento para evitar ou mitigar essas consequências para nós e para os outros.*

### *Os micróbios afetam profundamente toda a biosfera*

Os micróbios foram as primeiras formas de vida, originadas há quase quatro bilhões de anos, e são o seu futuro: eles continuarão a habitar o planeta Terra muito tempo depois dos humanos e outras formas de vida desapareceram. O mundo invisível dos micróbios apresenta uma muito maior evolução e diversidade metabólica do que os organismos visíveis que nos são familiares. Em termos de biomassa, 90% da vida nos oceanos é microbiana. As algas e as cianobactérias fotossintéticas formam um componente importante do plâncton marinho e são a base da cadeia alimentar oceânica. Os *Prochlorococcus* e *Synechococcus* removem cerca de 10 bilhões de toneladas de carbono por ano a partir do ar, correspondendo a cerca de dois terços da fixação total de carbono nos oceanos. Os micróbios regulam processos biogeoquímicos globais e locais que influenciam fundamentalmente as emissões de gases de efeito estufa para atmosfera, afetam as mudanças climáticas, bem como regulam a saúde dos seres humanos, animais, plantas, solo e o abastecimento de água. Eles geram 50% do oxigênio que respiramos. Os primeiros micróbios produziram o oxigênio que permitiu que todos os organismos utilizadores de oxigênio evoluíssem, como a camada de ozono que permitiu que a vida se movesse dos oceanos profundos para terra. Eles são os recicladores supremos de desperdício e regeneradores do planeta. Os micróbios são omnipresentes, e as suas atividades sustentam e influenciam a qualidade de toda a vida no planeta. *Eles são o sistema de suporte de vida da biosfera.* Apesar de nós humanos nos considerarmos os guardiães da saúde do planeta, os micróbios são agentes com muito mais poder de influência, regulação e mudança de atividades planetárias. *In extremis:* se um conjunto de micróbios que realiza um processo crítico na reciclagem

de nutrientes desaparecesse da biosfera, e não fosse substituído por outro conjunto funcionalmente equivalente, a vida na Terra como a conhecemos deixaria de existir<sup>2</sup>. O microbioma ambiental global é, em termos de atividades e dimensão, o único aliado que podemos contar para reverter o impacto de emissões poluentes resultantes de atividades industriais, agricultura intensiva e sobrepopulação humana (de Lorenzo et al., 2016).

*É essencial que reconheçamos coletivamente a papel essencial que os micróbios desempenham nos processos planetários e na saúde, e adquirir conhecimentos sobre o que micróbios fazem e podem fazer, para que possamos desenvolver parcerias e estratégias eficazes para proteção da saúde do nosso planeta. É imperativo*

- *entender e apreciar o delicado equilíbrio entre ciclos de nutrientes mediados microbiologicamente, função planetária e a saúde da biosfera, e*
- *garantir não (mesmo que não intencionalmente) impactar negativamente grupos / comunidades microbianas que desempenham um papel crucial no funcionamento da biosfera.*

*O aproveitamento de atividades microbianas é crucial para resolver alguns grandes desafios e alcançar metas de desenvolvimento sustentável*

Atualmente, a humanidade enfrenta grandes desafios que incluem o desequilíbrio no acesso a alimentos, água potável, saúde, educação, energia e matérias-primas, pobreza persistente, perda de terras povoadas devido ao aumento do nível do mar causado pelo aquecimento global, desertificação. As necessidades da humanidade e do planeta Terra e de um plano de ação para satisfazer essas necessidades de maneira sustentável são detalhados no Manual de Sustentabilidade da ONU Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS; Nações Unidas (2015) - Transformando o nosso mundo: A Agenda para o Desenvolvimento Sustentável 2030.

<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld> ). Uma edição recente da *Microbial Biotechnology* (2017) explorou a gama de tecnologias microbianas que estão a contribuir/demonstrar potencial para a conquista dos ODS, incluindo aqueles que podem melhorar os

---

<sup>2</sup> Embora à primeira vista, essa noção (especialmente em combinação com a outra declaração abaixo, todos os micróbios estão por toda parte) possa parecer absurdo, vale a pena ponderar o seguinte: mudanças nas condições de habitat ambiental, por exemplo, através do aquecimento global, pode torná-los habitantes desfavoráveis. As consequências são que os habitantes devem (1) migrar para habitats mais favoráveis, (2) adaptar/desenvolver novas propriedades que estão melhor alinhadas com as novas condições ou (3) morrer, e se geograficamente restrito, talvez extinguir-se. A evolução é afetada mais facilmente pelos organismos que se reproduzem rapidamente. Mas há micróbios em vários habitats da biosfera que se reproduzem extremamente devagar. Se as mudanças ocorrerem rapidamente, é concebível que eles possam morrer. Contudo, se pertencer a um grupo mediador de uma função crítica da biosfera, poderá muito bem haver consequências. Curtis (2006) expressou isso bastante bem: "... se a última baleia azul se sufocasse até a morte no último panda, seria desastroso, mas não o fim do mundo. Mas se acidentalmente envenenarmos as duas últimas espécies de oxidantes de amônia, seria uma outra questão. Isso poderia estar acontecendo agora e nós não temos conhecimento ...".

problemas de suprimento de alimentos para um crescimento contínuo da população mundial (Garcia et al., 2017; Trivedi et al., 2017), produção de gases com efeito estufa, aquecimento global e algumas das consequências negativas, da poluição global e maximização da exploração de fontes renováveis e a sustentabilidade de consumo mundial de recursos naturais e assim por diante (por exemplo, de Lorenzo, 2017; Verstraete e de Vrieze, 2017). Esta questão também abordou o potencial excepcional de biotecnologia microbiana para outros ODS, designadamente crescimento económico sustentável e criação de emprego, relacionados com novas empresas, emprego e riqueza, em parte no contexto da bioeconomia (Timmis et al., 2017b), mas também em outros contextos. Uma série de editoriais da mesma revista sob o título abrangente de microbioma como fonte de novas empresas e criação de empregos, em 2017 e 2018, explorou a capacidade da tecnologia de microbiomas para gerar novas empresas e empregos oportunidades.

*Muitas das ações que devem ser implementadas no longo caminho para enfrentar os Grandes Desafios e alcançar os ODS envolverá processos microbianos. As principais decisões políticas necessárias para colocar essas ações em movimento /manter/aumentar as suas contribuições requerem o conhecimento das atividades microbianas relevantes e como estas podem ser canalizados para obter um efeito com máximo benefício.*

*Decisões baseadas no conhecimento de processos microbiológicos poderiam impedir grandes, em alguns casos, desastres globais*

Os micróbios são atores centrais e principais na evolução planetária e biológica. A ausência do devido reconhecimento, compreensão e consideração das contribuições dos processos microbianos relevantes e um planeamento que não leve em consideração os papéis que os micróbios podem desempenhar em quaisquer mudanças torna o desenvolvimento e implementação de políticas a todos os níveis (internacional, nacional, regional e individual) carregadas de riscos, insuficientes ou ineficazes e, nos piores casos, contraproducentes. Alguns exemplos de desastres potencialmente evitáveis impactados negativamente/causados por decisões/ falta de decisões políticas incluem:

*A crise de resistência aos antibióticos.* Já na década de 1960/início da década de 1970, os principais microbiólogos como Falkow (Falkow et al., 1961; Falkow, 1970, 1975), Watanabe (Watanabe, 1963; Watanabe, 1966) e Levy (Levy et al., 1976; Levy, 1982) alertaram sobre a crescente emergência e alargamento da resistência a antibióticos devido a sobre prescrição e ao uso não-clínico de antibióticos (de facto, Alexander Fleming, quem descobriu a penicilina, avisou do perigo quando recebeu o Nobel em 1945: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/fleming-lecture.pdf> ).

Semelhantes avisos foram emitidos repetidamente desde então, alguns relacionados com o uso de antibióticos na aquacultura (por exemplo: Cabello, 2006), mas com pouco resultado. Hoje, consideramos a resistência a antibióticos um dos desafios mais importantes da medicina porque faz com que um número crescente de infeções tratáveis com risco de vida não sejam mais tratáveis. ([http://www.wpro.who.int/entity/drug\\_resistance/resources/global\\_action\\_plan\\_eng.pdf](http://www.wpro.who.int/entity/drug_resistance/resources/global_action_plan_eng.pdf)). O risco representado pela resistência a antibióticos em 2050 é projetado no relatório internacional *Combate a infeções resistentes a medicamentos em todo o mundo: relatório final e recomendações* ([https://amr-review.org/sites/default/files/160518\\_Final%20paper\\_with%20cover.pdf](https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf)). Este combate custa 100 triliões de dólares e 10 milhões de mortes por ano (curiosamente, a primeira de quatro recomendações é a necessidade de uma campanha de consciencialização pública global segmentada em particular para crianças e adolescentes. Curiosamente, embora a campanha tenha custado 40–100 milhões de dólares por ano, a campanha recomendada não incluiu educação básica). Apesar disso, prevê-se um aumento de 67% no uso não clínico de antibióticos na pecuária e na aquacultura durante o período 2010-2030 ([https://amr-review.org/sites/default/files/160518\\_Final%20paper\\_with%20cover.pdf](https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf)). Se as autoridades de saúde, os políticos e líderes empresariais (e, crucialmente, o público) tivessem conhecimento da capacidade dos micróbios de rapidamente evoluir e disseminar novas funções em resposta a mudanças no seu ambiente - nesse caso, a enorme, introdução ambiental de compostos antimicrobianos poderosos - e, portanto, capaz de apreciar os avisos de Falkow et al., poderíamos estar numa situação muito diferente hoje.

*O retorno de doenças infantis praticamente erradicadas.* O reaparecimento (inteiramente evitável) do sarampo, tosse convulsa e difteria, devido à redução da aceitação e cobertura da vacinação, reflete uma falta de compreensão do risco associado à vacina, à microbiologia subjacente e escolhas pessoais baseadas em não-evidências - hesitação nas vacinas - em países que tinham virtualmente erradicado essas doenças (Lane et al., 2018).

*O aumento de alergias.* Embora as infeções infantis graves necessitem de ser seriamente combatidas, acredita-se que a exposição a infeções mais leves e a micróbios ambientais facilite o desenvolvimento de um sistema imunológico saudável em bebés (Bach, 2018). A ascensão da microfobia (germofobia), e campanhas publicitárias que criam perceções que todos os micróbios são maus e devem ser eliminados para se obter um ambiente doméstico seguro, pode ter contribuído significativamente para a atual explosão na disfunção imunológica na nossa sociedade (por exemplo, alergias, asma, eczema e até distúrbios neurológicos). De facto, recentemente foi demonstrado que um efeito protetor contra o cancro de pele fornecido pelos micróbios da pele é reduzido através do

uso de sabões germicidas agressivos (Nakatsuji et al., 2018). Tais consequências poderiam ter sido acauteladas se tivessem sido tomadas medidas apropriadas para fornecer educação sobre a necessidade de equilibrar práticas de higiene para reduzir o peso dos patogénicos com estratégias para manter um microbiota saudável que nos fornece os principais serviços ecofisiológicos, incluindo educação eficaz sobre o sistema imunológico, através da exposição a solos, animais e plantas (Finlay e Arrieta, 2016; Gilbert et al., 2017).

*A crise dos gases de efeito estufa.* Os micróbios produzem e consomem gases de efeito estufa (Cavicchioli et al., submetido); portanto, esforços para reduzir as emissões microbianas, por um lado, e aumentar o consumo, por outro, são cruciais. Quando a participação microbiana em certas questões for considerada, é essencial compreender aspetos quantitativos e o facto de que os processos podem não ser lineares. A fixação do CO<sub>2</sub> dos gases de efeito estufa por micróbios e plantas é lenta em comparação com a libertação da queima de combustíveis fósseis por seres humanos - o ciclo normal das coisas está fora do equilíbrio - e é por isso que os níveis de CO<sub>2</sub> estão a subir rapidamente: os micróbios e as plantas não conseguem acompanhar as atividades humanas. A emissão de gases de efeito estufa resultam em aquecimento global, que por sua vez causa o degelo em solos *permafrost* (solo permanentemente congelado encontrado a centenas de metros de profundidade), o que permite nova produção microbiana de metano e CO<sub>2</sub>, amplificando e exacerbando as consequências do consumo de combustíveis fósseis.

A produção de carne por via animal, especialmente a partir de ruminantes, é acompanhada de emissões substanciais de um gás de efeito estufa - metano - facto conhecido há muito tempo. A produção de carne é baseada em produção *forage-fodder*, que por sua vez está ligada ao uso de fertilizantes azotados. A ureia, que é decomposta por micróbios do solo em amónia e no gás de efeito estufa CO<sub>2</sub>, tem um longo histórico de uso generalizado como fertilizante azotado em agricultura (embora atualmente esteja a ser eliminada). De outros fertilizantes azotados levam à produção microbiana do gás de efeito estufa extremamente potente N<sub>2</sub>O (e, é claro, eutrofização: algas nocivas induzidas por nutrientes de escoamento superficial floresce em cursos de água/corpos adjacentes que podem causar peixes extinção, hipóxia e imposição de restrições ao uso de corpos d'água afetados). Claramente, importantes decisões pessoais e políticas precisavam ter sido / precisam de ser tomadas relativo a quantidades de produção e consumo de carne além das necessidades alimentares essenciais. O escoamento de nutrientes nas vias costeiras resulta em rápido consumo de oxigénio pelo microbiota residente, que por sua vez, contribui para a rápida expansão de zonas de oxigénio mínimo. Ao identificar nove fronteiras planetárias para um futuro sustentável, incluindo mudanças climáticas, perda de biodiversidade e depleção de ozono, o ciclo do

azoto foi identificado como o limite mais seriamente comprometido devido ao facto de que a aplicação de fertilizantes feita pelo Homem agora excede todos os processos naturais ao fornecer esse nutriente vital à biosfera (Rockström et al., 2009). Há assim, atualmente, um debate, em muitos países, sobre a restrição ao uso desses fertilizantes, mas a necessidade de alimentar a crescente população mundial e produzir alimentos a um preço acessível para os membros mais pobres da sociedade, à parte dos negócios da agricultura e das suas cadeias de abastecimentos, são fatores de confusão. Parece lógico que os agricultores sejam encorajados a liderar a tomada e formulação de decisões políticas sólidas, pois eles, mais do que ninguém, entendem a relação entre alterações no azoto do solo e produtividade das culturas. No entanto, o envolvimento microbiano na questão das emissões de gases de efeito estufa relacionado com o uso de fertilizantes azotados raramente é um elemento importante no processo de decisão / debate pessoal e político, que é onde é necessário que essas discussões sejam significativas e eficazes. De um modo mais geral, as decisões políticas recentes para limitar as emissões de gases de efeito estufa lidam principalmente com emissões antropogénicas e essencialmente ignoram o facto de que os micróbios estão envolvidos tanto na produção, como no consumo de quantidades significativas de gases de efeito estufa, incluindo  $N_2O$  e  $CH_4$ , além de  $CO_2$ . De qualquer modo, todos somos afetados de diversas maneiras pelo aquecimento global e, portanto, somos as principais partes interessadas. Por exemplo, ele altera a distribuição global de patogénicos e seus vetores e, portanto, resulta no surgimento de doenças entre novas populações imunologicamente frágeis de humanos, animais e plantas igualmente frágeis ao nível das defesas, com a possibilidade de propagação epidémica.

*A crise do solo.* O solo é a pele essencial da Terra. O solo suporta o crescimento das plantas e abriga uma incrível diversidade de animais e micróbios que medeiam uma incrível gama de processos biogeoquímicos que caracterizam as funções do solo e determinam a sua saúde. O solo filtra as águas superficiais que penetram em aquíferos que fornecem água potável para biliões de pessoas. O solo contém nutrientes preciosos, e três vezes mais carbono do que o contido na atmosfera da Terra. Mas o solo da Terra está-se a degradar rapidamente, muitas vezes terminando em azinhagas, rios e oceanos, libertando os seus nutrientes pelo caminho. A maioria dos países está a perder a camada superficial do solo, muitas vezes, mais rápido do que é produzido por processos de geração de solo (intemperismo das rochas). Cada vez mais os eventos climáticos extremos estão elevando a taxa de erosão. Os microrganismos do solo produzem polissacáridos que atuam como cola para dar estrutura e estabilidade ao solo e aumentando assim a sua resistência à erosão. A perda desastrosa de solo de grande parte das terras agrícolas da Terra que é previsto ocorrer antes do final do século 21 irá resultar na incapacidade de produzir alimentos necessários para alimentar a população mundial, na libertação de grandes quantidades de nutrientes que poluirão as nossas

hidrovias e libertarão carbono que aumentará o aquecimento global. Para evitar essa crise, é absolutamente imperativo que os formuladores de políticas instituíam estratégias baseadas no conhecimento para aproveitar melhor as atividades dos recursos microbianos que melhoram a estabilidade do solo. Para garantir que isto acontece, é igualmente imperativo que os cidadãos do mundo, como partes interessadas centrais, valorizem a seriedade do problema e as opções microbianas disponíveis. Mas, para isso, a aquisição de conhecimentos em microbiologia é essencial.

*Acumulação de poluentes no meio ambiente e cadeias alimentares.* Não é suficiente saber que os micróbios participam num processo ambiental, é essencial saber o que eles fazem bem e o que fazem menos bem. Historicamente, foi conveniente assumir que a conhecida versatilidade metabólica dos micróbios iria tratar de todos os materiais poluentes libertados pela indústria, residências, hospitais e assim por diante, sem considerar a possibilidade de que haveria limitações. Mas, embora os micróbios possam degradar uma incrível variedade de materiais orgânicos, o metabolismo de alguns é lento, às vezes muito lento. Portanto, se a sua produção e libertação no ambiente é mais rápida do que a capacidade dos micróbios para degradá-los, esses materiais irão acumular e poluir, como evidenciado pela descoberta de produtos químicos tóxicos de longa duração, como PCB e dioxinas na atual cadeia alimentar, décadas após a proibição da sua produção e o atual desastre em desenvolvimento, poluição de plásticos de origem petroquímica.

*Uma sucessão de sérios problemas que estamos a enfrentar atualmente, incluindo a disseminação insidiosa entre patogénicos, resistência a drogas de último recurso, erosão do solo, o problema dos plásticos nos oceanos e o seu impacto na saúde da vida selvagem e formação e acumulação de microplásticos na cadeia alimentar, era previsível e com significativa extensão evitável se*

- os formuladores de políticas tivessem sido capazes de entender os prováveis resultados das suas decisões sobre processos microbianos e implicações a longo prazo, e*
- um espectro maior de partes interessadas da sociedade tivessem sido capacitados muito antes para apreciar os riscos das políticas e comportamentos contemporâneos*

*O exossoma e o problema particular da exposição crónica a longo prazo a baixos níveis de substâncias com atividade biologicamente ativa*

Um dos grandes desafios que é particularmente relevante à questão da literacia em microbiologia é a poluição biológica e química da biosfera, porque as decisões tomadas por nós são tanto o problema - elas podem levar a políticas que resultam em poluição - e ao mesmo tempo a chave para a sua

solução – elas podem produzir políticas que mitiguem a poluição (reduzir, remediar, reciclar). A poluição biológica, especialmente poluição fecal associada a grandes aglomerações, embora amplamente controlada em países desenvolvidos, ocasionalmente, apresenta problemas devido a falhas técnicas ou condições climáticas extremas e pode ainda ser problemático em países em desenvolvimento. No entanto, a pecuária industrializada para produção de carne está a juntar uma dimensão adicional através da ampla escala de produção de resíduos animais que incluem enormes volumes de matéria fecal contendo substâncias enriquecidas com antibióticos e micróbios resistentes, incluindo patogénicos. Embora alguns desses resíduos sejam inofensivos em digestores anaeróbios, alguns permanecem no ambiente onde podem constituir perigo.

Embora a toxicidade e os ciclos de vida de novos produtos químicos e produtos farmacêuticos sejam geralmente avaliados antes da introdução na circulação, tais avaliações fornecem principalmente informações sobre toxicidade aguda detetável em curtos períodos de tempo, principalmente em modelos padrão que carregam pouca relação aos riscos inerentes específicos que os produtos químicos possam possuir. A avaliação da toxicidade aguda para os organismos mais diretamente afetados e de baixo nível de toxicidade crónica que se manifesta a longo prazo, é extremamente desafiante. Muitos produtos químicos biologicamente ativos, particularmente produtos farmacêuticos em efluentes de resíduos e águas residuais de hospitais e residências, estão ativos em concentrações muito baixas, e alguns deles mantêm-se inalterados no seu percurso através de instalações de tratamento de resíduos para o meio ambiente. Para além disso, o facto de alguns produtos químicos poderem ser parcialmente degradados por micróbios ambientais em novos metabolitos que não são capturados em avaliações de impacto do meio ambiente, e que podem ser tóxicos de diferentes maneiras dos produtos químicos originais e que podem ser ainda mais tóxicos do que os produtos químicos que entram inicialmente no meio ambiente. A exposição crónica a níveis baixos desses produtos químicos e metabolitos pode ter consequências insidiosas a nível da população. Os compostos amplamente distribuídos no ambiente incluem xenoestrogénios - desreguladores endócrinos (Monneret, 2017) - considerados responsáveis, pelo menos em parte, pelos níveis decrescentes de fertilidade em humanos e outros animais, inseticidas responsáveis pelo número decrescente de polinizadores, como abelhas (Godfray et al., 2015; Christen et al., 2018).

Outra questão, ainda mais desafiante, é que diversos produtos químicos poluentes misturam-se no ambiente e o impacto desta mistura, especialmente com exposição prolongada a baixas concentrações, na saúde humana e no ambiente é essencialmente desconhecido, mas sem dúvida significativo. Os micróbios têm, ou podem desenvolver, a capacidade de degradar muitos desses compostos e serão frequentemente o principal agente de remoção do meio ambiente. Contudo, eles

podem não ser capazes de degradar os outros, pelo menos de maneira significativa, especialmente onde estão presentes em níveis de concentração muito baixos e ainda mais quando estão presentes em misturas complexas. Em resumo, apesar da complexidade de fatores biológicos e poluição química, e o a capacidade de os micróbios tornarem os poluentes inofensivos, o único caminho a seguir para reduzir a poluição existente será melhorar a nossa compreensão dos processos microbianos relevantes e explorá-los. Para novos produtos químicos, incluindo os produzidos usando microbiologia sintética, um design responsável deverá incluir pontos finais definidos para os seus ciclos de vida. Mas, para repetir: quaisquer que sejam as limitações que o mundo microbiano possa ter, continua a ser o único agente com o qual podemos contar para contrariar o peso excepcional que a poluição tem no planeta (de Lorenzo et al., 2016).

*É essencial que as habilidades microbianas de degradação e as suas limitações sejam apreciadas, entendidas e tornem-se centrais para o desenvolvimento de políticas de controlo e mitigação que, em última análise, governarão o nosso nível de exposição a poluentes ambientais. São necessárias políticas (globais) concertadas, coerentes e sustentáveis para*

- simplificar a identificação, avaliação e monitorização dos tipos e níveis de substâncias bioativas, e suas misturas, no nosso ambiente, ao nível local, regional e global,*
- melhorar a nossa compreensão de como essas substâncias impactam o planeta, a comunidade e a saúde individual,*
- coordenar esforços para removê-los do meio ambiente, atenuar os seus efeitos tóxicos e reduzir a sua entrada e migração através da cadeia alimentar e*
- desenvolver medidas para reduziro nosso nível de exposição a esses poluentes.*

### *Conectividade global e reações microbianas à mudança*

Por último, mas não menos importante, duas características principais do nosso planeta precisam de ser enfatizadas. A primeira é a conectividade: toda a superfície do planeta e atmosfera encontram-se ligadas por água, vento e cadeias de abastecimento de produtos humanos, que movem muito do que está na superfície e na atmosfera em redor de via veículos de transporte terrestre, marítimo e aéreo, às vezes por milhares de quilómetros. Uma consequência amplamente apreciada dessa conectividade física é o transporte de resíduos plásticos para todas as partes dos oceanos, longe dos locais onde são descartados, e a descoberta de bifenilos policlorados tóxicos - PCB – em animais polares, extremamente distantes dos seus locais de produção e utilização. Assim, embora possamos

acreditar que o potencial risco de um produto químico nas suas instalações de produção seja facilmente gerido, os mecanismos de conectividade e distribuição podem levar a problemas distantes. Mas também os agentes biológicos contribuem para a conectividade e movimento na biosfera, por movimento ativo e passivo, seja através do voo, no caso de insetos voadores, pássaros e seres humanos que viajam no ar, através de natação e flutuação no caso de organismos aquáticos, e assim por diante, e sementes, pólen e plâncton suspensos no ar e na água. A explosiva disseminação global de doenças respiratórias agudas graves (SARS) em 2003, a epidemia anual de influenza originária da Ásia, o surto de doença entero-hemorrágica por *E. coli* na Alemanha transmitida por sementes orgânicas rebentos de feno-grego importados do Egito, a expansão de doenças devido ao aumento da imigração, como o aumento da tuberculose em países africanos como Marrocos e doenças transmitidas por piolhos com vírus africanos em Espanha, são exemplos das consequências de *conectividade biológica*. O comércio internacional também desempenha um papel significativo na disseminação de patógenos e pode ser responsável pela distribuição geográfica atual de diversas doenças de plantas causadas pela *Xylella fastidiosa*, um dos patógenos vegetais mais graves do mundo, tendo um enorme impacto económico para a agricultura, jardins públicos e ambiente. Ao contrário de muitos patógenos transmitidos por vetores, que possuem vetores específicos do hospedeiro e, portanto, um hospedeiro restrito, a *X. fastidiosa* é transmitida por vários vetores que se alimentam de seiva e, assim, infecta uma ampla variedade de hospedeiros de plantas. As águas de lastro dos navios que são carregadas e descarregadas em diversos pontos do globo podem criar novas populações não-indígenas, às vezes organismos perigosos, como espécies de algas tóxicas, que representam problemas de biossegurança. E as poeiras do deserto, ricas em fósforo, ferro e micróbios, são transportadas por correntes aéreas para lugares distantes: a poeira do Saara cai regularmente na Europa e fertiliza as águas do Golfo do México e do Mar dos Sargaços, permitindo que as algas se desenvolvam. Assim como a conectividade da água e do ar medeia a distribuição de produtos químicos de longa duração, incluindo materiais radioativos, por toda a biosfera e atmosfera, ela também garante a distribuição de micróbios minúsculos, quase sem peso. Mas, ao contrário dos produtos químicos, os micróbios podem se reproduzir, colonizar oportunisticamente e impactar qualquer lugar que considerem favorável. A distribuição global de micróbios está encapsulada no mantra: *todos os micróbios estão por toda parte*. Um corolário, mais significativo, para o mantra talvez seja: se os micróbios puderem lucrar por influenciar um processo em algum lugar, eles estarão lá a exercer essa habilidade. Uma segunda característica importante do planeta é o facto de que as mudanças causadas por eventos naturais ou acidentais, ou ações deliberadas por humanos, muitas vezes provocam uma resposta inesperada, que resulta numa consequência que pode ser diferente daquela que seria antecipada.

Pode ser devido a respostas físico-químicas ou, frequentemente, respostas biológicas, especialmente microbiológicas. Portanto, quando decidimos que devemos realizar algum tipo de ação, além das considerações usuais de viabilidade, custo, logística entre outras, é preciso também ter em consideração que os micróbios não são passivos a alterações antropogênicas significativas - intencionais e não intencionais - ao meio ambiente: eles respondem ativamente e, assim, alteram, as consequências das nossas ações, positivamente e negativamente. Precisamos sempre de fazer a pergunta: há atividades microbianas direta ou indiretamente envolvidas ou afetados pelo processo em discussão e, em caso afirmativo, quais são as respostas possíveis/prováveis para a ação proposta? Infelizmente, ainda não aprendemos a discutir com os micróbios, e como tal não podemos perguntar o que eles farão quando fizermos alterações. Portanto, previsões baseadas em evidências desde a monitorização e modelação de como os micróbios respondem as alterações ambientais, e cautela, são essenciais. Vandalizar o lema bem usado - *pensar globalmente, agir localmente* - podemos encorajar as pessoas a *agir localmente, mas somente após a devida consideração das potenciais reações locais, regionais e globais que possam levar a consequências colaterais (incluindo consequências não intuitivas que possam ser totalmente diferentes do tópico em consideração)*.

*A natureza interconectada do nosso planeta exige que, antes de agirmos, devamos ser capazes de*

- avaliar criteriosamente os possíveis efeitos colaterais, o grau de impacto e caminhos adequados, de ação local sobre atividades microbiológicas em regiões de proximidade variável e a nível mundial,*
- mapear e modelar adequadamente os cenários de impacto, incluindo longevidade e contramedidas, usando métodos adequados,*
- considerar cuidadosamente os planos de ação alternativos quando nós, com base em suposições conservadoras, temos pouca confiança nas nossas previsões e*
- monitorizar, rever e aprimorar políticas, e capacitar entidades locais a evitar ações descoordenadas ou fraudulentas, que involuntariamente ou de outra forma possam causar efeitos adversos.*

## **O problema**

O problema é que o conhecimento dos micróbios e suas atividades está atualmente concentrado num pequeno grupo de especialistas, os microbiólogos. Claro, a sociedade sempre recorreu a especialistas para aconselhar os tomadores de decisão, por exemplo, os economistas para

aconselhar governos sobre o custo de implementação de novas políticas. A questão aqui é que as atividades microbianas são tão difundidas e afetam tao direta e intimamente as decisões quotidianas de todos na sociedade, que a opção de consultar oportunamente microbiólogos ou interrogar todo o conhecimento de microbiologia é, apesar do acesso à internet sobre informações relevantes, na maioria das situações impraticável ou impossível. Assim, temos por um lado microbiólogos, que têm pouca influência nas decisões políticas a qualquer nível, e no outro formuladores de políticas e tomadores de decisão que não possuem conhecimentos essenciais para as mesmas decisões. *Como podemos abordar de um modo efetivo as crises enfrentadas por nós, se nem as causas subjacentes das crises nem as potenciais soluções (Brussow, 2017) podem ser entendidas e avaliada pelos formuladores de políticas e partes interessadas?*

*Se queremos evitar repetir os erros do passado que levaram a resultados catastróficos do tipo descrito acima, as informações essenciais subjacentes à percepção correta dos problemas, escolhas e decisões políticas, baseadas em evidências, devem ser um componente integrante da nossa base de conhecimento individual e coletiva. De modo a evitar desencadear eventos desastrosos evitáveis no futuro,*

- conhecimento básico de processos microbiológicos e atividades, e das suas interações multidirecionais e interdependências, não deve apenas tornar-se parte da conscientização pública, mas*
- um conhecimento intermediário desses processos deve fazer parte das capacidades dos formuladores de políticas pertinentes, e*
- os sistemas de decisão devem exigir critérios mais adequados, baseados em evidências e revistos por especialistas*

## **Um caminho rumo a uma solução: obtenção de literacia em microbiologia na sociedade**

*Os principais elementos da microbiologia devem fazer parte da educação básica*

Alguns membros da sociedade, como os educadores, políticos, líderes industriais, chefes de empresas nacionais e internacionais, agências e assim por diante, têm a maior necessidade de conhecimento em microbiologia porque as suas decisões têm maior impacto social do que as de outros. No entanto, todos os indivíduos tomam decisões microbiologicamente relevantes e desenvolvem práticas microbiologicamente relevantes todos os dias. Além disso, somos todos partes interessadas nas principais decisões políticas que afetam a nossa saúde e bem-estar e do nosso

planeta. Para sermos capazes de exercer os nossos direitos como cidadãos e cumprir as nossas responsabilidades de informar competentemente os tomadores de decisão, como eleitores ou membros de grupos de interesse, devemos ser instruídos em microbiologia. Existe, portanto, uma necessidade crucial de alfabetização em microbiologia a todos os níveis da sociedade: a alfabetização em microbiologia deve tornar-se parte da descrição de funções dos adultos.

Um repositório de conhecimento comum e avaliação crítica das capacidades adquiridas durante a educação infantil são geralmente considerados essenciais para a passagem para a idade adulta. Até agora, o conhecimento da língua nativa, uma língua estrangeira, história, geografia, assuntos atuais, matemática, física, química e biologia, entre outras, são consideradas disciplinas essenciais para uma educação equilibrada, ou seja: o conhecimento destas disciplinas é considerado um atributo essencial da crescimento, necessário às responsabilidades associadas à família e emprego, à obrigação de processar informações recém-chegadas para a vida pessoal e profissional, e à necessidade de tomar decisões diárias produtivas que nos ajudam a navegar pelas voltas e reviravoltas da vida. Nós, como Bergey em 1916, defendemos que o conhecimento e a compreensão dos micróbios e das suas atividades são tão essenciais para a educação geral assim como estas disciplinas.

*A microbiologia deve tornar-se um elemento central do currículo escolar para que os tomadores de decisão estejam informados adequadamente e que todas as outras partes interessadas possuam um entendimento básico de como a sociedade e suas ações estão intimamente interconectadas e relacionadas com o nosso mundo microbiano. Como consequência, as partes interessadas da sociedade tornar-se-ão habilitadas a*

- tomar decisões informadas por si mesmos (e outros, por exemplo, descendentes),*
- avaliar de modo crítico os argumentos a favor e contra alternativas de decisão e, assim, oferecer preferências informadas àqueles que tomam decisões em seu nome e*
- ser capaz de responsabilizar aqueles que não tomem decisões com base em evidências científicas.*

*Um conceito e formato de ensino pessoal centrado na experiência para todas as faixas etárias, com ênfase nos grandes desafios e metas de desenvolvimento sustentável*

Como os micróbios afetam as nossas vidas desde o primeiro dia (de facto, afetam-nos muito mais cedo), o ensino deve começar no início do 1º ciclo do ensino básico e ter um fio condutor ao longo de

todos os níveis de ensino, para capacitar tomadores de decisão de todos os níveis para tomar decisões informadas sobre as melhores práticas e proporcionar aos jovens e idosos o conhecimento para entender a base de tais decisões. As pessoas devem compreender a diferença entre o que é bastante certo, o que é provável e o que é desconhecido. Os indivíduos devem ser capazes de assumir riscos baseados em evidências: avaliações de benefícios que lhes permitam tomar decisões sobre ações fundamentalmente benéficas que carreguem algum grau de risco ou interagir construtivamente com agências que tomam essas decisões em seu nome. E, eles devem saber que novos conhecimentos precisam de ser obtidos para fazer as melhores políticas baseadas em evidências no futuro.

Pre vemos o desenvolvimento de currículos escolares sobre microbiologia para o jardim de infância, ensino básico e secundário, além de currículos de ensino de microbiologia para formação de professores no ensino superior (ver também p. Bergey, 1916; Savage e Bude, 2014; Scalas et al., 2017; <https://enviroliteracy.org/environment-society/environmentalhealth/microrganisms/>; <http://www.actionbioscience.org/biodiversity/wassenaar.html>, <https://schaechter.asmblog.org/schaechter/2013/04/whose-planet-is-it-anyway-1.html>). Eles também devem estar disponíveis como um serviço público de educação, atualizando indivíduos literatos em microbiologia e capacitando aqueles que não receberam instrução na escola para aprender o básico e acompanhar os novos progressos. Embora o desenvolvimento desses currículos seja o missão dos organismos de ensino em causa, para facilitar a sua implementação, propomos uma série de tópicos – um enquadramento de alfabetização em microbiologia (*ensino de microbiologia na escola e pré-escola: enquadramento centrado na experiência da criança*, Timmis, K. N. et al., em preparação) - e um formato de ensino que envolve uma pergunta inicial simples relacionados com a experiência quotidiana, seguida pela exposição à microbiologia subjacente numa linguagem simples, a sua relevância para os Grandes Desafios e ODS, a sua relação com os processos da biogeosfera e com a saúde planetária e, principalmente, a sua consequência na tomada de decisão, por exemplo:

- Pai: eu gostava muito de comer um hambúrguer no *bowling* hoje à tarde, mas a Jenny disse-me ontem que as vacas contribuem para o aquecimento global: isso é verdade? (*Gases de estufa, fontes e dissipadores, digestão ruminante, emissões de metano, aquecimento global, aumento do nível do mar e estados de tempo extremos, como eles nos afetam, ODS-13: Combater as alterações climáticas*);
- Mãe: disseram-nos nas aulas que a Joanne tem sarampo: porque é que ela não foi vacinada como eu? (*Eficácia da vacina, riscos, correlações e causalidades, considerações sobre o risco: benefício, imunidade do rebanho, benefícios colaterais de imunização, ODS-3: garantir uma vida saudável*);

- Mãe: dizes-me sempre para lavar as mãos depois de ir à casa de banho, porque cocó é desagradável. Mas o que acontece depois de puxar o autoclismo? (*Tratamento de esgoto, patógenos fecais, indicadores fecais como quantificadores da carga de patógenos nas fezes e qualidade da água, SDG-6: Saneamento para todos*);
- Senhora: por que é que as plantas não crescem no escuro? (*As plantas e os micróbios fotossintéticos capturam energia solar e produzem biomassa: a base da cadeia alimentar; fotossíntese, cloroplastos, mitocôndrias originárias de micróbios precoces; plantas e micróbios fotossintéticos fornecem alimentos para o mundo, energia, matérias primas químicas renováveis, não poluentes, desenvolvimento sustentável, ODS 2: Acabar com a fome, 7: Garantir acesso a energia sustentável, 12: Garantir padrões de produção sustentável*)

Esta abordagem tem o mérito de que a relevância/importância da microbiologia subjacente à sociedade se torne aparente para os alunos no início da das aulas.

Os objetivos da coleção dos tópicos selecionados são para

- ajudar no desenvolvimento de currículos apropriados para diferentes faixas etárias em diversas sociedades e configurações culturais,
- revelar os principais processos humanos da biosfera planetária e problemas impactados ou sustentados por atividades ecofisiológicas microbianas
- informar como estas atividades afetam o nosso bem-estar e o de outros membros da biosfera,
- revelar como as atividades microbianas são influenciadas pelas nossas ações e as consequências resultantes,
- indicar como podemos orientar ou explorar as atividades microbianas para benefício pessoal, humano, planetário, e contribuir para a obtenção dos ODS.
- fornecer uma perspectiva do nosso lugar no amplo mundo e como estamos conectados microbiologicamente na aldeia global com o resto do biosfera.

A estrutura de conhecimento da *literacia em microbiologia* inicialmente consiste em cerca de 100 tópicos centrados na experiência, agrupados nas categorias de Bem-Estar Humano, Planeta Terra, Água, Plantas, Animais, Nutrição-Alimentos-Bebidas, e Biotecnologia, que em breve se tornará disponível, grátis, *online*. Esses tópicos certamente serão aprimorados e refinados ao longo do tempo. Deve-se enfatizar que, apesar da falta de visibilidade dos sujeitos em discussão - os

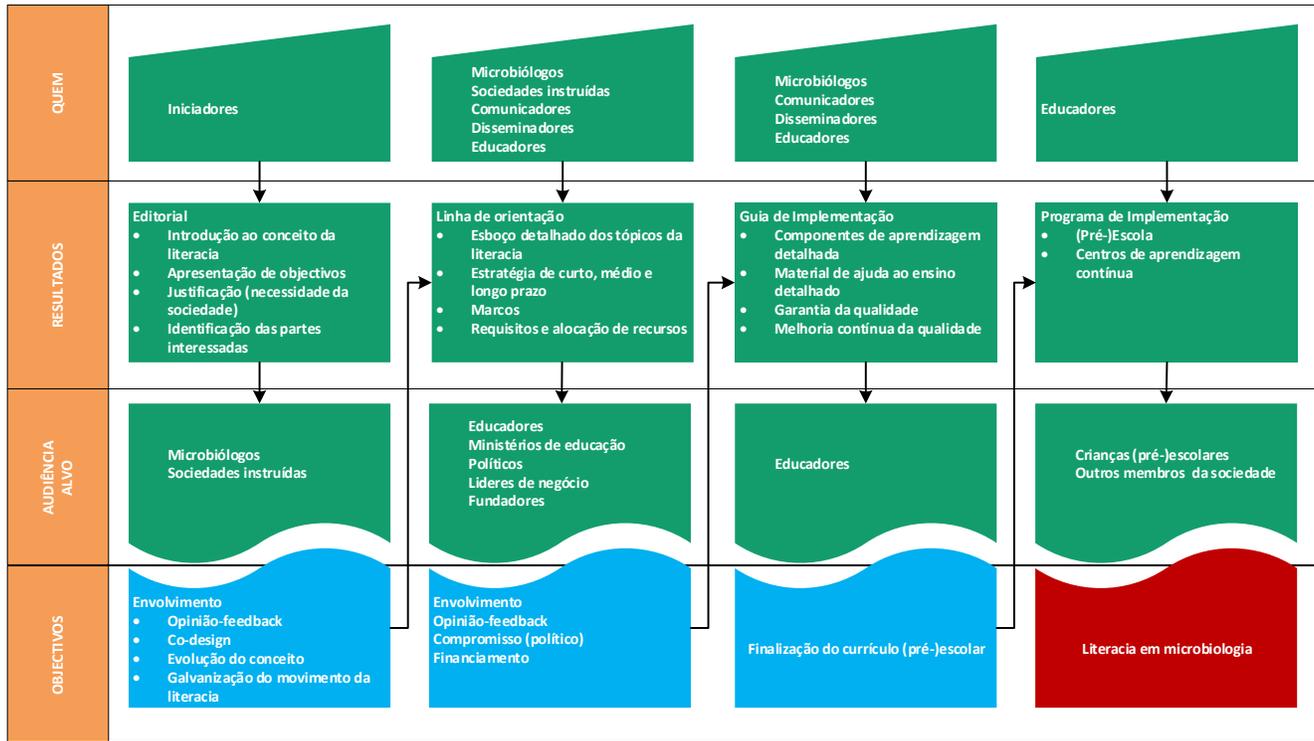
micróbios – o ensino de tópicos de microbiologia pode ser particularmente fascinante para crianças, porque a microbiologia é uma disciplina experimental e prática, e os alunos podem realizar experiências incríveis em vários níveis escolares. Sugestões para experiências simples e relevantes para cada categoria de tópico também serão disponibilizadas online. Além disso, existem muitos processos microbianos interessantes realizados por empresas (produção de cerveja, queijos, pão, fermentações, etc.) e órgãos públicos (estações de tratamento, laboratórios de diagnóstico, entre outros) que podem, dependendo do que está disponível localmente, ser experienciados em primeira mão por meio de excursões escolares. Novamente, uma lista ilustrativa de possíveis excursões, com sugestões para os professores de como organizar a experiência para obter o máximo ganho de conhecimento, interesse e diversão para os alunos, será disponibilizada online.

Os tópicos fornecidos na estrutura de conhecimento não são nem exaustivos ao nível do alcance nem estruturados de maneira a que seja necessário serem tratados integralmente para uma determinada faixa etária. À exceção de alguns tópicos introdutórios, a maioria será compreensível por si só e, portanto, constitui um sistema modular de opções para seleção e correspondência, de acordo com as preferências do professor e estilos e objetivos de aprendizagem do aluno. No entanto, o objetivo principal é que as crianças se familiarizem com todos os tópicos ao longo de suas carreiras escolares.

Deve-se enfatizar que não se destina a criar *literacia em microbiologia*, ensinando a disciplina de microbiologia e criando profissionais de microbiologia. Pelo contrário, a intenção é fornecer uma base de conhecimento adequada de atividades microbianas centrais à capacitação da sociedade para alcançar melhorias na vida quotidiana, desenvolvimento de políticas e administração planetária baseadas em evidências.

E, é essencial que a sociedade rapidamente se dê conta de que o preconceito generalizado de que os micróbios são nossos inimigos não é apenas incorreto, mas gera perigosas práticas comportamentais. Os micróbios são como os seres humanos: a maioria tem pouca ou nenhuma influência direta nas nossas vidas, muitos são altamente benéficos e apenas alguns são perigosos para nós. E, como os humanos, são os bandidos - aqueles que causam doença ou perdas materiais - que atraem mais atenção da imprensa e sobre o que sabemos mais. No entanto, é crucial que os micróbios como um todo sejam retratados como nossos amigos, como eles não apenas nos ajudam silenciosamente em nossas vidas, mas podem ser chamados a resolver grandes problemas, como aumentar produção de alimentos, e que especialmente 50% das células do nosso corpo que são componentes microbianos que sejam representadas como família mais próxima.

*É essencial que o conhecimento dos micróbios na sociedade seja aumentado para dissipar a crença e a prática prejudiciais da microfobia. Esta é uma mensagem central da ajuda à literacia em microbiologia e estará na vanguarda do seu uso nos currículos escolares.*



TEMPO →

Fig. 1 Iniciativa de literacia em microbiologia

\* Educação de microbiologia na escola e pré-escola: um enquadramento centrado na experiência da criança, Timmis, K.N. et al, em preparação

## Vamos fazê-lo!

Os microrganismos - animais e plantas - não são apenas os principais membros da biosfera, mas também são componentes integrais da sociedade humana, da evolução, da civilização e da própria psique humana. Como espécies domesticadas, elas fornecem alimentos, fibras, conforto, prazer e bem-estar e, como espécies selvagens, fontes de admiração, hobbies e diversidade. A conservação dos macrorganismos é a nossa responsabilidade primordial. Como resultado, a biologia - essencialmente animal e vegetal - historicamente tem sido um assunto central da educação, por mérito próprio e como fundamento do ensino da biologia humana e da educação para a reprodução. O interesse popular e a apreciação de macrorganismos aumentou enormemente nos últimos anos como resultado de documentários televisivos de grande sucesso por David Attenborough (<https://www.theatlantic.com/science/archive/2016/05/every-episode-of-david-attenboroughs-life->

series-ranked/480678/). Por outro lado, devido ao seu tamanho, os micróbios são invisíveis para o público em geral – *longe da vista, longe do coração* - geralmente não se encontram nos radares, exceto quando eles criam confusão digna de notícias, como a SIDA, o Ébola e a maré vermelha. Este componente invisível da biosfera é amplamente negligenciado na educação geral. Mesmo assim, nos últimos tempos, as descobertas surpreendentes sobre microbiomas e as suas variadas influências na biologia e comportamento humanos aumentaram significativamente a consciencialização sobre os micróbios na população em geral. Apesar disso, os micróbios permanecem entidades essencialmente abstratas, menos compreendidos que a internet e em pé de igualdade com o funcionamento da memória. Mas o seu significado é incomensuravelmente maior que a internet - nós sobrevivemos sem a internet até ela chegar, mas não poderíamos sobreviver, nem poderíamos ter sobrevivido, sem os nossos sistemas de suporte de vida microbianos. Portanto, é essencial que o mundo microbiano, em toda a sua incrível, inerente, mas microscópica beleza, transite da abstração para a pictórica percepção e substância e, assume a sua posição legítima na psique humana. Os recursos visuais tomarão assim o palco nas aulas de alfabetização e na arena explosiva de arte (por exemplo, <https://www.bbc.com/news/uk-englandoxfordshire-45099420> ) estimulará a imaginação. Isto deve tornar-se rotina de modo a que, quando os micróbios forem discutidos, os nossos filhos possam visualizá-los imediatamente no olho das suas mentes e imaginar o que eles estão a fazer. Enquanto os micróbios transitam do abstrato e tomam forma, eles tornar-se-ão reais; as crianças terão os seus favoritos! Peluches e ovelhas de lã serão acompanhadas pelo Metano fumegante, pelo Wolbo astuto e pelo Diatoma espinhoso, todos com as suas personalidades (antropocêntricas) atribuídos pelos fabricantes de brinquedos mais ágeis. Eles poderão até tornar-se nos desenhos animados favoritos na TV num futuro não muito distante.

Este Editorial tem três objetivos fundamentais, colocados em contexto da Figura 1, que é um roteiro para a introdução de tópicos de alfabetização microbiológica nos currículos escolares.

O primeiro é expor o conhecimento crucial e o défice de competências na sociedade necessários para alcançar decisões baseadas em evidências sobre uma variedade de questões sociais e apresentar o caso de uma sociedade letrada em microbiologia, a ser alcançada através da incorporação do enquadramento dos principais temas de microbiologia no ensino básico.

O segundo é incentivar microbiólogos, sociedades instruídas em microbiologia e profissionais com conhecimentos em microbiologia, a participar e contribuir para esta iniciativa, evoluindo ainda mais a estrutura básica, contribuindo com ideias e materiais para tópicos, vídeos e experiências em aula, e desenvolver e procurar financiamento para a criação das ferramentas e materiais de ensino necessários.

E o terceiro, mais importante, objetivo deste Editorial é instar os microbiólogos, as sociedades instruídas em microbiologia e profissionais com experiência em microbiologia a contactar com e influenciar educadores, políticos, líderes empresariais, agências governamentais e não governamentais relevantes, e outros, para unir forças num esforço internacional para convencer facilitadores da necessidade crucial de alcançar a literacia em microbiologia na sociedade (somos todos partes interessadas na saúde planetária e humana: podemos realmente dar ao luxo de ignorar uma base fundamental de nossa capacidade de resolver as atuais crises?) e persuadi-los a defender a sua progressão para o próximo estágio, a implementação. Para facilitar isso, sempre que possível, evitámos o uso de termos especializados neste Editorial, para que possa ser usado para vários públicos.

### **Agradecimentos**

Esta iniciativa baseia-se nos esforços anteriores de inspirar microbiólogos que reconheceram a necessidade fundamental de melhorar a alfabetização em microbiologia nas nossas sociedades. Elevando a consciencialização sobre o assunto e criando excelentes, textos centrados nas crianças e diversos materiais didáticos que podem ser integrados e facilitar a evolução de currículos de ensino para a *literacia em microbiologia*, eles estabeleceram uma base soberba.