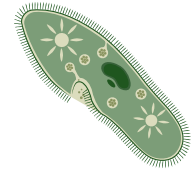
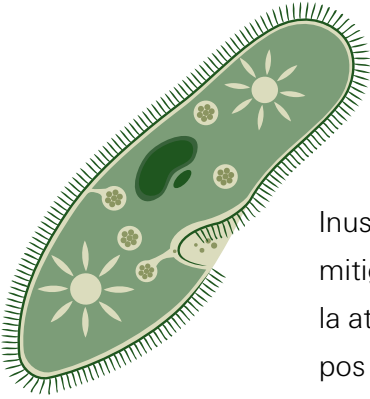


Edgardo I. Valenzuela y Francisco J. Cervantes

Microorganismos *imposibles* que regulan el clima



Inusuales microorganismos evitan que la Tierra se sobrecaliente porque mitigan la emisión de toneladas del gas de efecto invernadero metano a la atmósfera. Estos diminutos seres habitan las profundidades de los cuerpos de agua, en donde protagonizan el fenómeno de la oxidación anaerobia de metano, un proceso natural calificado como imposible por sus extraordinarias características.

Introducción

En el fondo de los cuerpos de agua, que cubren 70% de la superficie terrestre, las formas de vida más pequeñas del planeta (microorganismos) luchan por sobrevivir en un ambiente sumamente limitado de alimentos y nutrientes. En los sedimentos de estos ecosistemas, las comunidades de microorganismos compuestas por bacterias y sus familiares cercanos –las arqueas– trabajan de manera colectiva con la misión de subsistir en los límites energéticos de la vida. Para lograr dicha proeza, esta microbiota se sirve de un metabolismo especializado que consiste en el uso de la materia orgánica como fuente de alimento, con la consecuente producción de gases como dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), causantes del calentamiento global.

El metano, también conocido como gas natural, tiene una participación importante como gas de efecto invernadero, ya que es 28 veces más potente que el dióxido de carbono para atrapar la radiación en la atmósfera terrestre; por lo tanto, este gas es de especial interés debido al inminente cambio climático que experimenta la Tierra en la actualidad. No obstante, como contraparte de esta forma de vida generadora de gases, un segundo grupo de microorganismos, con extraordinarias características, es responsable de aminorar la cantidad de metano que se libera a la atmósfera; éstos son comúnmente llamados metanótrofos (véase la Figura 1).

Hasta finales de la década de 1980, se creía que los únicos microorganismos involucrados en el consumo de metano eran los metanótrofos aerobios, es decir, aquellos que respiran oxígeno (O_2). Dado que el metano es una molécula muy

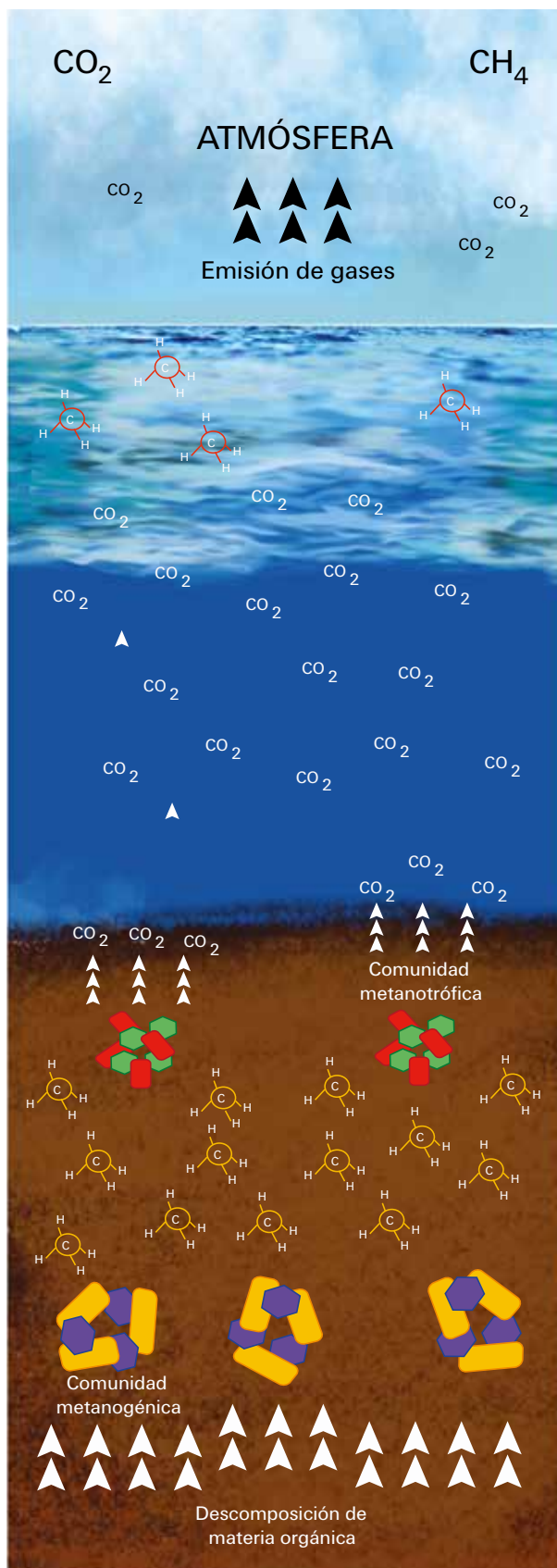


Figura 1. Procesos microbianos de producción y consumo de metano (CH_4) en el ecosistema marino. Las comunidades de microorganismos metanogénicos producen CH_4 a partir de la degradación de la materia orgánica. Posteriormente, este gas es parcialmente consumido por comunidades metanotróficas, para dar como producto final dióxido de carbono (CO_2), el cual es 28 veces menos efectivo como gas de efecto invernadero.

pequeña (el hidrocarburo más simple), insoluble y saturada de hidrógeno (H), la gran mayoría de los microorganismos carece de la capacidad de acceder a ella, romperla y asimilarla para transformarla en dióxido de carbono (el producto final de la oxidación de compuestos de carbono). Por consecuencia, el viejo paradigma giraba alrededor de la idea de que el metano podía ser degradado vía microbiana única y estrictamente bajo condiciones aerobias (en presencia de oxígeno).

Esta creencia surgió debido a que los microorganismos aerobios emplean enzimas especializadas para introducir oxígeno a la molécula de metano hasta convertirla en dióxido de carbono; de tal manera, esta microbiota digiere o procesa el gas y en el transcurso obtiene energía para mantenerse y duplicarse. No obstante, en la mayoría de los cuerpos de agua, el oxígeno sólo se encuentra disuelto en el estrato más superficial (aquella porción que está en contacto con el aire); por lo tanto, predomina la vida microbiana anaerobia, es decir, aquella que no depende de la respiración de oxígeno. Debido a ello, los microorganismos anaerobios son los que llevan a cabo las funciones ecológicas de mayor impacto. En conjunto, de acuerdo con la evidencia que existía hasta entonces, había un cúmulo de conocimiento suficiente para que los científicos calificaran el consumo de metano en ausencia de oxígeno como un fenómeno imposible e inexistente en la naturaleza.

■ Oxidación anaerobia de metano, el proceso imposible

■ A principios de 1980, algunas observaciones en los sedimentos del fondo marino señalaron la desaparición de grandes cantidades de metano que originalmente habían sido producidas por microorganismos metanogénicos (que producen metano). Estas evidencias resultaron enigmáticas: ¿es posible el consumo de metano sin oxígeno? Aquello desafiaba el prototipo vigente hasta entonces del ciclo del metano. Por fortuna, un gran avance tecnológico en las metodologías científicas permitió confirmar, mediante estudios bajo condiciones controladas, que había



microorganismos que podían consumir metano en ausencia de oxígeno.

El descubrimiento tendría grandes implicaciones, ya que un fenómeno de tales características confirmaría el potencial de evitar que la mayor parte del metano producido en el océano se liberara a la atmósfera (véase la Figura 1). Adicionalmente, se comprobó que, en vez de oxígeno, estos microorganismos respiraban un compuesto de azufre llamado sulfato (SO_4^{2-}). Al ser el sulfato altamente abundante en los océanos, el consumo de metano por parte de los microorganismos del fondo marino debía ser enorme; por lo tanto, éstos no sólo estarían teniendo un impacto positivo en la regulación del clima del planeta, sino que habrían ayudado a moldear la atmósfera terrestre desde tiempos inmemoriales. Este proceso revolucionario fue bautizado como oxidación anaerobia de metano (OAM) y algunos de los primeros cálculos estimaron que este fenómeno suprime la emisión de 90% del metano generado en el fondo marino por microorganismos metanogénicos.

Sinergismo microbiano

Fenómeno mediante el cual dos o más microorganismos aerobios o anaerobios combinan su metabolismo e intercambian elementos para su crecimiento y proliferación.

Ecosistemas divergentes al marino

Cuerpos de agua no salinos, como lagos, ríos, humedales, lagunas, etcétera.

■ **Bacteria y arquea: trabajo en equipo para sobrevivir**

A partir de dicho descubrimiento, se realizó un gran número de investigaciones para describir los mecanismos mediante los cuales los microorganismos anaerobios llevaban a cabo este inusual proceso. Un aspecto que desconcertaba a los microbiólogos de la época era que, de todas las bacterias con capacidad de respirar sulfato que se conocían, ninguna tenía en su código genético los elementos necesarios para producir enzimas con la capacidad de degradar el metano. Por otro lado, los únicos organismos conocidos que estaban implicados directamente en el ciclo del metano (en su producción) no eran bacterias sino arqueas, y ninguna de éstas era respiradora de sulfato.

No obstante, una década después, se observó mediante técnicas de microscopía y fluorescencia cómo los microorganismos establecen comunidades en las cuales arqueas y bacterias se mantienen unidas. Al estar en contacto, la arquea degrada el metano al

introducir oxígeno a la molécula hasta convertirla en dióxido de carbono; posteriormente, la energía obtenida mediante esta descomposición la comparte con su bacteria acompañante en forma de electrones. Puesto que estas bacterias podían respirar el sulfato, dicho **sinergismo** les permitía sobrevivir en condiciones sumamente restringidas. Dicho de otra manera, un tipo de microorganismo (la arquea) come lo que al otro (la bacteria) le es imposible digerir, mientras que la bacteria respira lo que al primero le es imposible respirar.

■ **El proceso imposible se vuelve ubicuo**

■ Casi 30 años después de las observaciones iniciales, el fenómeno de la oxidación anaerobia de metano se continúa detectando en **ecosistemas divergentes al marino** (véase la Figura 2). Usualmente, los cuerpos de agua dulce no poseen sulfato; pese a esto, se ha logrado identificar que, en ambientes acuáticos, como lagos y ríos, la oxidación anaerobia de metano la puede llevar a cabo la microbiota que respira otros compuestos químicos.

El nitrato (NO_3^-) y el nitrito (NO_2^-), dos compuestos de nitrógeno altamente abundantes en la naturaleza, fueron las primeras moléculas, además del sulfato, cuya respiración por la biota anaerobia se relacionó con el consumo de metano en ciertos ecosistemas, como lagos y campos de arroz. Se ha identificado que los microorganismos responsables de este proceso son las arqueas *Methanoperedens nitroreducens*, en el caso del nitrato, y *Methylomerebilitis oxyfera*, en el caso del nitrito.

Posteriormente, se demostró que algunos minerales de hierro (Fe) y de manganeso (Mn) tenían un efecto positivo en el consumo de metano por parte de los microorganismos marinos que respiran estos compuestos. Derivado de dicho descubrimiento, en 2016 se demostró que una arquea llamada *M. nitroreducens* puede consumir metano mientras respira partículas metálicas de hierro; además, esto lo hace prescindiendo de la ayuda de un compañero del reino bacteriano (Ettwig y cols, 2016).

Estas novedosas observaciones han tenido un gran impacto en la manera como comprendemos la

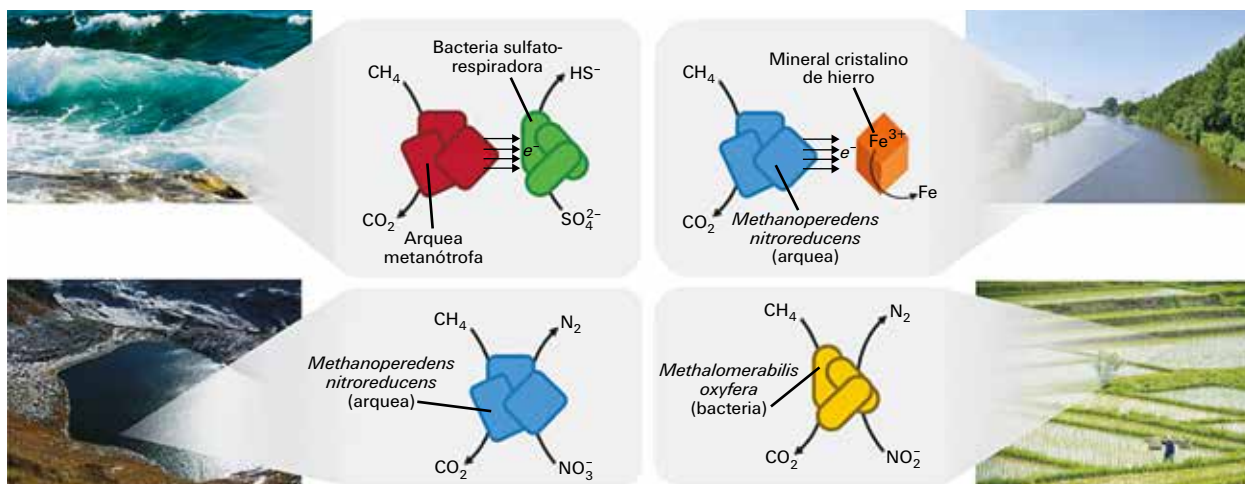


Figura 2. En años recientes, la ocurrencia de la oxidación anaerobia de metano (OAM) se ha detectado en distintos ecosistemas. Dependiendo del tipo de cuerpo de agua, distintos tipos de microorganismos consumidores de metano (o las comunidades de éstos) pueden respirar y eliminar simultáneamente contaminantes de nitrógeno y azufre, o bien disolver partículas metálicas.

evolución de la atmósfera terrestre. Se ha propuesto que las arqueas consumidoras de metano/respiradoras de hierro (como *M. nitroreducens*) pudieron haber prosperado en los principios de la Tierra antes de que la atmósfera fuese rica en oxígeno. Esta hipótesis surge debido a que únicamente los microorganismos con estas características podrían haber sobrevivido en los océanos ferruginosos, que eran ecosistemas existentes en tiempos remotos en los cuales la atmósfera terrestre era rica en metano.

Humus y oxidación de metano en humedales: incursión de la investigación mexicana

Los **humedales** emiten una tercera parte del metano atmosférico, debido a que estos cuerpos de agua poseen cantidades enormes de materia orgánica en continua descomposición. La oxidación anaerobia de metano en estos ecosistemas permaneció siendo un enigma por décadas, ya que las exploraciones iniciales mostraron que, efectivamente, estos ecosistemas también presentaban consumos significativos de metano; sin embargo, esto no se relacionaba con la respiración de las moléculas presentes. Las sustancias húmicas, también conocidas como humus, son moléculas que al igual que el metano y el dióxido de carbono provienen de la descomposición de la

materia orgánica. A diferencia de estos últimos, el humus no escapa a la atmósfera, sino que se acumula disuelto en agua o en forma de sólidos; en ambas configuraciones, el humus tiene un tiempo de vida muy largo.

Una característica extraordinaria del humus es que, al igual que el sulfato, el nitrato o los óxidos metálicos mencionados anteriormente, contiene compuestos químicos que pueden ser respirados por una gran variedad de microorganismos anaerobios (Martínez y cols., 2013). En el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) se ha demostrado por primera vez que los microorganismos de un humedal tropical ubicado en la Península de Yucatán (Sisal) pueden consumir metano a expensas de la respiración de humus (véase la Figura 3).

A partir de estas observaciones, se ha estimado que la oxidación de metano ligada a la respiración de humus en los humedales puede contribuir a la supresión de la emisión de hasta 1 300 Tg (teragramos) de metano por año a escala global (Valenzuela y cols., 2017 y 2019). Éste es tan sólo un ejemplo de cómo el descubrimiento de nuevos procesos de consumo de metano puede contribuir a mejorar los balances de emisión de gases de efecto invernadero. Esto representa una contribución invaluable a la proyección de escenarios futuros de cambio climático y calentamiento global.

Humedales

Cuerpos de agua temporal o permanentemente inundados, ricos en vegetación acuática y en materia orgánica en proceso de descomposición.

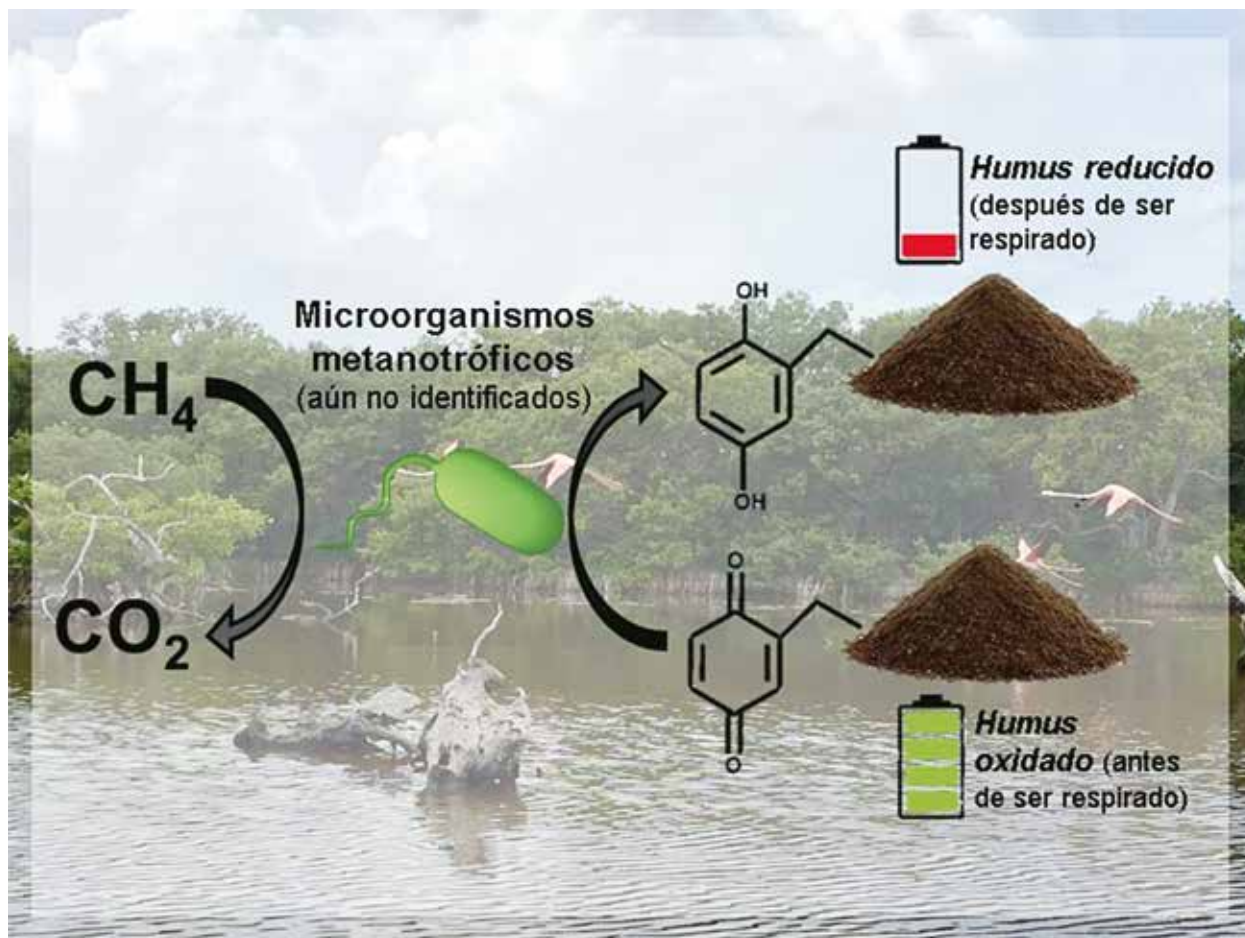


Figura 3. Oxidación anaerobia de metano en el humedal Sisal (Yucatán) por microorganismos respiradores de humus. La primera demostración del consumo de metano por microorganismos que respiran humus se realizó con sedimentos recolectados en la Península de Yucatán. Se estima que este proceso podría suprimir la emisión de 114 Tg de metano al año (Valenzuela y cols., 2017).

■ **■ ■ Biotecnología a partir de microorganismos imposibles**

■ Aunadas a los esfuerzos para seguir identificando los mecanismos mediante los cuales la microbiota metanotrófica suprime las emisiones de metano, existen iniciativas para llevar a estos microorganismos de los ecosistemas naturales hacia los sistemas de bioingeniería. Lo anterior consiste en explotar las capacidades excepcionales de dichos microorganismos mediante el desarrollo de tecnologías al servicio del ambiente.

Un ejemplo de esto es la producción de electricidad a partir de metano. Para lograrlo, se ha patentado un sistema en el que se hace crecer a arqueas metanótrofas en un compartimento en el cual se suministraría el metano generado por microorganismos metanogénicos a partir de desechos orgánicos.

Se pretende que estas arqueas descompongan el metano y los electrones obtenidos sean capturados gracias al uso de materiales especiales, para así generar electricidad (Scheller, 2018).

Actualmente, la aplicación más promisorias de los llamados microorganismos imposibles es la utilización de *M. nitroreducens* y *M. oxyfera* para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con compuestos de nitrógeno, como el amonio (NH_4) y los compuestos nitrogenados oxidantes (NO_3^- y NO_2^-). Usualmente, el tratamiento de aguas con estas características requiere de la suplementación de grandes cantidades de oxígeno por medio de bombas, lo cual resulta en costos de operación muy elevados. En este contexto, el uso de los microorganismos metanotróficos antes mencionados, en conjunto con oxidadores anaerobios de amonio, también conoci-

dos como ANAMMOX (otras bacterias cuya existencia alguna vez fue denotada como imposible), permitiría prescindir de los procesos dependientes del oxígeno y eliminar los compuestos nitrogenados, haciendo uso del metano procedente del mismo tratamiento de aguas residuales.

■ Observaciones finales

■ Hoy día, el descubrimiento de nuevos microorganismos con excepcionales capacidades metabólicas aún desafía nuestro entendimiento de la forma como funciona el planeta. Aunque el uso de la microbiota metanotrófica en procesos biotecnológicos ambientales es promisorio, esta área de desarrollo aún se encuentra en ciernes. Sin lugar a duda, las próximas décadas traerán consigo extraordinarias noticias en torno a los microorganismos que alguna vez se creyeron imposibles y que contribuyen a la preservación del ambiente.

Edgardo I. Valenzuela

División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí.
edgardo.valenzuela@ipicyt.edu.mx

Francisco J. Cervantes

Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla.
FCervantesC@iingen.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Ettwig, K. F. *et al.* (2016), "Archaea catalyze iron-dependent anaerobic oxidation of methane", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 113:12792-12796.
- Martínez, C. M., L. H. Álvarez, L. B. Celis y F. J. Cervantes (2013), "Humus-reducing microorganisms and their valuable contribution in environmental processes", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 97:10293-10308.
- Scheller, S. (2018), "Microbial Interconversion of Alkanes to Electricity", *Front Energy Res.*, 6:1-6.
- Valenzuela, E. I. *et al.* (2017), "Anaerobic methane oxidation driven by microbial reduction of natural organic matter in a tropical wetland", *Appl. Environ. Microbiol.*, 83:AEM.00645-17.
- Valenzuela, E. I. *et al.* (2019), "Electron shuttling mediated by humic substances fuels anaerobic methane oxidation and carbon burial in wetland sediments", *Sci. Total Environ.*, 650:2674-2684.
- Zandt, M. H., A. E. E. de Jong, C. P. Slomp y M. S. M. Jetten (2018), "The hunt for the most-wanted chemolithoautotrophic spookmicrobes", *FEMS Microbiol. Ecol.*, 94(6)-fyy064.