

La urgente necesidad de alfabetizar a la sociedad en microbiología¹

Kenneth Timmis¹, Ricardo Cavicchioli², José Luis García³, Balbina Nogales⁴, Max Chavarría⁵, Lisa Stein⁶, Terry J. McGenity⁷, Nicole Webster⁸, Brajesh Singh⁹, Jo Handelsman¹⁰, Victor de Lorenzo¹¹, Carla Pruzzo¹², James Timmis¹³, Juan Luis Ramos Martín¹⁴, Willy Verstraete¹⁵, Mike Jetten¹⁶, Antoine Danchin¹⁷, Wei Huang¹⁸, Jack Gilbert¹⁹, Rup Lal²⁰, Helena Santos²¹, Sang Yup Lee²², Angela Sessitsch²³, Paola Bonfante²⁴, Lone Gram²⁵, Raymond T. P. Lin²⁶, Eliora Ron²⁷, Ceren Karahan²⁸, Jan Roelof van der Meer²⁹, Seza Artunkal³⁰, Dieter Jahn¹, Lucy Harper³¹

¹*Autor para correspondencia*: Institute of Microbiology, Technical University Braunschweig, Germany, ktimmis@gmail.com, ²School of Biotechnology and Biomolecular Sciences, The University of New South Wales, Sydney, Australia, ³Departamento de Biología Ambiental, Centro de Investigaciones Biológicas (CIB) (CSIC), Madrid, España, ⁴Area Microbiologia, Dept. Biologia, Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, España, ⁵Escuela de Química, Centro de Investigaciones en Productos Naturales (CIPRONA), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica & Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas (CENIBiot), CeNAT-CONARE, San José, Costa Rica, ⁶Dept. of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada, ⁷School of Biological Sciences, University of Essex, Colchester, UK, ⁸Australian Institute of Marine Science, Townsville and Australian Centre for Ecogenomics, University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia, ⁹Hawkesbury Institute for the Environment, University of Western Sydney, Penrith, Australia, ¹⁰Wisconsin Institute for Discovery, University of Wisconsin-Madison, USA, ¹¹Programa de Biología de Sistemas, Centro Nacional de Biotecnología, CSIC, Madrid, España, ¹²Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita (DISTAV), Università degli Studi di Genova, Italy, ¹³Athena Institute, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands, ¹⁴Estación Experimental del Zaidín-CSIC, Granada, España, ¹⁵Center for Microbial Ecology and Technology (CMET), Ghent University, Belgium, ¹⁶Department of Microbiology, Radboud University Nijmegen, The Netherlands, ¹⁷Institut Cochin INSERM U1016—CNRS UMR8104—Université Paris Descartes, Paris, France, ¹⁸Department of Engineering Science, University of Oxford, UK, ¹⁹Dept. of Pediatrics, University of California at San Diego, USA, ²⁰Department of Zoology, Molecular Biology Laboratory, University of Delhi, India, ²¹Instituto de Tecnologia Química e Biológica. Universidade Nova de Lisboa, Oeiras, Portugal, ²²Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea, ²³Bioresources Unit, AIT Austrian Institute of Technology, Tulln, Austria, ²⁴Department of Life Science and Systems Biology, University of Torino. Italy, ²⁵Department of Biotechnology and Biomedicine, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, ²⁶Department of Microbiology and Immunology, National University of Singapore, ²⁷School of Molecular Cell Biology & Biotechnology, Tel Aviv University, Israel, ²⁸Dept. of Medical Microbiology, Ankara University, Turkey, ²⁹Institut de Microbiologie Fondamentale, University of Lausanne, Switzerland, ³⁰ Department of

¹ Traducción del artículo original <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1462-2920.14611> contribuida por Max Chavarría (Univ Costa Rica), Juan Luis Ramos (CSIC Granada), Jose Luis García (CSIC Valencia), Victor de Lorenzo (CSIC Madrid) y Balbina Nogales (Universitat de les Illes Balears, Palma).

Resumen

Los microorganismos y sus actividades tienen efectos omnipresentes, y generalmente positivos en el funcionamiento, y por lo tanto en la salud y el bienestar, de los seres humanos, la totalidad del mundo biológico y, desde luego en toda la superficie del planeta y su atmósfera. En conjunto, y en gran medida a través de la energía del Sol, los microorganismos son el sistema de soporte de la vida en la biosfera. Esto requiere su consideración en las decisiones que toman las personas en la vida cotidiana, así como los individuos y las organizaciones responsables en todos los niveles y etapas de la evaluación de la salud comunitaria, nacional y planetaria y en la planificación y formulación de sus políticas pertinentes. Sin embargo, a diferencia de otros temas con impacto significativo en la humanidad (como los asuntos financieros, la salud y el transporte) de los cuales existe una comprensión generalizada, el conocimiento en actividades microbiológicas relevantes, en cómo estas afectan nuestras vidas y en cómo pueden aprovecharse para el beneficio de la humanidad (*la alfabetización en microbiología*) es deficiente en la población en general y en los subconjuntos de esta, constituidos por los encargados de tomar decisiones. Las opciones en las que están implicadas las actividades microbiológicas a menudo son difusas, y la información disponible a veces es imparcial y generalmente incompleta, lo que causa gran incertidumbre. Como consecuencia, incluso las "mejores" decisiones basadas en la evidencia, frecuentemente han conducido a resultados imprevistos, no intencionados y, en ocasiones, no deseados. Por ello, sostenemos que la *alfabetización en microbiología* de la sociedad es indispensable para tomar decisiones personales informadas, así como para el desarrollo de políticas en el gobierno y en las empresas, y para aportar información a los actores sociales implicados. La comprensión de las actividades microbiológicas clave es tan esencial para la transición de la infancia a la edad adulta como algunas materias que se enseñan actualmente en la escuela y por ende, debe adquirirse durante la educación general. *La alfabetización en microbiología debe convertirse en parte de la formación profesional de los ciudadanos del mundo.* Para facilitar el logro de la *alfabetización en microbiología* de la sociedad, a través de su incorporación en los planes de estudio educativos, proponemos aquí un concepto y formato de enseñanza básico que se adapta a todas las edades, desde preescolar hasta la escuela secundaria, y posiciona las actividades microbiológicas clave en el contexto de nuestra vida cotidiana, los grandes desafíos que enfrentan la humanidad y el planeta Tierra, y los objetivos de sostenibilidad y desarrollo sostenible. Exhortamos a los microbiólogos y sus sociedades, así como los profesionales con conocimientos en microbiología, a participar y contribuir en esta iniciativa mediante su ayuda en el desarrollo del concepto básico, buscando recursos para desarrollar herramientas y materiales de enseñanza atractivos para los niños, potenciando su impacto y sobre todo convenciendo a los educadores, a los que toman decisiones, a los líderes empresariales, agencias gubernamentales y no gubernamentales para que apoyen y promuevan esta iniciativa. La *alfabetización en microbiología* de la sociedad debe ser una realidad.

El contexto

Microbiomas y biomas.

Las comunidades microbiológicas crean segundas pieles en prácticamente todas las superficies que están en contacto con el medio ambiente de todos los macroorganismos de la biosfera: los animales y las plantas. Estas pieles microbiológicas constituyen barreras ecofisiológicas dinámicas que expanden las funciones de barrera física y química (por ejemplo, contra el ataque de patógenos) de las superficies epiteliales. Pero además de sus propiedades de barrera, tales comunidades microbiológicas tienen múltiples interacciones con sus hospedadores, les proporcionan funciones esenciales y tienen una influencia prevalente en el bienestar y las características biológicas de sus hospedadores. Por ejemplo, los microorganismos que están asociados a las plantas, median la adquisición de minerales esenciales, y el nitrógeno para su crecimiento (de hecho, sin la fijación de nitrógeno mediada por microorganismos, no habría habido suficiente producción de biomasa por parte de los productores primarios (las plantas) para la proliferación y evolución de los consumidores animales), las protegen contra las infecciones y producen compuestos similares a las hormonas que promueven su crecimiento. Algunos microorganismos transportados por las plantas son tóxicos para los animales y, por lo tanto, funcionan como mecanismo de defensa contra los depredadores. Los microorganismos protegen a los animales de enfermedades, fermentan alimentos dentro de rumiantes como las vacas y digieren alimentos para los insectos. Si bien, esencialmente todos los macroorganismos están cubiertos por microorganismos, algunos también contienen los llamados microorganismos endosimbiontes que viven dentro de las células hospedadoras. Los endosimbiontes juegan un papel importante en los ciclos de vida de varios organismos, como los insectos (en los que incluso pueden determinar el sexo del hospedador), las esponjas y las plantas, e incluso en otros microorganismos como los protozoos. Los orgánulos intracelulares responsables de recolectar la energía solar (plastos o plastidios) en organismos fotosintéticos, y de generar energía (mitocondrias) en la mayoría de los organismos, evolucionaron a partir de bacterias endosimbióticas. El componente microbiano de un organismo, el llamado *microbioma* [Microbioma: "una comunidad microbiana característica que ocupa un hábitat razonablemente bien definido que tiene propiedades fisicoquímicas distintas]. El término, por lo tanto, no solo se refiere a los microorganismos implicados, sino que también abarca su rango de actividades (Whipps *et al.*, 1988), y es una característica esencial de la identidad y la ecofisiología de un organismo: los animales y las plantas libres de gérmenes son fenómenos infrecuentes de laboratorio con programas de desarrollo defectuosos que los hacen incapaces de sobrevivir en sus hábitats naturales. El conjunto, integrado por el microbioma y su hospedador, se denomina *bioma*. La perturbación del microbioma, que conduce a la llamada *disbiosis*, puede alterar su relación con el hospedador y perturbar las funciones que contribuyen a su bienestar. Un claro ejemplo es la perturbación provocada por el herbicida glifosato en el microbioma intestinal de las abejas, lo que conduce a un aumento de su susceptibilidad a los patógenos (Motta *et al.*, 2018).

Los humanos son 50% microbianos.

El *bioma* humano es, en términos de números de células, 50% microbiano (Sender *et al.*, 2016). Los microorganismos intestinales humanos digieren gran parte de nuestra ingesta de alimentos y liberan sus nutrientes en formas que podemos asimilar y utilizar, proporcionan vitaminas esenciales, aminoácidos y otros micronutrientes que no podemos generar por nuestra cuenta, producen compuestos

similares a las hormonas y, por lo tanto, actúan como un segundo sistema endocrino (Brown y Hazen, 2015) que desempeña un papel decisivo en una gran variedad de enfermedades físicas y mentales (Wang *et al.*, 2017; Du Toit, 2019). Un ejemplo clásico de *disbiosis* es la perturbación del microbioma intestinal inducida por los antibióticos, lo que a veces conlleva que *Clostridium difficile* adquiera ventaja y cause una colitis pseudomembranosa (Bartlett, 1979). Es crucial que reconozcamos que desde el nacimiento y hasta la muerte vivimos en una relación íntima, dinámica y mutuamente beneficiosa con nuestros microbiomas; una relación integrada y recíproca que en gran medida define qué y cómo y, por lo tanto, quiénes somos (y por supuesto, quiénes son ellos).

Es posible que nos inquietemos por lo poco que sabemos y podemos confiar en nuestros conocimientos, sin saber esencialmente nada acerca de nuestros amigos más íntimos e influyentes. Por esta razón, para poder maximizar nuestro bienestar personal es vital que comprendamos:

- *lo que hacen nuestros socios microbianos,*
- *el impacto que tienen sus actividades en nosotros,*
- *cómo nuestros socios microbianos y sus actividades se ven afectados por lo que hacemos, y*
- *cómo podemos mejorar nuestras asociaciones para beneficio mutuo*

Los microorganismos al servicio de la humanidad.

Los microorganismos no solo nos afectan personalmente como individuos, sino que han sido utilizados al servicio de la humanidad desde tiempos inmemoriales; inicialmente en la producción de alimentos y bebidas fermentados (cerveza, vino, productos lácteos y pan), como materiales absorbentes (enriado del lino), para el mantenimiento de la fertilidad del suelo (haciendo uso de leguminosas que contienen bacterias fijadoras de nitrógeno y la fertilización con biomasa microbiana) y, posteriormente, para la reducción de la contaminación a través de la degradación de los desechos domésticos e industriales y en el suministro de agua potable. En particular, la fermentación de los alimentos para conservarlos y mejorar su calidad nutricional y posteriormente, las mejoras en la higiene a través del tratamiento microbiano de los desechos humanos y la reducción concomitante de su carga de patógenos, contribuyó significativamente al surgimiento de la civilización y en la mejora de la calidad y longevidad de la vida humana.

En tiempos más recientes, los microorganismos han tomado protagonismo en el florecimiento de la bioeconomía (Timmis *et al.*, 2017) y del marco económico global que se ha designado como la Cuarta Revolución Industrial (4IR). Junto con la conectividad ilimitada, la inteligencia artificial, los sensores masivos, el procesamiento de macrodatos (*big data*), la robótica y muchas otras tecnologías, la 4IR también prevé la producción sostenible de bienes en el contexto de una economía circular con cero desechos, sin emisiones dañinas, y en la que todo sea reciclado (Nielsen, 2017). Los procesos mediados por microorganismos son ideales para la 4IR porque no requieren condiciones extremas, ni un alto consumo de energía, ni reactivos tóxicos. Además, los materiales, los desechos producidos y los reactivos implicados en estos procesos generalmente son fáciles de reciclar. Como consecuencia de ello, las transformaciones químicas mediadas por biocatálisis, que antes eran un complemento marginal de los procesos químicos, y se centraban en la producción de un pequeño número de moléculas bioactivas de alto valor

agregado, han surgido como una alternativa ambientalmente sostenible para hacer conversiones químicas a gran escala de materias primas renovables a productos. La base de estos desarrollos se centra en las biofábricas—biofactorías—(principalmente microbiológicas) y las enzimas obtenidas a partir de ellas, ya sean naturales o modificadas genéticamente.

Además de la biocatálisis, algunos ejemplos de la amplia gama de procesos en los que actúan los microorganismos son:

- en la fabricación de diversos alimentos (yogur, queso, proteínas de microorganismos (*single cell proteins*), chocolate, embutidos curados, encurtidos y probióticos), saborizantes y condimentos alimenticios (vainilla, salsa de soja, kimchi y sumbala) y suplementos alimenticios (vitaminas, aminoácidos, ácido fólico y probióticos),
- en la fabricación de productos farmacéuticos como antibióticos, hormonas, fármacos biológicos, vacunas, sistemas de diagnóstico y monitorización, y en productos para el cuidado personal,
- en la protección y promoción del crecimiento de las plantas de cultivo,
- en fermentaciones para la producción de diversos compuestos químicos y biomateriales (bioplásticos, celulosa bacteriana),
- en la química verde, como la electrosíntesis y el uso del dióxido de carbono de efecto invernadero como material para la síntesis química,
- para la producción de energía (biogás, celdas de combustible microbiano),
- en la recuperación de los recursos naturales (por ejemplo, la recuperación de metales por biolixiviación, que está reemplazando procesos altamente contaminantes),
- para el tratamiento de residuos y biorremediación de sitios contaminados,
- en la biolimpieza, biorestauración y biopreservación de objetos históricos del patrimonio cultural como monumentos, estatuas, frescos, pinturas y documentos.

Además, hay una amplia gama de nuevas aplicaciones en desarrollo que incluyen terapias microbianas para enfermedades causadas por la *disbiosis* de la microbiota (por ejemplo, colitis pseudomembranosa, enfermedad inflamatoria intestinal, obesidad, diabetes y diversas afecciones psicológicas (Rossen *et al.*, 2015)), la reprogramación por biología sintética de microorganismos biotecnológicamente relevantes para alcanzar un alto nivel de producción o actividad, y la bioingeniería a nivel de ecosistemas, entre otras. La sorprendente versatilidad metabólica de los microorganismos crea constantemente nuevas oportunidades para la producción sostenible de productos químicos y materiales especializados a gran escala (Lee *et al.*, 2019).

La habilidad de reconocer nuevas actividades microbiológicas de manera oportuna, para evaluar con precisión sus beneficios y los posibles riesgos, y para tomar decisiones basadas en evidencia sobre las acciones necesarias para facilitar su explotación, es esencial para que las economías biocéntricas basadas en el conocimiento sean competitivas y puedan avanzar hacia prácticas sostenibles. Es absolutamente necesario que estas tengan un conocimiento adecuado de la microbiología subyacente en todos los niveles de la cadena de decisión, desde el público general hasta las partes interesadas.

Las decisiones políticas basadas en el conocimiento de los procesos microbiológicos fundamentales serán la base del progreso futuro, el bienestar, el logro de la sostenibilidad y el avance de la civilización. La rapidez con la que alcancemos este futuro depende en gran medida del grado de nuestro compromiso con

- *explorar sin prejuicios los procesos microbiológicos y, por lo tanto, evolucionar continuamente nuestra capacidad de predecir e identificar posibles aplicaciones comerciales novedosas basadas en los microorganismos^[1]*
- *aprovechar adecuadamente las nuevas aplicaciones para mejorar la salud humana y planetaria,*
- *ampliar y mejorar las aplicaciones actuales, y*
- *diseñar sistemas apropiados de decisiones y asignación de recursos basadas en la evidencia que incentiven y faciliten las actividades de investigación, desarrollo y comercialización, e incorporen adecuadamente las preferencias relevantes de los grupos de interés.*

Los microorganismos nos afectan de forma profunda y prevalente a nivel personal y colectivo.

Los microorganismos pueden impactar en nuestras vidas de muchas maneras y por lo tanto, son relevantes en muchas decisiones personales que tomamos, como por ejemplo: si decidimos dar a luz por cesárea (aséptica) o por parto natural (colonización del recién nacido por microorganismos maternos (Wampach *et al.*, 2018)), alimentar a los bebés por lactancia materna (que proporciona al recién nacido anticuerpos protectores contra patógenos y oligosacáridos que favorecen a las bifidobacterias que orquestan el desarrollo saludable de los sistemas inmunológicos (Gómez de Agüero, 2016; Moossavi *et al.*, 2018)), usar con frecuencia desinfectantes potentes para limpiar la casa (reduce la exposición de los niños pequeños a la diversificación de microorganismos y sus beneficios para la salud (Finlay y Arrieta, 2016; Gilbert y Yee, 2016; Bach, 2018; Sharma y Gilbert, 2018)); o incluso en hospitales (Caselli, 2017), vacunarse o recibir tratamiento para una infección (Lane *et al.*, 2018), usar productos de limpieza para el hogar que contengan fósforo (pueden contribuir a la eutrofización y la proliferación de algas nocivas en aguas locales (Richards *et al.*, 2015)), usar jabones germicidas (pueden causar disbiosis de la microbiota de la piel (Gilbert y Yee, 2016)), adoptar un perro como mascota (facilita los intercambios de microbiota (Trinh *et al.*, 2018)), o los alimentos que ingerimos (por ejemplo, la carne de vacuno o porcino, que tiene una huella sustancial de metano; los productos lácteos y carnes rojas cuyo consumo está correlacionado con algunos tipos de cáncer (zur Hausen *et al.*, 2017)); otras carnes y verduras: procedencia, vida útil, asociación con factores de riesgo conocidos, etc.) y cómo almacenar y preparar los alimentos, cuánto ventilar, humidificar o deshumidificar nuestros hogares, etc.

^[1] Los nuevos descubrimientos son el resultado de la investigación. La investigación está, sin embargo, organizada en grupos de disciplinas relacionadas, que en cierta medida actúan como impedimentos para los descubrimientos de naturaleza transdisciplinaria. Es importante destacar que muchos de los cambios necesarios para la protección del medio ambiente, la salud humana y la seguridad alimentaria requieren una planificación e implementación de investigación transdisciplinaria. Debido a que la microbiología es tan amplia en su naturaleza y aplicaciones, y sus impactos en la vida y el planeta son tan prevalentes, la alfabetización en microbiología haría a los investigadores intrínsecamente más interdisciplinarios. Sin duda, esto aceleraría el desarrollo de soluciones innovadoras y opciones de gestión para muchos de los problemas críticos ambientales y de salud que enfrentamos actualmente.

Esto se puede ejemplificar considerando una actividad que realizamos con placer (vacaciones y tiempo libre) que nos puede exponer a diversas infecciones y enfermedades causadas por microorganismos, algunas de ellas peligrosas y que están ausentes o son menos frecuentes en nuestros hogares, a través de:

- *bañarse*, en agua dulce y salada (por ejemplo, *Cryptosporidium*, *Vibrio vulnificus*, *Leptospira*, etc.) y en piscinas no cloradas adecuadamente y especialmente jacuzzis (por ejemplo, *Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Legionella*, *Candida*, *Trichophyton*, *Giardia*, etc.),
- *comer*, alimentos crudos o contaminados, especialmente mariscos (por ejemplo, *Salmonella*, *Vibrio*, *EHEC*, *Campylobacter*, *Listeria*, *Norovirus*, virus de la hepatitis y diversos parásitos), e incluso alimentos adecuadamente cocidos que contienen toxinas termoestables (incluida la neurotoxina letal de mareas rojas y varias micotoxinas),
- *beber*, líquidos contaminados (por ejemplo, agua, jugos de frutas, etc.),
- *actividad sexual*, con nuevas parejas (por ejemplo, ETS clásicas, pero también VIH, etc.),
- *la selección del destino de vacaciones*, donde los agentes infecciosos como la fiebre amarilla, la malaria, el virus Zika, el virus de la hepatitis, el virus del dengue, la enfermedad de Lyme y la tuberculosis, pueden ser endémicos, y
- *la selección del lugar de alojamiento*, incluidos los cruceros (por ejemplo, *Cyclospora*, *Norovirus*, *Legionella* y micobacterias).

Por supuesto, los viajes de negocios nos pueden exponer a peligros similares, y el turismo médico puede conllevar riesgos adicionales asociados con la cirugía y el hospital.

Las actividades microbiológicas también influyen en las organizaciones colectivas, y su consideración es esencial para muchas decisiones estratégicas y políticas, como la introducción de una nueva materia prima, la producción de un nuevo residuo en una industria, la introducción de un nuevo ingrediente en un producto alimenticio, el establecimiento de una nueva cadena de suministro de alimentos, la introducción de una nueva medida de salud pública, la implementación de nuevas prácticas agrícolas o la introducción de nuevas medidas para proteger nuestros sistemas marinos de la degradación.

Si vamos a tomar decisiones efectivas, ya sea a nivel personal o político, que tengan una alta probabilidad de tener resultados predecibles y esperados, debemos saber qué actividades microbiológicas son relevantes y cómo estas actividades podrían impactar y ser afectadas por su implementación. Las decisiones de rutina en nuestras vidas deben estar informadas por un entendimiento básico de

- *qué consecuencias adversas pueden resultar de nuestras acciones, y*
- *cómo podemos modificar nuestro comportamiento para evitar o mitigar tales consecuencias para nosotros y para los demás.*

Los microorganismos afectan de forma prevalente y profunda a toda la biosfera.

Los microorganismos fueron las primeras formas de vida, se originaron hace casi 4 mil millones de años y son el futuro: continuarán habitando el planeta Tierra

mucho después de que los humanos y otras formas de vida hayan desaparecido. El mundo invisible de los microorganismos representa una diversidad evolutiva y metabólica mucho mayor que la de los organismos visibles que conocemos. En términos de biomasa, el 90% de la vida en los océanos es microbiológica. Las algas fotosintéticas y las cianobacterias forman un componente importante del plancton marino y son la base de las redes alimenticias oceánicas. *Prochlorococcus* y *Synechococcus* remueven alrededor de 10 mil millones de toneladas de carbono del aire por año, lo que corresponde a aproximadamente dos tercios de la fijación total de carbono en los océanos. Los microorganismos regulan los procesos biogeoquímicos globales y locales que influyen fundamentalmente en las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, afectan el cambio climático y regulan la salud de los humanos, los animales, las plantas, el suelo y el abastecimiento de agua. Generan el 50% del oxígeno que respiramos. Los primeros microorganismos produjeron el oxígeno que permitió que todos los organismos aerobios evolucionaran, así como la capa de ozono que permitió que la vida se moviera de los profundos océanos a la tierra. Son los recicladores de desechos y regeneradores supremos del planeta. Los microorganismos son omnipresentes y sus actividades sostienen e influyen en la calidad de vida del planeta. *Son el sistema de soporte vital de la biosfera*. Aunque nosotros los humanos nos consideramos los guardianes de la salud planetaria, los microorganismos son agentes cuya influencia, regulación y capacidad de cambio son los más poderosos a nivel planetario. *In extremis*: si un conjunto de microorganismos que realizan un proceso crítico en el ciclo de los nutrientes se perdiera en la biosfera y no pudiera ser reemplazada por otro conjunto funcionalmente equivalente, la vida en la Tierra como la conocemos dejaría de existir^[2]. El microbioma ambiental global es, en términos de actividades y dimensiones, el único aliado con el que podemos contar para revertir el impacto de las emisiones contaminantes producto de las actividades industriales, la agricultura intensiva y la sobrepoblación humana (de Lorenzo *et al.*, 2016).

Es esencial que reconozcamos colectivamente el papel fundamental que desempeñan los microorganismos en los procesos planetarios y la salud, y adquiramos conocimiento de lo que pueden y no pueden hacer los microorganismos, para que podamos desarrollar alianzas y estrategias efectivas para la administración conjunta de la salud de nuestro planeta. Es imperativo que nosotros

- *comprendamos y apreciemos el delicado equilibrio que existe entre los ciclos de nutrientes mediados por microorganismos, la función planetaria y la salud de la biosfera, y*
- *nos aseguremos de que no (incluso sin intención) impactemos*

^[2] Aunque a primera vista, esta noción (especialmente en combinación con la declaración, *todos los microorganismos están en todas partes*) puede parecer bastante inverosímil, vale la pena considerar lo siguiente: cambios en las condiciones ambientales del hábitat, por ejemplo, a través del calentamiento global, pueden hacerlos desfavorables para sus habitantes. Las consecuencias son que los habitantes deben (1) migrar a hábitats más favorables, (2) adaptar o evolucionar nuevas propiedades que estén más acorde con las nuevas condiciones ambientales, o (3) morir, y si están restringidas geográficamente, tal vez se extingan. La evolución se efectúa más fácilmente por los organismos que se reproducen rápidamente. Pero los microorganismos en una serie de hábitats de la biosfera se reproducen de manera extremadamente lenta. Si los cambios ocurren rápidamente, es posible que puedan extinguirse. Si alguno pertenece a un conjunto que media en una función crítica de la biosfera, podría tener consecuencias graves. Curtis (2006) ha expresado esto de manera clara: "... si la última ballena azul se atragantara con el último panda y muriera, sería desastroso, pero no el fin del mundo. Pero si envenenamos accidentalmente las dos últimas especies de bacterias oxidantes de amonio, eso sería otra cuestión. Podría estar ocurriendo ahora y ni siquiera lo sabríamos ... "

adversamente a las cohortes o comunidades microbiológicas que juegan un papel crucial en el funcionamiento de la biosfera.

El aprovechamiento de las actividades microbiológicas es crucial para resolver algunos Grandes Retos y alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Actualmente, la humanidad se enfrenta a un conjunto de *Grandes Retos* que incluyen la desigualdad en el acceso a los alimentos, al agua potable, a la salud, a la educación, a la energía y a las materias primas, a la pobreza persistente, a la pérdida de tierras habitadas por el aumento del nivel del mar que a su vez está causado por el calentamiento global y a la desertificación. En los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS; Naciones Unidas, 2015) se detallan las necesidades de la humanidad y del planeta Tierra, y un plan de acción para satisfacer estas necesidades de manera sostenible. Un número reciente de la revista *Microbial Biotechnology* (2017) exploró el alcance de las tecnologías microbianas que tienen el potencial para contribuir al logro de los ODS, que incluyen aquellas que puedan aliviar los problemas del suministro de alimentos para una población mundial en continuo crecimiento (Trivedi *et al.*, 2017; García *et al.*, 2017), de la producción de gases de efecto invernadero, del calentamiento global y de algunas de sus consecuencias negativas, y de la contaminación global, maximizando la explotación de las energías renovables y la sostenibilidad en el consumo mundial de recursos naturales, etc. (Verstraete y de Vrieze, 2017; de Lorenzo, 2017). Esta publicación también abordó el potencial excepcional de la biotecnología microbiológica para contribuir a otro ODS llamado *crecimiento económico sostenible y creación de empleo*, relacionado con la creación de nuevas empresas, empleo y riqueza, en parte en el contexto de la bioeconomía, pero también en otros contextos (Timmis *et al.*, 2017). Una serie de editoriales de la misma revista, bajo el título general de *El microbioma como fuente de nuevas empresas y creación de empleo*, en 2017 y 2018, exploró el potencial de los estudios sobre los microbiomas para generar nuevas empresas y oportunidades de empleo.

Muchas de las acciones que deben implementarse en el futuro para enfrentar los Grandes Desafíos y lograr los ODS implicarán procesos microbiológicos. Las principales decisiones políticas necesarias para poner en marcha estas acciones, mantenerlas y aumentar sus contribuciones requieren el conocimiento de las actividades microbiológicas relevantes y en cómo éstas pueden canalizarse para obtener su un máximo beneficio.

Las decisiones basadas en el conocimiento de los procesos microbiológicos fundamentales podrían evitar grandes desastres, en algunos casos, globales.

Los microorganismos son actores centrales y grupos de interés clave en la evolución biológica y planetaria. La ausencia del debido reconocimiento, conocimiento y consideración de las contribuciones microbianas en procesos relevantes, y una planificación que no toma en cuenta los roles que los microorganismos pueden desempeñar en cualquier cambio previsto, provoca que se desarrollen y apliquen políticas en todos los niveles (internacionales, nacionales,

regionales e individuales) cargadas de riesgo, subóptimas o ineficaces y, en el peor de los casos, contraproducentes. Algunos ejemplos de desastres potencialmente prevenibles, que tienen un impacto negativo y han sido causados por decisiones políticas o falta de decisiones políticas, son:

La crisis de resistencia a los antibióticos.

Ya en la década de 1960 y a principios de la década de 1970, importantes microbiólogos como Falkow (Falkow *et al.*, 1961; Falkow, 1970, 1975), Watanabe (Watanabe, 1963; 1966) y Levy (Levy *et al.*, 1976; Levy, 1982), advirtieron de la creciente aparición y diseminación de la resistencia a los antibióticos debido a su prescripción excesiva y a su uso no clínico. De hecho, Alexander Fleming, el descubridor de la penicilina, ya había advertido de este peligro en su Conferencia Nobel en 1945 ([https:// www.nobelprize.org/uploads/2018/06/fleming-lecture.pdf](https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/fleming-lecture.pdf)). Desde entonces, se han emitido repetidas advertencias, algunas relacionadas con el uso de antibióticos en la acuicultura (Cabello, 2006), pero con poco éxito. Hoy en día, consideramos que la resistencia a los antibióticos es uno de los desafíos más importantes de la medicina, ya que provoca que infecciones potencialmente mortales previamente curadas con antibióticos, dejen de ser tratables (http://www.wpro.who.int/entity/drug_resistance/resources/global_action_plan_eng.pdf). En el informe internacional *Abordar las infecciones resistentes a los medicamentos en todo el mundo: informe final y recomendaciones*, (https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf) se proyecta que el riesgo que representará la resistencia a los antibióticos en el 2050, tendrá un costo acumulado de \$100 trillones y causará 10 millones de muertes por año que pueden ser prevenidas. Curiosamente, la primera de las cuatro recomendaciones es la necesidad de una *campaña de sensibilización pública mundial* dirigida a niños y adolescentes en particular. A pesar de que la campaña tuvo un costo de \$40-100 millones por año, las recomendaciones no incluían la educación básica. A pesar de esto, se prevé que el uso no clínico de antibióticos en la cría de animales y la acuicultura aumente en un 67% durante el período 2010-2030 (https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf). Si las autoridades sanitarias, los políticos y los líderes empresariales (y, sobre todo, el público en general) hubieran sido conscientes de la capacidad de los microorganismos para evolucionar rápidamente y adquirir nuevas funciones en respuesta a los cambios en su entorno (en este caso, la introducción masiva de compuestos antimicrobianos) hubieran sido capaces de valorar las advertencias de Falkow y otros científicos, con lo cual probablemente estaríamos en una situación muy distinta.

El retorno de enfermedades infantiles prácticamente erradicadas.

El resurgimiento del sarampión, la tos ferina y la difteria debido a una reducción en la aceptación y cobertura de la vacunación, que refleja una falta fundamental de comprensión del beneficio asociado a las vacunas. Las elecciones personales no basadas en evidencias científicas se podrían haber evitado en países que prácticamente habían erradicado estas enfermedades (Lane *et al.*, 2018).

El aumento de las alergias.

Si bien es necesario combatir las infecciones infantiles serias, se cree que las infecciones leves y una exposición habitual a microorganismos ambientales facilita el desarrollo de un sistema inmunológico saludable en los niños (Bach, 2018). El aumento de la microfobia (germofobia) y de las campañas publicitarias que crean percepciones de que todos los microorganismos son malos y deben eliminarse para

lograr un entorno doméstico seguro, pueden haber contribuido significativamente a la actual explosión de disfunciones inmunitarias en nuestra sociedad (por ejemplo, alergias, asma, eczema, e incluso trastornos neurológicos). De hecho, recientemente se ha demostrado que el efecto protector de la microbiota de la piel contra el cáncer de piel se reduce por el uso de jabones germicidas agresivos (Nakatsuji *et al.*, 2018). Tales consecuencias podrían haberse aliviado si se hubieran tomado las medidas adecuadas para brindar una educación sobre la necesidad de equilibrar las prácticas higiénicas que reducen la carga de patógenos con estrategias para mantener una microbiota saludable que nos brinde beneficios ecofisiológicos clave, incluyendo la educación efectiva del sistema inmunitario, a través de la exposición a microorganismos de suelos, animales y plantas (Finlay y Arrieta, 2016; Gilbert *et al.*, 2017).

La crisis de los gases de efecto invernadero.

Los microorganismos producen y consumen gases de efecto invernadero (Caviccioli *et al.*, 2019) por lo que los esfuerzos para reducir las emisiones microbianas, por un lado, y para aumentar su consumo, por el otro lado, son cruciales. Cuando se considera la participación microbiana, es fundamental comprender los aspectos cuantitativos y el hecho de que los procesos pueden no ser lineales. La fijación del CO₂ por parte de los microorganismos y las plantas es lenta en comparación con la liberación debida al empleo de los combustibles fósiles por parte de los seres humanos - el ciclo normal está fuera de equilibrio - por lo que los niveles de CO₂ están aumentando rápidamente: nuestras plantas y amigos microbianos no pueden mantener el ritmo de las actividades humanas. Las emisiones de gases de efecto invernadero provocan el calentamiento global, que a su vez provoca el deshielo de los suelos de permafrost lo que causa un aumento en la producción microbiana de metano y de CO₂ que amplifica y exacerba las consecuencias del consumo de los combustibles fósiles.

La producción de carne animal, especialmente de rumiantes, se acompaña de emisiones sustanciales del gas de efecto invernadero, el metano (CH₄), un hecho que se conoce desde hace mucho tiempo. Para la producción de carne se necesita producir forraje, que a su vez está vinculado al uso de fertilizantes nitrogenados. La urea, que los microorganismos del suelo descomponen en amoníaco y en CO₂, tiene una larga historia en su uso generalizado como fertilizante nitrogenado en la agricultura (aunque actualmente se está eliminando). Otros fertilizantes nitrogenados conducen a la producción microbiana de otro gas de efecto invernadero extremadamente potente, el óxido nitroso (N₂O), y por supuesto, a la eutrofización: la proliferación de algas nocivas inducida por nutrientes en las vías fluviales o cuerpos de agua adyacentes, donde pueden causar la muerte de los peces por hipoxia. Claramente, las decisiones personales y políticas importantes deben realizarse tomando en cuenta la cantidad de carne producida y consumida, que sobrepasan las necesidades dietéticas esenciales.

La deriva de nutrientes hacia aguas costeras produce un rápido consumo de oxígeno por parte de la microbiota residente, lo que a su vez contribuye a la disminución del O₂. Al identificar las nueve fronteras planetarias para un futuro sostenible (en las que se incluye el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y el agotamiento del ozono), el ciclo del nitrógeno se considera como el límite más afectado debido a que la aplicación de fertilizantes hechos por el hombre supera ahora a todos los procesos naturales que proporcionan este nutriente vital a la biosfera (Rockström *et al.*, 2009). Actualmente existe un debate en muchos países sobre la restricción del uso de estos fertilizantes, pero la necesidad de alimentar a la

creciente población mundial y producir alimentos a un precio asequible para los miembros más pobres de la sociedad, objetivos distanciados del negocio de la agricultura y sus cadenas de suministro, frustran esta reflexión. Parece lógico que se aliente a los agricultores a liderar la toma de decisiones y la formulación de políticas sólidas, ya que, ellos entienden mejor que nadie la relación entre las enmiendas de nitrógeno del suelo y la productividad de los cultivos. Sin embargo, la participación microbiana en las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con los fertilizantes nitrogenados, rara vez es un elemento importante del proceso de decisión y debate personal y político, que es donde debería de estar presente para que estas discusiones fuesen significativas y efectivas. De manera más general, las decisiones políticas recientes que limitan las emisiones de gases de efecto invernadero se ocupan principalmente de las emisiones antropogénicas y, en esencia, ignoran el hecho de que los microorganismos participan de manera importante tanto en la producción como en el consumo de cantidades significativas de gases de efecto invernadero, incluidos el N_2O y el CH_4 , además del CO_2 . En cualquier caso, todos estamos afectados de diversas maneras por el calentamiento global y, por lo tanto, somos grupos de interés clave. Por ejemplo, el calentamiento global cambia la distribución global de patógenos y sus vectores, y por lo tanto conlleva a la aparición de enfermedades en poblaciones nuevas e inmunológicamente susceptibles de humanos, animales y plantas, con posibilidad de propagación epidémica.

La crisis del suelo.

El suelo es la piel esencial de la tierra: sustenta el crecimiento de las plantas y alberga una increíble diversidad de animales y microorganismos, los cuales median una increíble variedad de procesos biogeoquímicos que caracterizan las funciones del suelo y determinan su salud. El suelo filtra las aguas superficiales que percolan hacia los acuíferos que proporcionan agua potable a miles de millones de personas. El suelo contiene importantes nutrientes y tres veces la cantidad de carbono que contiene la atmósfera del planeta. Sin embargo, este suelo se está erosionando rápidamente, a menudo terminando en arroyos, ríos y océanos y liberando sus nutrientes en el camino. La mayoría de los países están perdiendo la capa superficial del suelo mucho más rápidamente de lo que los procesos generadores de suelo (erosión de las rocas) la producen. Los eventos climáticos cada vez más extremos están elevando esta tasa de erosión. Los microorganismos del suelo producen polisacáridos que actúan como *pegamento* para dar estructura y estabilidad al suelo, y por lo tanto aumentan su resistencia a la erosión. La desastrosa pérdida de suelo en gran parte de terrenos agrícolas de la Tierra, que se prevé que ocurra antes de finales del siglo XXI, provocará la incapacidad de producir los alimentos necesarios para alimentar a la población mundial, la liberación de grandes cantidades de nutrientes que contaminarán nuestras aguas y liberará carbono que a su vez aumentará el calentamiento global. Si se quiere evitar esta crisis, es absolutamente imperativo que las estrategias provenientes de las instituciones políticas estén basadas en el conocimiento para así aprovechar mejor las actividades microbianas, las cuales mejoran la estabilidad del suelo. Para garantizar que esto suceda, es igualmente imperativo que los ciudadanos del mundo, como actores principales, aprecien la gravedad del problema y las opciones microbianas disponibles. Pero, para esto, lograr la *alfabetización en microbiología* es esencial.

La acumulación de contaminantes en el medio ambiente y redes alimentarias.

No basta con saber que los microorganismos participan en un proceso ambiental, es esencial saber qué cosas hacen bien y qué cosas hacen con menos eficiencia. Históricamente, ha sido conveniente suponer que la conocida versatilidad metabólica de los microorganismos se ocuparía de todos los materiales contaminantes liberados por la industria, los hogares, los hospitales, etc., sin considerar la posibilidad de que podían existir limitaciones. Sin embargo, aunque los microorganismos pueden degradar una increíble variedad de materiales orgánicos, el metabolismo de algunos es lento, a veces muy lento. Por lo tanto, si la producción y liberación de estos compuestos al medio ambiente es más rápida que la capacidad de los microorganismos para degradarlos, dichos materiales se acumulan y contaminan, como lo demuestra el hallazgo de productos químicos tóxicos de larga duración, como los PCB y las dioxinas en la red alimentaria actual, y del desastre actual de la contaminación por los plásticos de origen petroquímico.

Una variedad de problemas serios que enfrentamos actualmente, incluida la propagación de la resistencia a antibióticos de último recurso en patógenos, la erosión del suelo, el problema de los plásticos en los océanos con su impacto en la salud de la vida silvestre, la formación y la acumulación de microplásticos en la red alimentaria, fue predecible en gran medida y evitable si,

- *los responsables de la formulación de políticas hubiesen podido comprender las consecuencias probables de sus decisiones sobre los procesos microbianos y las implicaciones a largo plazo, y*
- *se hubiera facultado a un mayor espectro de actores de la sociedad para apreciar los riesgos de las políticas y los comportamientos contemporáneos*

El exposoma y el particular problema de la exposición crónica de largo plazo a bajos niveles de sustancias biológicamente activas.

Uno de los *Grandes Desafíos* que es particularmente relevante para el tema de la *alfabetización en microbiología* es la contaminación biológica y química de la biosfera, ya que las decisiones humanas han sido el problema en ambos casos: estas pueden conducir a políticas que provocan contaminación, al igual que pueden ser la clave para su solución, ya que se pueden crear políticas que mitiguen la contaminación (*reducir, remediar, reciclar*). La contaminación biológica, especialmente la contaminación fecal asociada con grandes urbes, aunque controlada en gran medida en países de altos ingresos, en ocasiones presenta problemas debido a fallos técnicos o fenómenos meteorológicos extremos, y aun así puede ser por sí sola problemática en países de bajos ingresos per cápita. Además, la cría de animales para la producción de carne industrializada está agregando una dimensión adicional a través de la generación de desechos animales a gran escala que incluyen enormes volúmenes de materia fecal, los cuales contienen microorganismos resistentes a los antibióticos, incluyendo patógenos. Si bien algunos de estos desechos se vuelven inofensivos en los digestores anaeróbicos, otros permanecen en el ambiente donde pueden constituir un peligro.

Aunque la toxicidad y los ciclos de vida de los nuevos productos químicos y farmacéuticos generalmente se evalúan antes de su entrada en circulación al mercado, en su mayoría proporcionan información sobre la toxicidad aguda detectable durante períodos cortos de tiempo, principalmente en modelos estándar que guardan poca relación con los riesgos inherentes que estos productos puedan poseer. La evaluación de la toxicidad aguda para los organismos más directamente

afectados y la toxicidad crónica de bajo nivel que se manifiesta a largo plazo es extremadamente difícil de realizar. Muchos productos químicos biológicamente activos, en particular los productos farmacéuticos presentes en residuos de la fabricación y aguas residuales de hospitales y hogares, son activos en concentraciones muy bajas, y algunos de ellos pasan sin ser tratados a través de las instalaciones de tratamiento de agua residual hasta el medio ambiente. A esto se añade el hecho de que algunos microorganismos ambientales pueden degradar parcialmente algunos productos químicos a nuevos metabolitos que no se determinan en las evaluaciones de impacto ambiental, los cuales pueden ser tóxicos de formas diferentes a los productos químicos originales y pueden ser incluso más tóxicos en comparación a los que entran inicialmente en el ambiente. La exposición crónica a bajos niveles de tales productos químicos y metabolitos puede tener consecuencias negativas en la población. Algunos compuestos ampliamente distribuidos en el medio ambiente incluyen xenoestrógenos - disruptores endocrinos (Monnertet, 2017) - que se consideran responsables, al menos en parte, de la disminución de los niveles de fertilidad en humanos y otros animales, al igual que insecticidas responsables de la disminución de la cantidad de polinizadores, como las abejas (Godfray *et al.*, 2015; Christen *et al.*, 2018).

Otro problema, aún más preocupante, es que los diversos productos químicos contaminantes se mezclan en el ambiente y el impacto de las mezclas, especialmente la exposición crónica a bajas concentraciones, sobre la salud de los seres humanos y del medio ambiente es esencialmente desconocido, pero sin duda significativo. Los microorganismos tienen, o pueden evolucionar para adquirir la capacidad de degradar muchos de estos compuestos y, a menudo, serán los principales agentes de su eliminación del medio ambiente. Sin embargo, es posible que no puedan degradar otros compuestos presentes, al menos en cantidades significativas, especialmente cuando están presentes en concentraciones muy bajas y más aún cuando están presentes en mezclas complejas.

En resumen, a pesar de la complejidad de la contaminación biológica y química, y la capacidad microbiana igualmente compleja de hacer que los contaminantes sean inocuos, la única forma de reducir la contaminación existente será mejorar nuestra comprensión de los procesos microbianos relevantes y explotarlos. Para los nuevos productos químicos, incluidos los producidos mediante biología sintética, se debe hacer un diseño responsable que incluya la definición de puntos finales para terminar sus ciclos de vida. Sin embargo, cabe recalcar: independientemente de las limitaciones que pueda tener el mundo microbiano, este sigue siendo el único agente con el que podemos contar para contrarrestar la excepcional carga de contaminación que pesa sobre el planeta (de Lorenzo *et al.*, 2016).

Es esencial que las capacidades y limitaciones de degradación microbiana sean apreciadas, comprendidas y se conviertan en puntos centrales para el desarrollo de políticas de control y mitigación que, en última instancia, regirán nuestro nivel de exposición a contaminantes ambientales. Se necesitan políticas concertadas, coherentes y sostenibles (de manera global) para:

- *estandarizar la identificación, evaluación y monitorización de los tipos y niveles de sustancias bioactivas y sus mezclas, en nuestro entorno, a nivel local, regional y global,*
- *mejorar nuestra comprensión de cómo estas sustancias impactan en la salud planetaria, comunitaria e individual,*
- *coordinar los esfuerzos para eliminarlos del medio ambiente, mitigar sus efectos tóxicos, reducir su entrada y su migración a través de la red alimentaria, y*
- *Desarrollar medidas para reducir nuestro nivel de exposición a tales contaminantes.*

Conectividad global y reacciones microbianas al cambio.

Por último, pero no menos importante, hay que destacar dos características claves de nuestro planeta. La primera es la conectividad: toda la superficie planetaria y la atmósfera están conectadas por el agua, el viento y las cadenas de suministro mecánicas de productos humanos, que mueven gran parte de lo que está en la superficie y en la atmósfera a través de vehículos de transporte terrestre, marítimo y aéreo, a veces hasta miles de kilómetros. Una consecuencia ampliamente reconocida de esta *conectividad física* es el transporte de desechos plásticos a todas las partes de los océanos, lejos de los sitios donde se desechan, y el hallazgo de bifenilos policlorados (PCB) tóxicos en animales polares, muy alejados de sus sitios de producción y uso. Por lo tanto, aunque podamos creer que los peligros potenciales de un producto químico en sus instalaciones de producción se manejan de manera segura, los mecanismos de conectividad y distribución pueden conducir a problemas distantes. También los agentes biológicos contribuyen a la conectividad y el movimiento en la biosfera; mediante el movimiento activo y pasivo, ya sea por el vuelo, en el caso de los insectos voladores, las aves y los humanos que viajan en aviones, el caso de los organismos acuáticos que nadan y flotan, las semillas suspendidas en el aire y el agua, el polen y el plancton. La propagación global explosiva del síndrome respiratorio agudo severo (SARS) en 2003, la epidemia anual de gripe originada en Asia, el brote de *E. coli* enterohemorrágica en Alemania transmitido por verduras orgánicas importadas de Egipto, la expansión de enfermedades debido al aumento de la inmigración, como el aumento de la tuberculosis en países africanos como Marruecos y virus africanos transmitidos por garrapatas en España, son ejemplos de las consecuencias de la *conectividad biológica*. El comercio internacional también desempeña un papel importante en la propagación de patógenos y puede ser responsable de la propagación geográfica actual de diversas enfermedades de las plantas causadas por *Xylella fastidiosa*, uno de los patógenos de plantas más graves del mundo, con un enorme impacto económico para la agricultura, los jardines públicos y el ambiente. A diferencia de muchos patógenos transmitidos por vectores, que tienen relaciones específicas vector-hospedador y, por lo tanto, un rango restringido de hospedadores, *X. fastidiosa* se transmite por un amplio rango de vectores que se

alimentan de savia, y por lo tanto infecta a un amplio rango de plantas. Las aguas de lastre en barcos que se recogen y descargan en diversos puntos del mundo pueden originar nuevas poblaciones de organismos no autóctonos, a veces peligrosos, como las especies de algas tóxicas, que generan problemas de bioseguridad. Finalmente, el polvo del desierto, rico en fósforo, hierro y microorganismos, que se transporta por corrientes de aire a lugares distantes: el polvo del desierto del Sáhara cae regularmente en Europa y fertiliza las aguas del Golfo de México y el Mar de los Sargazos, lo que permite la proliferación de algas.

Del mismo modo que la conectividad del agua y del aire media la distribución de productos químicos persistentes de vida larga, incluidos los materiales radiactivos, en la biosfera y la atmósfera, también aseguran la distribución de los minúsculos microorganismos. Sin embargo, a diferencia de los productos químicos, los microorganismos pueden reproducirse, colonizar de manera oportunista e impactar en cualquier sitio que encuentren favorable. La distribución global de los microorganismos está encasillada en el mantra: *todos los microorganismos están en todas partes*. Un razonamiento, quizás más significativo, podría ser este otro mantra: *si los microorganismos pueden beneficiarse al influir en un proceso en algún lugar, ellos estarán allí y ejercerán esta habilidad*.

Una segunda característica importante del planeta es el hecho de que los cambios, causados ya sea por eventos naturales o por acciones accidentales o deliberadas de los humanos, a menudo provocan una respuesta, a veces inesperada, que provoca una consecuencia que puede ser diferente de la esperada. Esto puede deberse a respuestas fisicoquímicas o, con frecuencia, biológicas, especialmente microbiológicas. Entonces, cuando decidimos que debemos emprender una acción de algún tipo, además de las consideraciones habituales de viabilidad, coste, logística, etc., debemos tener en cuenta que los microorganismos no son pasivos ante los cambios antropogénicos significativos, intencionales o no, del medio ambiente: responden activamente, y por lo tanto modifican positiva y negativamente las consecuencias de nuestras acciones. Siempre debemos plantear la pregunta: ¿las actividades microbianas están directa o indirectamente involucradas o afectadas por el proceso en discusión y, de ser así, ¿cuáles son sus posibles o probables respuestas a dicha acción? Desafortunadamente, aún no hemos aprendido cómo comunicarnos con los microorganismos, por lo que no podemos preguntarles qué harán cuando hagamos cambios. Por lo tanto, las predicciones basadas en la evidencia por medio de la monitorización, el modelado de cómo los microorganismos responden al cambio ambiental y la precaución son esenciales. Para eliminar el desgastado lema: *“piense globalmente, actúe localmente”*, podemos exhortar a las personas a *que actúen localmente, pero solo después de considerar debidamente el potencial de sus acciones de manera local, regional y global, que pueden llevar a consecuencias colaterales (incluidas las consecuencias no intuitivas que puede ser completamente diferente del tema en consideración)*.

La naturaleza interconectada de nuestro planeta requiere que, antes de actuar, debemos ser capaces de

- *evaluar los posibles efectos indirectos, el grado de impacto y las vías pertinentes, de acciones locales sobre actividades microbianas en regiones de proximidad variable, e inclusive a nivel mundial,*
- *mapear y modelar adecuadamente los escenarios de impacto, incluida la duración del efecto y las contramedidas, utilizando los métodos adecuados,*
- *considerar cuidadosamente las medidas alternativas cuando nosotros, basados en supuestos conservadores, carecemos de confianza en nuestras predicciones, y*
- *monitorizar, revisar y mejorar las políticas, al igual que empoderar a las entidades locales para prevenir la falta de coordinación o acciones deshonestas, que de manera involuntaria o de otra manera podrían causar efectos adversos.*

El problema

El problema es que el conocimiento de los microorganismos y sus actividades se concentra actualmente en un pequeño grupo de especialistas, los microbiólogos. Por supuesto, la sociedad siempre ha recurrido a especialistas para asesorar a los que toman decisiones, como, por ejemplo, los economistas para asesorar a los gobiernos sobre el coste de la implementación de nuevas políticas. El problema aquí es que las actividades microbianas son generalizadas y afectan directa e íntimamente a las decisiones cotidianas de todos en la sociedad, por lo que la opción de consultar oportunamente a los microbiólogos o la consulta del conocimiento microbiológico es en la mayoría de las situaciones impracticable o imposible, a pesar del acceso a la información relevante por medio de internet. Por lo tanto, tenemos, por un lado, microbiólogos que tienen poca influencia en las decisiones políticas a cualquier nivel, y en el otro, a responsables de las políticas y a los que toman decisiones que carecen de los conocimientos esenciales para tomar decisiones informadas. *¿Cómo abordaremos eficazmente las crisis que enfrentamos, si los responsables políticos y las partes interesadas no pueden entender ni evaluar las causas fundamentales de la crisis ni las posibles soluciones (Brüssow, 2017)?*

Si queremos evitar repetir los patrones de errores del pasado que han llevado a resultados catastróficos, similares al descrito anteriormente, la información esencial que sustenta la percepción correcta de los problemas, al igual que las elecciones apropiadas y las decisiones políticas óptimas, basadas en la evidencia, deben ser un componente integral de nuestra base de conocimiento individual y colectivo. Con el fin de evitar desencadenar eventos desastrosos y prevenibles en el futuro, se requiere que:

- *el conocimiento básico de los procesos y actividades microbianas, al igual que sus interacciones e interdependencias multidireccionales, deban convertirse en parte de la conciencia pública, al igual que*
- *el conocimiento intermedio de estos procesos debe formar parte del conjunto de habilidades en los responsables de la toma de decisiones pertinentes, y*
- *los sistemas de decisión deben exigir de manera más adecuada los criterios*

basados en la evidencia y la revisión de expertos.

Un camino hacia una solución: el logro de la alfabetización en microbiología de la sociedad

Los elementos clave de la microbiología deben formar parte de la educación básica.

Algunos miembros de la sociedad, como educadores, políticos, líderes de la industria, jefes de agencias nacionales e internacionales, etc., tienen una mayor necesidad de poseer conocimientos sobre microbiología porque sus decisiones tienen mayores impactos sociales que los de otros. Sin embargo, todos los individuos toman decisiones relevantes desde el punto de vista microbiológico y desarrollan todos los días prácticas pertinentes desde la perspectiva microbiológica. Además, todos somos partes interesadas en decisiones políticas importantes que afectan a nuestra salud y bienestar, y la de nuestro planeta. Para poder ejercer nuestros derechos de ciudadanos y cumplir con nuestras responsabilidades de informar de manera competente a los que toman las decisiones, ya sea como votantes o como miembros de grupos de interés, debemos alfabetizar en temas de microbiología. Por lo tanto, existe una necesidad crucial de *educar en microbiología* a todos los niveles de la sociedad: *la alfabetización en microbiología debe convertirse en una parte esencial del entrenamiento profesional de los adultos.*

Un repositorio de conocimiento común y una capacidad de evaluación crítica, adquiridos generalmente durante la educación infantil, se consideran esenciales para pasar a la edad adulta. Hasta ahora, el conocimiento de la lengua nativa, una lengua extranjera, historia, geografía, asuntos actuales, matemáticas, física, química y biología, etc., han sido considerados como materias esenciales de una educación equilibrada, es decir: el conocimiento de estas materias se considera un atributo esencial de la maduración, necesario para las responsabilidades asociadas a la familia y el empleo, de la obligación de procesar información nueva en la vida personal y profesional, y de la necesidad de tomar decisiones diarias productivas que nos guíen a través de las vueltas que da la vida. Sostenemos que el conocimiento y la comprensión de los microorganismos y sus actividades es tan esencial para la educación general como estas materias.

La microbiología debe convertirse en un elemento central del plan de estudios escolar para que los responsables de la toma de decisiones estén adecuadamente informados y para que todos los demás actores tengan un conocimiento básico de cómo la sociedad y sus acciones están íntimamente interconectadas y relacionadas con nuestro mundo microbiano. Como consecuencia, las partes interesadas de la sociedad se capacitarán para

- *tomar decisiones informadas para sí mismos para los demás*
- *evaluar críticamente los argumentos a favor y en contra de las alternativas de una decisión y, por lo tanto, entregar las preferencias informadas a quienes toman decisiones en su nombre, y*
- *ser capaz de responsabilizar a quienes no toman decisiones basadas en la evidencia científica.*

Un concepto y formato de enseñanza centrado en la experiencia personal para todos los grupos de edad, con énfasis en los Grandes Retos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Debido a que los microorganismos afectan nuestras vidas desde el primer día (de hecho, nos afectan mucho antes), la enseñanza debe comenzar desde el inicio de la educación primaria y ser un hilo común en todos los niveles educativos, para capacitar a los que toman las decisiones en todos los niveles y que así estos tomen decisiones informadas sobre las mejores prácticas, y proporcionar a jóvenes y adultos el conocimiento para comprender la base de tales decisiones. Las personas deben comprender la diferencia entre lo que es cierto, lo que es probable y lo que es desconocido. Los individuos deben poder evaluar riesgos y beneficios basados en la evidencia: evaluaciones de beneficios que les permitan tomar decisiones sobre acciones fundamentalmente beneficiosas, pero que conllevan cierto grado de riesgo, o interactuar de manera constructiva con agencias que toman tales decisiones en su nombre. Además, deben saber qué nuevo conocimiento se debe obtener para elaborar mejores políticas en el futuro, pero siempre basadas en la evidencia.

Concebimos planes de estudio de microbiología desarrollados para preescolar, la escuela primaria y la escuela secundaria, además de planes de estudio de microbiología para la capacitación de maestros en educación superior (Bergey, 1916; Savage y Jude, 2014; Scalas *et al.*, 2017; <https://enviroliteracy.org/environment-society/environmental-health/microorganisms/>; <http://www.actionbioscience.org/biodiversity/wassenaar.html>, <https://schaechter.asmblog.org/schaechter/2013/04/whose-planet-is-it-anyway-1.html>). También deben estar disponibles como un servicio de educación pública, de actualización para las personas con conocimientos de microbiología y permitir que aquellos que no recibieron instrucción en la escuela aprendan lo básico y se pongan al día con los nuevos avances. Si bien el desarrollo de estos planes de estudio será responsabilidad de los cuerpos docentes interesados, para facilitar su implementación proponemos una serie de temas -un marco de *alfabetización en microbiología (Educación en microbiología en la escuela y preescolar: un marco centrado en la experiencia del niño (Timmis *et al.*, en preparación))*- y un formato de enseñanza que incluye una pregunta inicial simple relacionada con la experiencia cotidiana, seguida de la presentación de los fundamentos de la microbiología en lenguaje simple, su relevancia para los *Grandes Desafíos* y los ODS, su relación con los procesos de la biogeosfera y la salud planetaria y, lo que es más importante, su consecuencia para la toma de decisiones, por ejemplo:

Papá: Realmente me gustaría comer una hamburguesa esta tarde, pero María me dijo ayer que las vacas contribuyen al calentamiento global: ¿es eso verdad? (*Gases de efecto invernadero, fuentes y sumideros, digestión en el rumen, emisiones de metano, calentamiento global, aumento del nivel del mar y condiciones climáticas extremas, cómo nos afectan, ODS-13: Combatir el cambio climático*);

Mamá: nos dijeron en clase que Juanito tiene sarampión: ¿por qué no estaba vacunado como yo? (*Eficacia de las vacunas, riesgos, correlaciones y causalidades: consideraciones de beneficios, inmunidad de grupo, beneficios colaterales de la inmunización, ODS-3: Asegurar vidas saludables*);

Mamá: siempre me dices que me lave las manos después de ir al baño, porque las heces son desagradables. Pero ¿qué pasa con ellas después de vaciar la cisterna? (*Tratamiento de aguas residuales, patógenos fecales, indicadores fecales como*

prueba de la carga de patógenos fecales y calidad del agua, ODS-6: *Saneamiento para todos*);

Profesora: ¿por qué las plantas no crecen en la oscuridad? (Las plantas y los microorganismos fotosintéticos capturan la energía solar y producen biomasa: la base de la red alimentaria; la fotosíntesis, los cloroplastos, las mitocondrias se originaron a partir de microorganismos primitivos; las plantas y los microorganismos fotosintéticos proporcionan alimentos para el mundo, energía, materias primas químicas renovables, no contaminantes, desarrollo sostenible, ODS 2: *acabar con el hambre*, 7: *garantizar el acceso a la energía sostenible*, 12: *garantizar patrones de producción sostenibles*).

Este enfoque tiene el mérito y la importancia para la sociedad de que los fundamentos de microbiología se hagan evidentes para los estudiantes desde el inicio de las lecciones.

Los objetivos de la colección de temas seleccionados son:

- *ayudar en el desarrollo de planes de estudio adecuados para diferentes niveles de edad, en sociedades diversas y en entornos culturales variados,*
- *poner de manifiesto los principales procesos y problemas planetarios-biosféricos-humanos impactados o sustentados en actividades microbianas eco-fisiológicas.*
- *informar cómo estas actividades afectan a nuestro bienestar y al de otros miembros de la biosfera,*
- *poner de manifiesto cómo las actividades microbianas están influenciadas por nuestras acciones y las consecuencias consiguientes,*
- *indicar cómo podemos dirigir o explotar actividades microbianas para beneficio personal, humano, planetario y contribuir al logro de los ODS.*
- *Proporcionar una perspectiva más amplia de nuestro hogar con respecto al mundo, y cómo estamos conectados microbiológicamente en la aldea global y con el resto de la biosfera.*

El marco de conocimiento de la *alfabetización en microbiología* inicialmente consistirá en un centenar de temas centrados en la experiencia y agrupados en las categorías de: Bienestar Humano, Planeta Tierra, Agua, Plantas, Animales, Nutrición-Alimentos-Bebidas y Biotecnología, que pronto estarán disponibles, *gratis* y en línea. Estos temas serán mejorados y mejorados con el tiempo.

Se debe enfatizar que, a pesar de la falta de visibilidad de los temas en discusión, los microorganismos, y la enseñanza de los temas microbiológicos pueden ser particularmente fascinantes para los estudiantes, ya que la microbiología es un campo experimental y los estudiantes pueden realizar experimentos impactantes en varios niveles educativos. Las sugerencias para experimentos relevantes y simples para cada categoría de los temas también estarán disponibles en línea. Además, hay muchos procesos microbianos interesantes llevados a cabo por las empresas (elaboración de cerveza, elaboración de queso, producción de pan, fermentaciones, etc.) y entidades de servicios públicos (plantas de tratamiento de residuos, laboratorios de diagnóstico, etc.) que pueden, dependiendo de lo que esté disponible localmente, ser experimentados de primera mano por medio de excursiones escolares. Una vez más, estará disponible en línea una lista ilustrativa de excursiones potenciales, con sugerencias organizativas para maestros sobre cómo organizar la experiencia para obtener el máximo conocimiento, interés y disfrute para los estudiantes.

Los temas presentados en este marco de conocimiento no son exhaustivos en su alcance ni están estructurados de una manera fija, permitiendo que sean tratados en su totalidad por una audiencia de cualquier grupo de edad. Excepto para algunos temas introductorios, la mayoría será entendible de manera independiente y, por lo tanto, constituirá un sistema modular de opciones para seleccionarlos y complementarlos de acuerdo con las preferencias del maestro y los estilos y objetivos de aprendizaje de los estudiantes. Sin embargo, el objetivo general es que los niños se familiaricen con todos los temas a lo largo de sus carreras escolares.

Se debe enfatizar que no se pretende crear una *alfabetización en microbiología* para enseñar la disciplina de la microbiología y para crear profesionales en microbiología. Más bien, la intención es proporcionar una base de conocimientos adecuada de aquellas actividades microbiológicas centrales, precisamente para el empoderamiento de la sociedad y así lograr mejoras en la vida cotidiana, y el desarrollo de políticas basadas en la evidencia y la administración planetaria.

Es esencial que la sociedad se dé cuenta rápidamente que el prejuicio generalizado de que los microorganismos son nuestros enemigos no solo es incorrecto, sino que genera prácticas de comportamiento peligrosas. Los microorganismos son como los humanos: la mayoría tiene poca o ninguna influencia directa en nuestras vidas, muchos son altamente beneficiosos y solo unos pocos son peligrosos para nosotros. Y como sucede con los humanos, son los malos, los que causan enfermedades o el deterioro material, los que más aparecen en la prensa y sobre los que más sabemos. Sin embargo, es crucial que los microorganismos en su conjunto sean representados como nuestros amigos, ya que no solo nos ayudan silenciosamente en nuestras vidas, sino que también pueden ser llamados a resolver problemas importantes, como el aumento del rendimiento de la producción de alimentos, y especialmente porque el 50 % microbiano de las células esenciales de nuestro cuerpo representan nuestra familia más cercana.

Es esencial para la sociedad que el conocimiento de los microorganismos aumente para disipar las creencias y prácticas dañinas de la microbiofobia. Este es un mensaje central de la iniciativa para la alfabetización en microbiología y se utilizará en la primera línea de los programas escolares.

¡Manos a la obra!

Los macroorganismos (animales y plantas) no solo son miembros importantes de la biosfera, sino que también son componentes integrales de la sociedad humana, la evolución, la civilización y la mente humana en sí. Como especies domesticadas, proporcionan alimento, comodidad, placer y bienestar y, como especies silvestres, son fuente de asombro, pasatiempo y diversidad. La conservación de los macroorganismos es nuestra responsabilidad primordial. Como resultado, la biología, esencialmente biología animal y vegetal, ha sido históricamente un tema central de la educación, tanto por derecho propio como base para la enseñanza de la biología humana y para la educación de la reproducción. El interés popular y la apreciación de los macroorganismos aumentaron enormemente en los últimos años como resultado de los documentales televisivos de gran éxito presentados por David Attenborough (<https://www.theatlantic.com/science/archive/2016/05/every-episode-of-david->

[*attenboroughs-life-series- clasificado / 480678 /*](#)). En contraste, debido a su tamaño, los microorganismos son en su mayoría invisibles para el público en general, ya que lo que no se ve no se tiene en cuenta, o como dice la expresión “ojos que no ven corazón que no siente”, por lo que generalmente no están en las pantallas de los radares, excepto cuando crean un problema de interés periodístico, como el SIDA, el ébola y las mareas rojas. Este componente invisible de la biosfera se descuida en gran medida en la educación general. Sin embargo, en los últimos tiempos, los asombrosos descubrimientos sobre los microbiomas y sus variadas influencias en la biología y el comportamiento humano han aumentado significativamente la concienciación de la población en general sobre la importancia de los microorganismos. A pesar de esto, los microorganismos siguen siendo entidades esencialmente abstractas, menos comprensibles que internet y empatados al nivel de cómo funciona la memoria. Pero su importancia es inmensamente mayor que la de internet: sobrevivimos sin internet hasta que llegó, pero no podemos sobrevivir, ni podríamos haber sobrevivido, sin nuestros sistemas microbianos de soporte vital. Por lo tanto, es esencial que el mundo microbiano, en toda su sorprendente belleza inherente pero microscópica, pase de la abstracción a la percepción y esencia pictóricas, para que tome su posición legítima en la psique humana. Las ayudas visuales ocuparán un lugar central en las clases de alfabetización y el escenario explosivo del arte microbiano (por ejemplo, <https://www.bbc.com/news/uk-england-oxfordshire-45099420>) estimulará la imaginación. Debe convertirse en rutinario para que, cuando se discutan temas de microorganismos, nuestros hijos puedan visualizarlos inmediatamente en sus ojos e imaginar lo que están haciendo. A medida que los microorganismos pasen de lo abstracto y tomen forma, se volverán reales; ¡Los niños tendrán sus favoritos! A los adorables osos de peluche y ovejas lanosas se les unirán Metano humeante, Wolbo el astuto y Diatomea espinosa, que tienen sus personajes individuales (antropocéntricos) asignados por los fabricantes de juguetes. Incluso podrían convertirse, en un futuro no muy lejano, en dibujos animados favoritos de la televisión.

Este editorial tiene tres objetivos fundamentales, colocados en contexto en la Fig. 1, que es una guía para la introducción de temas de *alfabetización en microbiología* en los planes de estudio escolares.

La primera es exponer los déficits cruciales de conocimiento y competencias que se necesitan romper en la sociedad para alcanzar decisiones adecuadas basadas en la evidencia, sobre una variedad de temas personales y sociales, y así impulsar el desarrollo de una sociedad *alfabetizada en microbiología*; que se logrará mediante la incorporación de un marco de temas clave de microbiología en la educación básica.

El segundo es alentar a los microbiólogos, las sociedades de conocimiento microbiológico y los profesionales con conocimientos de los microorganismos, a participar y contribuir a esta iniciativa a través del desarrollo del marco de conocimiento básico, aportar ideas para temas, videos y experimentos para las clases; además de desarrollar y buscar financiación para las herramientas y los materiales de enseñanza necesarios, mejorar el impacto y transmitir su mensaje a educadores, responsables de políticas, la comunidad empresarial, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales relevantes.

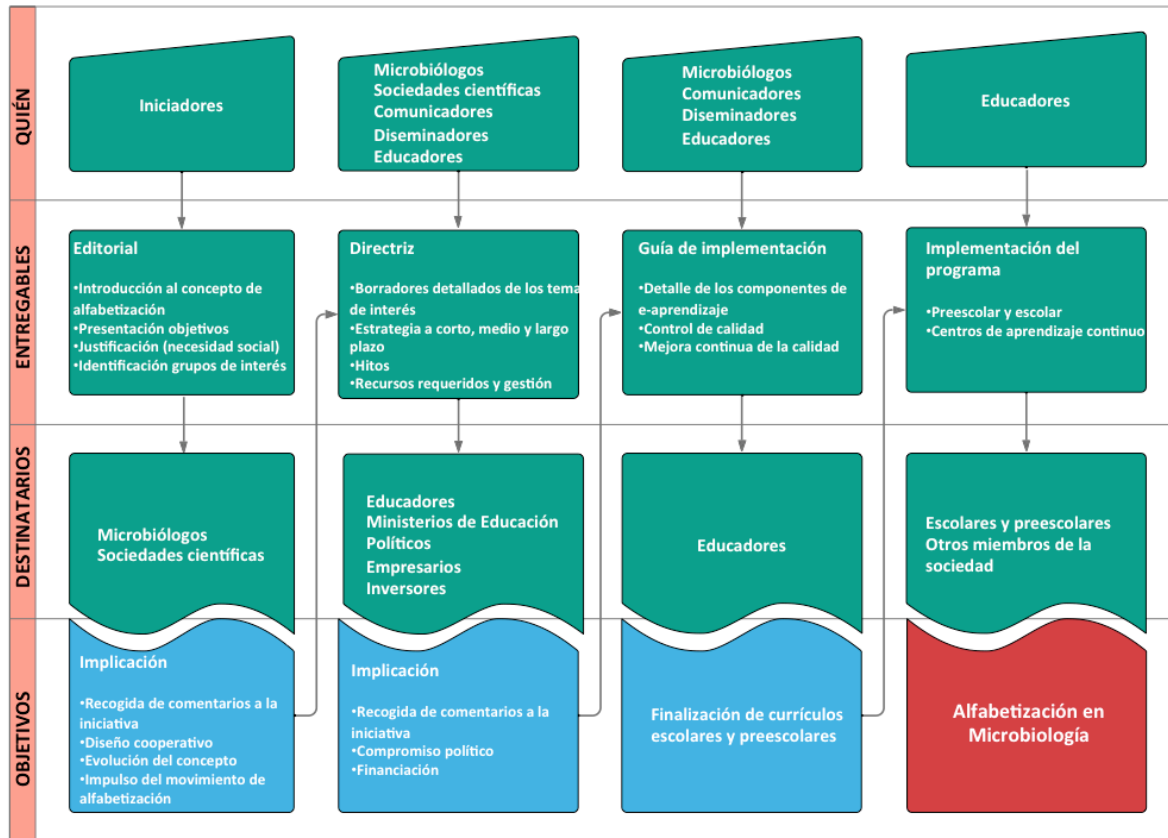


Figura 1. Iniciativa de Alfabetización en Microbiología. *Educación en microbiología en la escuela y el preescolar: un marco centrado en la experiencia del niño (Timmis *et al.*, en preparación).

Y el tercer objetivo, el más importante de este editorial, es catalizar y facilitar la movilización de un esfuerzo internacional para llevar el mensaje de *alfabetización en microbiología* a educadores, políticos, líderes empresariales y otros facilitadores, para convencerlos de la esencialidad de esta propuesta (*Todos somos partes interesadas en cuanto a la salud humana y planetaria: ¿podemos realmente permitirnos ignorar una base fundamental de nuestra capacidad para resolver las crisis actuales?*), y defender su progresión hacia la siguiente etapa, la implementación. En la medida de lo posible, hemos utilizado el lenguaje cotidiano y hemos evitado términos especializados en este editorial, de modo que pueda ser utilizado para múltiples audiencias. Instamos a los microbiólogos y sociedades microbiológicas a que estén en contacto con educadores, políticos, líderes de la industria, entre otros, y utilizando este editorial como base, transmitan su mensaje primordial y a la vez involucren a sus contactos en la búsqueda del apoyo necesario para lograr la *alfabetización microbiológica* de la sociedad.

Agradecimientos

Esta iniciativa se inspira en los esfuerzos previos de algunos microbiólogos que identificaron como una necesidad fundamental la mejora del conocimiento de la microbiología en nuestra sociedad. Al crear conciencia del problema y diseñar excelentes textos para la educación infantil y diversos materiales de enseñanza para facilitar la alfabetización en microbiología, sentaron una base excelente.

Referencias

- Bach, J.-F. (2018) The hygiene hypothesis in autoimmunity: the role of pathogens and commensals. *Nat Rev Immunol* 18: 105-120.
- Bartlett, J.G. (1979) Antibiotic-associated pseudomembranous colitis. *Rev Infect Dis* 1: 530-539.
- Bergey, D.H. (1916) The pedagogics of bacteriology. *J Bacteriol* 1: 5–14.
- Brown, J.M., and Hazen, S.L. (2015) The gut microbial endocrine organ: bacterially derived signals driving cardiometabolic diseases. *Annu Rev Med* 66: 343–359.
- Brüssow, H. (2017) Infection therapy: the problem of drug resistance – and possible solutions. *Micro Biotech* 10: 1041-1046.
- Cabello, F.C. (2006) Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment. *Environm Microbiol* 8: 1137-1144.
- Caselli, E. (2017) Hygiene: microbial strategies to reduce pathogens and drug resistance in clinical settings. *Micro Biotech* 10: 1979-1983.
- Caviccioli, R. Ripple, W.J., Timmis, K.N. *et al.* (2019), Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. Submitted.
- Christen, V., Kunz, P.Y. and Fent, K (2018) Endocrine disruption and chronic effects of plant protection products in bees: Can we better protect our pollinators? *Environ Pollut* 243: 1588-1601.
- Curtis, T. (2006) Microbial ecologists: it's time to 'go large'. *Nat Rev Microbiol* 4: 488.
- Du Toit, A. (2019) The gut microbiome and mental health. *Nat Rev Microbiol* <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0163-z>.
- Falkow, S., Marmur, J., Carey, W.F. *et al.* (1961) Episomic transfer between *Salmonella typhosa* and *Serratia marcescens*. *Genetics* 46:703–706.
- Falkow, S. (1970) Antibiotics in animal feeds. *N Engl J Med* 282: 693-4.
- Falkow, S. (1975) *Infectious Multiple Drug Resistance* (Pion Ltd, London).
- Finlay, B.B. and Arrieta, M.-C. (2016) Let them eat dirt. *Greystone Books*.
- Garcia, J.L, de Vicente, M. and Galan, B. (2017) Microalgae, old sustainable food and fashion nutraceuticals. *Micro Biotech* 10: 1017-1024.
- Gilbert, J.A. and Yee, A.L. (2016) Is triclosan harming your microbiome? *Science* 353: 348-34
- Gilbert, J.A., Knight, R. and Blakeslee, S. (2017) *Dirt is Good*. St Martin's Press.
- Godfray, H.C., Blacquière, T., Field, L.M. *et al* (2015) A restatement of recent advances in the natural science evidence base concerning neonicotinoid insecticides and insect pollinators. *Proc Biol Sci* 282: 20151821.
- Gomez de Agüero, M., Ganal-Vonarburg, S.C., Fuhrer, T., *et al.* (2016) The maternal microbiota drives early postnatal innate immune development. *Science* 351: 1296-302.
- Hobbie, S.E., Finlay, J.C., Janke, B.D. *et al* (2017) Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implication for managing urban water pollution. *Proc Natl Acad Sci USA* 114: 4177-4182.

- Lane, S., Noni E. MacDonald, N. E., Marti, M. and Dumolard, L. (2018) Vaccine hesitancy around the globe: Analysis of three years of WHO/UNICEF Joint Reporting Form data-2015–2017. *Vaccine* 36: 3861–3867.
- Lee, S.Y., Kim, H.U., Chae, T.U. et al (2019) A comprehensive metabolic map for production of bio-based chemicals. *Nature Catalysis* 2: 18-33.
- Levy, S. B., FitzGerald, G. B. and Maccone, A. B. 1976. Spread of antibiotic-resistant plasmids from chicken to chicken and from chicken to man. *Nature* 260: 40–42.
- Levy, S. B. 1982. Microbial resistance to antibiotics. An evolving and persistent problem. *Lancet* 8289: 83–88.
- de Lorenzo, V. (2017) Seven microbial bio-processes to help the planet. *Micro Biotech* 10: 995-998.
- de Lorenzo, V., Marliere, P. and Sole, R. (2016) Bioremediation at a global scale: from the test tube to planet Earth. *Micro Biotech*. 9: 618-625.
- Microbial Biotechnology (2017) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Micro Biotech* 10: 979-1274.
- Milani, C., Duranti, S., Bottacini, S. et al. (2017) The first microbial colonizers of the human gut: composition, activities, and health implications of the infant gut microbiota. *Microbiol Mol Biol Revs* 81: e00036-17.
- Monneret, C. (2017) What is an endocrine disruptor? *Comptes Rend Biol* 340: 403-405.
- Moossavi, S., Miliku, K., Sepehri, S., Khafipour, E. and Azad, M.B. (2018) The prebiotic and probiotic properties of human milk: implications for infant immune development and pediatric asthma. *Front Pediatr* 6: 197. doi: 10.3389/fped.2018.00197.
- Motta, E.V.S., Raymann, K. and Moran, N.A. (2018) Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *Proc Natl Acad Sci USA* 115: 10305-10310.
- Nakatsuji, T., Chen, T.H., Butcher, A.M. et al (2018) A commensal strain of *Staphylococcus epidermidis* protects against skin neoplasia. *Sci Adv* 4: eaao4502.
- Nielsen, P.H. (2017) Microbial biotechnology and circular economy in wastewater treatment. *Micro Biotech* 10: 1102-1105.
- Richards, S., Paterson, E., Withers, P.J.A. and Stutter, M. (2015) The contribution of household chemicals to environmental discharges via effluents: combining chemical and behavioural data. *J Environ Manage* 150: 427-434.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*. 461:472-475.
- Rossen, N.G., MacDonald, J.K., de Vries, E.M., D'Haens, G.R., de Vos, W.M., Zoetendal, E.G., and Ponsioen, C.Y. (2015) Fecal microbiota transplantation as novel therapy in gastroenterology: a systematic review. *World J Gastroenterol* 21: 5359–5371.
- Savage, A.F., and Jude, B.A. (2014) Starting small: using microbiology to foster scientific literacy. *Trends Microbiol* 22: 365– 367.

- Scalas, D., Roana, J., Mandras, N., et al. (2017) The Microbiological@mind project: a public engagement initiative of Turin University bringing microbiology and health education into primary schools. *Int J Antimicrob Agents* 50: 588– 592.
- Sender, R., Fuchs, S., and Milo, R. (2016) Are We Really Vastly Outnumbered? Revisiting the Ratio of Bacterial to Host Cells in Humans. *Cell* 164: 337–340.
- Sharma, A. and Gilbert, J. A. (2018) Microbial exposure and human health. *Curr Opin Microbiol.* 44: 79-87.
- Timmis, K.N., de Lorenzo, V, Verstraete, W. et al (2017) The contribution of microbial biotechnology to economic growth and employment creation. *Micro Biotech* 10: 1137-1144.
- Timmis, K.N., de Vos, W.M., Ramos, J.L., et al (2017) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Micro Biotech* 10: 984-987.
- Trinh, P., Zaneveld, J. R., Safranek, S. and Rabinowitz, P. M. (2018) One Health relationships between human, animal, and environmental microbiomes: a mini-review. *Front Public Health.* 30: 6: 235, doi: 10.3389/fpubh.2018.00235.
- Trivedi, P., Schenk, P.M, Wallenstein, M.D and Singh, B.K. (2017) Tiny microbes, big yields: enhancing food crop production with biological solutions. *Micro Biotech* 10: 999-1003.
- United Nations (2015) Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>).
- Verstraete, W. and de Vrieze, J. (2017) Microbial biotechnology with major potentials for the urgent environmental needs of the next decades. *Micro Biotech* 10: 988-994.
- Wampach, A., Heintz-Buschart, J., Fritz, V., Ramiro-Garcia, J., Habier, J., et al. (2018) Birth mode is associated with earliest strain-conferred gut microbiome functions and immunostimulatory potential. *Nature Com* 9: 5091.
- Wang, B., Yao, M., Lv, L., Ling, Z. and Li, L. (2017) The human microbiota in health and disease. *Engineering* 3: 71-82.
- Watanabe, T. (1963) Infective heredity of multiple drug resistance in bacteria. *Bacteriol Rev* 27:87–115.
- Watanabe, T. (1966) Infectious drug resistance in enteric bacteria. *N Engl J Med* 275: 888–894.
- Whipps, J.M., Lewis, K. and Cooke, R.C. (1988) Mycoparasitism and plant disease control 161–187. In: Burge, NM (editor), *Fungi in Biological Control Systems*. Manchester University Press; p176.
- zur Hausen, H., Bund, T. and de Villiers, E. M. (2017) Infectious agents in bovine red meat and milk and their potential role in cancer and other chronic diseases. *Curr Top Microbiol Immunol* 407: 83-116.