

Cajas de almuerzo microbiano automático: animales con simbioses quimiosintéticas (agricultores y recicladores autosuficientes)

¿Por qué tenemos que comprar comida en la tienda?
¿No podemos cultivar toda nuestra propia comida en casa?



Vista de City Farm, una granja urbana en la ciudad de Chicago, Estados Unidos. La agricultura urbana, la jardinería en la azotea y las ideas similares se promueven como formas de educar a los habitantes de la ciudad sobre de dónde proviene su comida, para usar espacios "desperdiciados" como los tejados para la producción de alimentos y reducir la distancia que la comida tiene que viajar para llegar a los consumidores. Foto de Linda N., 2008, cc-by 2.0 (fuente: <https://www.flickr.com/photos/22748341@n00/2737299930/>)

Brandon K. B. Seah

Max Planck Instituto del Desarrollo Biológico, Alemania

Agradecimientos: Agradezco a Nicole Dubilier sus sugerencias sobre el borrador de este Marco Temático, y a Florian Scharhauser por permitirme utilizar su imagen del nematodo stilbonematine.

Animales con simbiosis quimiosintéticas

Historia

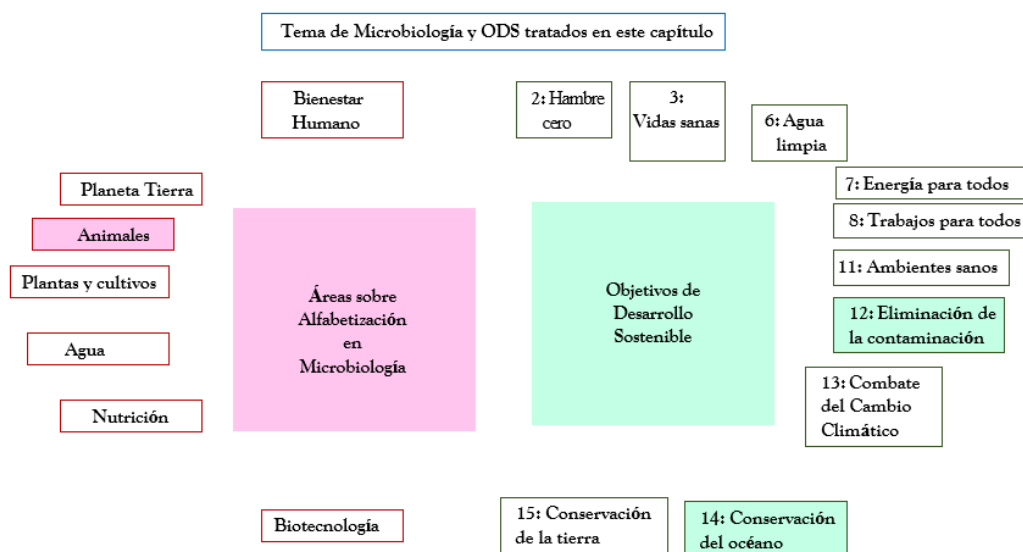
La mayoría de los animales se alimentan de plantas y otros animales para sostenerse. Los humanos no son la excepción, pero en las sociedades modernas, la mayoría de nosotros no cultivamos nuestra propia comida; Dependemos de otros para hacerlo por nosotros. ¿Cuánta tierra y recursos se necesitan para alimentar a una persona? ¿Por qué no podemos simplemente cultivar nuestra propia comida en casa o, aún mejor, llevar una mochila llena de plantas que simplemente podemos cosechar cada vez que sentimos hambre? Algunos animales y organismos (protistas) similares a los animales llevan de hecho una "mochila" de microbios alimenticios con ellos. Estos microbios pueden usar la energía en fuentes químicas ricas en energía para convertir dióxido de carbono (CO₂) y pequeñas moléculas orgánicas en biomasa, al igual que cómo las plantas usan la luz solar para alimentar su crecimiento a través de la fotosíntesis. El animal anfitrión/protista luego come la "cosecha" producida por los microbios, al mismo tiempo manteniendo las condiciones favorables para que sus microbios continúen creciendo, al igual que cómo los agricultores tenderían a sus granjas.

Esta parece una gran idea para asegurarse de que nunca se quedará sin comida. Si es así, ¿por qué no más animales llevan sus granjas con ellos? Una razón es que estos organismos se limitan a lugares donde tales fuentes de energía química están disponibles en cantidad suficiente. Otra razón es que la mayoría de los animales tienen demandas de energía mucho más altas de las que pueden satisfacerse por lo que pueden llevar solos. Por ejemplo, la producción de los alimentos consumidos por cada ser humano en el planeta requiere en promedio aproximadamente 0.7 ha de tierras agrícolas, el tamaño casi exacto de un campo de fútbol (fútbol). ¡Imagina llevar eso contigo todo el día! Pensar en lo que hace que este estilo de vida simbiótico de "mochila de alimentos" sea posible, por lo tanto, nos ayuda a comprender nuestro propio estado o como consumidores de alimentos que comparten un planeta con recursos finitos.

El contexto de la microbiología y la sociedad

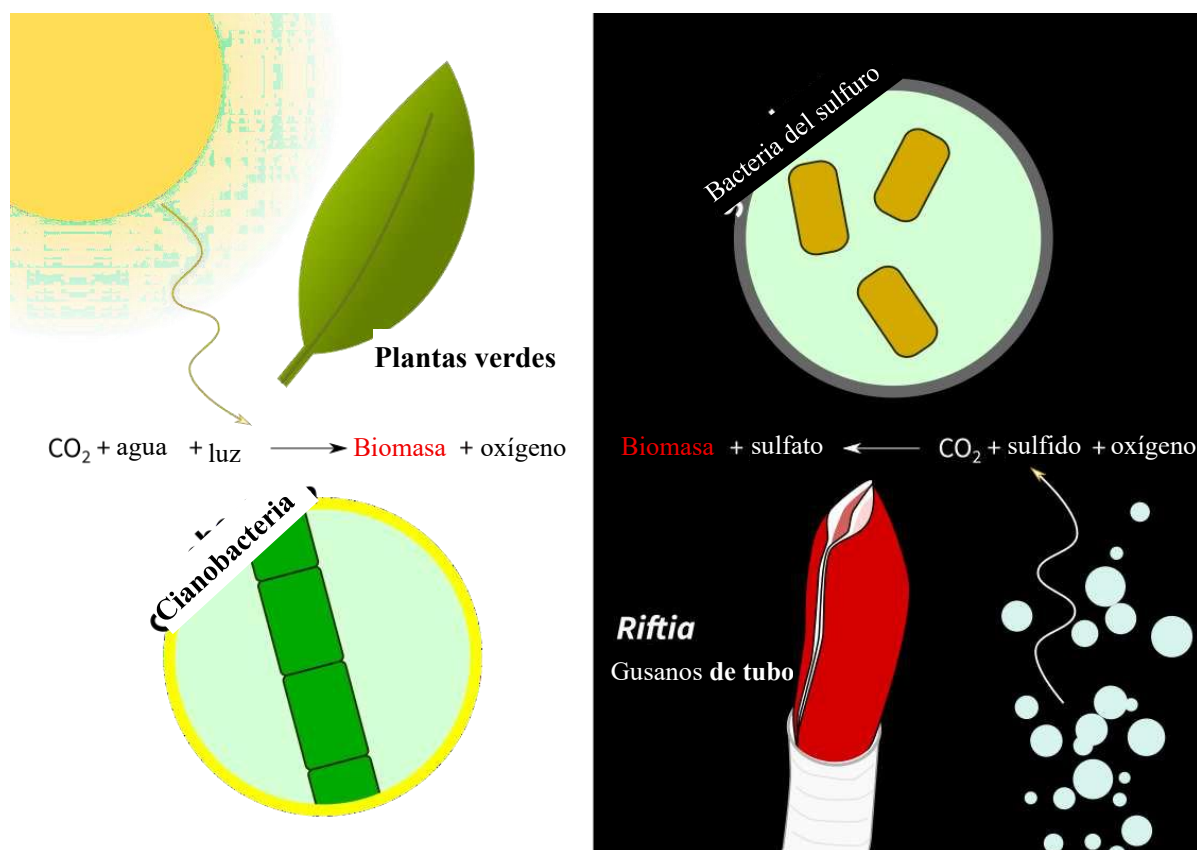
La microbiología: Animal marino, simbiosis de microbios, adquisición de carbono y energía autótrofos-heterótrofos.

Sostenibilidad: Producción de consumo responsable, conserve los océanos.



Animales con simbiosis quimiosintéticas: la microbiología

1. *Muchas bacterias pueden hacer uso de productos químicos inorgánicos como fuentes de energía para alimentar la producción de biomasa (quimiosíntesis), análogo al cómo las plantas usan la energía de la luz para crecer por la fotosíntesis.* El crecimiento implica la producción de biomoléculas orgánicas complejas (a base de carbono) necesarias para crear nuevas células o biomasa. La síntesis de biomoléculas de simples bloques de construcción - precursores - requiere mucha energía. Las plantas verdes y las cianobacterias cosechan la energía de la luz para crear energía celular que se usa para producir una nueva biomasa, fijando dióxido de carbono del aire, mientras se divide agua, produciendo gas oxígeno como subproducto. Debido a que los organismos fotosintéticos crecen completamente en sustratos inorgánicos y obtienen energía de la luz solar, se dice que son autótrofos, en contraste con organismos como nosotros que necesitan sustratos de carbono orgánicos como el azúcar y las proteínas como fuentes de carbono y energía, y que por lo tanto se llaman heterótrofos. Sin embargo, algunas bacterias pueden usar energía química en compuestos ricos en energía ("reducidos") que se liberan en reacciones, como la entre el sulfuro de hidrógeno (H_2S ; "huevo podrido") y oxígeno, o entre gas hidrógeno (H_2) y oxígeno, para alimentar la fijación de CO_2 . Debido al paralelo a la fotosíntesis, este tipo de metabolismo autotrófico se llama quimiosíntesis.



La fotosíntesis (izquierda) en plantas verdes y microbios como algas y cianobacterias es un proceso que convierte el gas de dióxido de carbono en nueva biomasa para el crecimiento, utilizando energía de la luz solar. La quimiosíntesis (izquierda) es un proceso similar que utiliza energía química, por ejemplo: del gas de sulfuro, en lugar de la luz solar. La quimiosíntesis se realiza mediante microbios, como las bacterias de azufre, algunas de las cuales viven simbióticamente dentro de organismos más grandes como las *Riftia* gusanos de tubo del mar profundo.

Los hábitats que pueden apoyar la quimiosíntesis necesitan un suministro constante de tales sustancias reducidas químicamente. Estos incluyen respiraderos hidrotérmicos y filtraciones en el mar, donde los gases como el sulfuro de hidrógeno, el hidrógeno y el metano producidos por procesos geológicos escapan al agua de mar. En la costa, los productos químicos reducidos también son producidos por la descomposición del material orgánico enterrado en el sedimento. Es en tales hábitats que los microbios quimiosintéticos pueden prosperar, a veces formando esteras microbianas densas o formando asociaciones cercanas con animales que se alimentan de la biomasa que producen.

2. Algunos animales y microbios similares a los animales ("protistas") pueden formar relaciones mutuamente beneficiosas (simbiosis) con tales bacterias. Muchos tipos de animales y protistas¹ invertebrados forman simbiosis con bacterias quimiosintéticas.



Collage de animales simbióticos y protistas que tienen bacterias simbióticas y quimiosintéticas. En el sentido de las agujas del reloj desde la parte superior izquierda: *Riftia pachyptila* Tubeworms en el mar profundo (hasta 1 m de largo), *Kentrophoros* ciliates (0.5 mm de largo), *Paracatenula* plana (1- 2 mm de largo), *Leptonemella* nematode (ca. 1-2 mm de largo), *Solemya velum* clam (concha 13 mm a través).

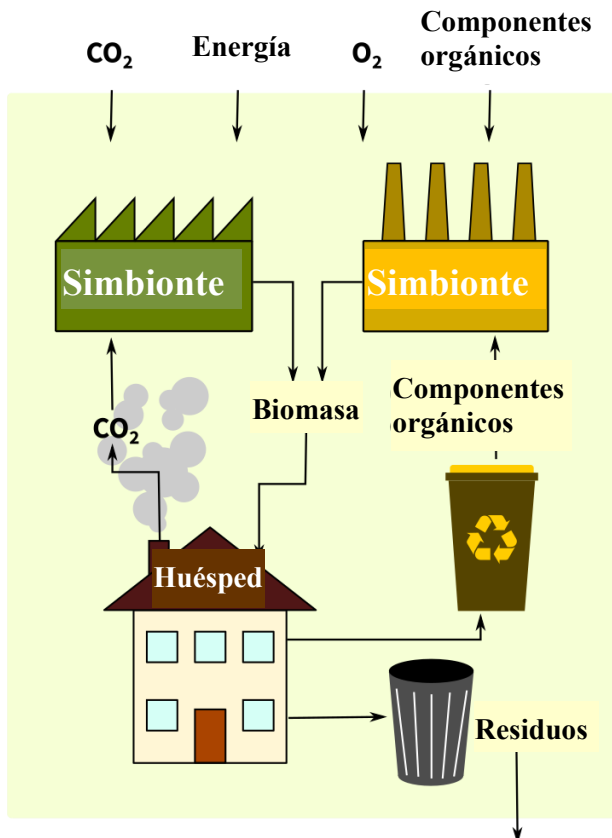
Explotan la producción primaria autótrófica de estas bacterias, al igual que cómo los herbívoros explotan la fotosíntesis de las plantas para los alimentos. Su tamaño físico varía desde el gusano del tubo *Riftia pachyptila* que puede alcanzar varios metros de longitud, hasta gusanos planos microscópicos *Paracatenula* spp. que apenas tienen un milímetro de largo. Algunos llevan las bacterias dentro de sus cuerpos en órganos especializados (por ejemplo, branquias modificadas en *Solemya* almejas), o incluso dentro de sus propias células (por ejemplo, *Paracatenula*). Otros dejaron que la bacteria se "engañe" en las superficies de su cuerpo, usándolas como un abrigo (por ejemplo, gusano nematodo *Leptonemella*). Los huéspedes pueden alimentarse de las bacterias, ya sea digiriendo las células o transfiriendo nutrientes directamente a sus cuerpos. De hecho, muchos de estos animales han perdido la boca y las tripas en el curso de la evolución, un fenómeno inusual que impulsó a los científicos a mirarlos más de cerca en primer lugar.

¹ El término "protista" generalmente se usa para referirse a cualquier eucariota de células, o más ampliamente a cualquier eucariota que no sea un animal, planta o hongo. La última definición incluye algunas especies multicelulares grandes como las algas gigantes (algas marrones). Se prefiere sobre el término "protozoos", lo que da la impresión engañosa de que son un tipo de "animales primitivos".

Las imágenes de video vinculadas a continuación bajo "Ayudas de enseñanza" pueden ayudar a demostrar este "bestiario" de animales simbióticos y protistas a los alumnos.

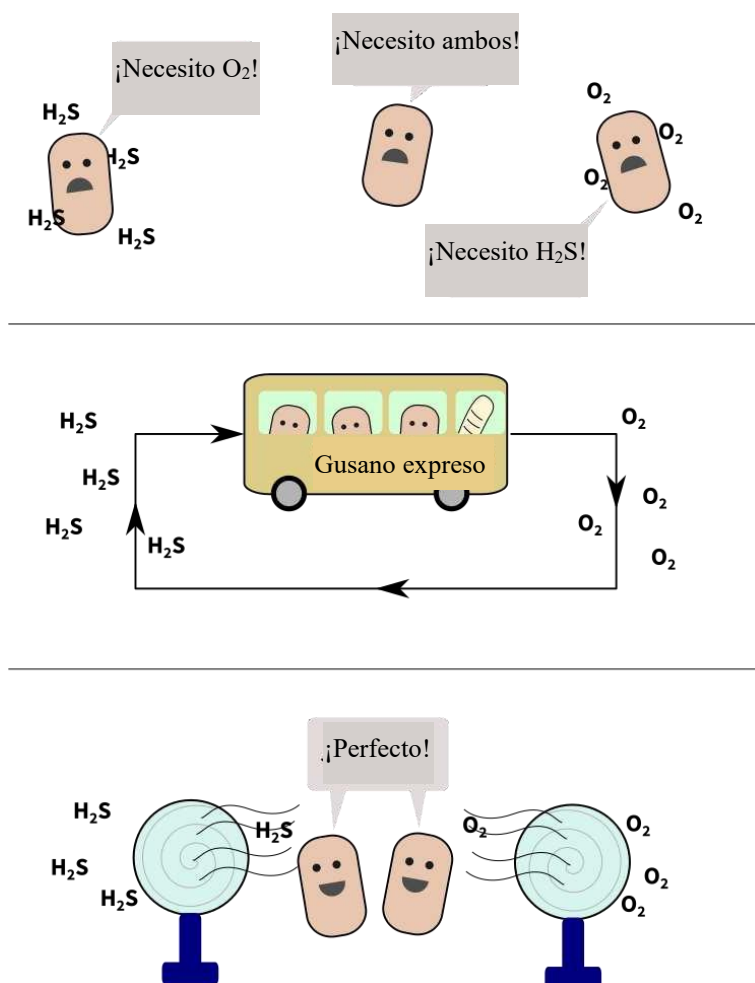
3. ***Muchas de estas bacterias no solo hacen una nueva biomasa a partir de CO₂ como plantas, sino que también pueden reciclar productos de desecho de otros organismos.*** Gran parte de la fascinación por la simbiosis quimiosintética proviene de la analogía con las plantas, y el hecho de que, en los hábitats oscuros y profundos, las bacterias quimiosintéticas toman el lugar de las plantas verdes como los principales productores que apoyan el ecosistema. Sin embargo, se reconoce cada vez más que muchas bacterias quimiosintéticas no solo producen biomasa "nueva" de CO₂, sino que también reciclan productos de desecho como acetato y propionato que provienen de la fermentación por parte del huésped o por otros organismos en el entorno circundante. Debido a que estas moléculas pequeñas también son compuestos orgánicos, las bacterias no son estrictamente autótrofos, sino que podrían considerarse mixótrofos (capaces de cambiar entre estilos de vida autotróficos y heterotróficos). Estos compuestos de desechos por sí solos son fuentes de energía deficientes, especialmente en entornos de bajo oxígeno, porque están altamente oxidados. Sin embargo, cuando el organismo también tiene la capacidad de aprovechar otras fuentes de energía no basadas en carbohidratos, como en el caso de las bacterias quimiosintéticas, se convierten en una fuente complementaria de carbono factible para construir una nueva biomasa, además de la fijación de CO₂. Después de todo, CO₂ es aún más oxidado y requiere aún más energía para convertirse en biomasa.

Incluso puede ser posible prescindir de la fijación CO₂ completamente, como con los simbioses de un ciliado (eucariota de células individuales) llamadas *Kentrophoros*, que carecen de las vías de fijación de CO₂ estándar, y parecen utilizar exclusivamente tales compuestos orgánicos de "baja calidad" para el crecimiento, impulsados por la oxidación de la sulfido. Por lo tanto, esta simbiosis particular actúa menos como una planta verde que una planta de reciclaje para el carbono orgánico de baja calidad.



Los simbioses quimiosintéticos producen una nueva biomasa que alimenta a sus huéspedes, pero también pueden reciclar algunos de los productos de desecho del huésped, como pequeños compuestos orgánicos y dióxido de carbono.

4. Los animales que tienen estos simbioses tienen adaptaciones para suministrarles sustratos de oxígeno y químicos que necesitan para el crecimiento. Los animales anfitriones y los protistas no se benefician simplemente sin pagar ningún costo. Tienen que mantener condiciones de crecimiento adecuadas para sus bacterias simbióticas. Algunos hacen esto moviéndose de un lado a otro entre fuentes de los combustibles químicos y de oxígeno, por ejemplo, los gusanos nematodos que viven en sedimentos costeros y se mueven hacia arriba a través de los sedimentos para acceder a oxígeno en capas superficiales y hacia abajo para acceder a compuestos reducidos en capas más profundas. Otros mantienen un flujo continuo de agua de mar rica en oxígeno y sustrato en sus cuerpos, de modo que ellos y sus bacterias tienen suficientes sustancias para el crecimiento, p. Los mejillones de los agudos profundos cuyos simbioses viven en sus branquias. Al producir activamente biomasa, estas bacterias pueden consumir oxígeno a una velocidad alta, y esta demanda de oxígeno establece un límite en la tasa de metabolismo del huésped. No es una sorpresa, entonces, que los animales anfitriones a menudo sean sésiles (unidos a un sustrato físico), como los gusanos de tubo de mar profundamente, porque no moverse reduce el uso de energía y, por lo tanto, la cantidad de oxígeno que el huésped necesita por sí mismo. Alternativamente, si el animal huésped es pequeño, como los nematodos que son solo un milímetro o dos de largo, el oxígeno puede difundirse más rápido en el cuerpo del animal que en un organismo más grande, por lo que aún pueden apoyar una población de simbioses bacterianas además de sus propias necesidades de oxígeno. La bacteria puede ocupar un porcentaje significativo del volumen del organismo, a ~ 5% en *Riftia tubeworms*, a ~ 30-50% en *Paracatenula* lombriz y *Kentrophoros* ciliats.



Cómo los anfitriones ayudan a los simbioses a encontrar las condiciones adecuadas para el crecimiento. Las bacterias quimiosintéticas necesitan oxígeno y productos químicos como el sulfuro para el crecimiento, pero las bacterias no pueden mover grandes distancias rápidamente (arriba). Algunos anfitriones, como los gusanos, pueden llevar las bacterias y transportarlas de un lado a otro entre fuentes de las diferentes materias primas que necesitan para el crecimiento (medio). Otros anfitriones, como las almejas, pueden bombear y mezclar agua que contiene estas sustancias, y llevarlas al alcance de sus simbioses (abajo).

5. *¿Por qué no podemos transportar todas las plantas que se necesitan para alimentarnos, como lo hacen estos animales simbióticos?* En comparación con ellos, nuestras necesidades metabólicas son mucho más altas porque somos de sangre caliente, de mayor tamaño y mucho más activos. La relación de nuestra tasa metabólica a la tasa de crecimiento de las plantas establece un límite inferior en la cantidad de materia vegetal que necesitaríamos para alimentarnos. Esto se suma al suelo, el fertilizante y el agua que se necesitarían para nutrir las plantas mismas. Una forma aproximada de imaginar esto es calcular cuánta tierra agrícola está disponible por persona en la Tierra. A partir de 2013, había aproximadamente 0.7 ha por persona a nivel mundial, pero el valor varía ampliamente de una región a otra, desde aproximadamente 0.18 ha en el sur de Asia a 1,52 ha en América del Sur, donde se usa mucha más tierra para pastos de ganado. Las mejoras en la tecnología agrícola y la reproducción (o modificación genética) de los cultivos han mejorado los rendimientos con el tiempo, pero esto se ve compensado por la creciente población mundial y el consumo por persona.

6. *Las estrategias metabólicas de las bacterias quimiosintéticas tienen analogías en la microbiología aplicada e industrial.* Muchos simbioses quimiosintéticos pueden almacenar fuentes de carbono o energía dentro de sus células como un "tampón" contra la escasez futura o las condiciones fluctuantes. Esta es en realidad una estrategia común entre los microbios en general, y no se limita a especies simbióticas. El almacenamiento generalmente toma la forma de glóbulos o gránulos dentro de la célula, hecho de polímeros como polihidroxialcanoatos (PHA), glucógeno o polifosfatos. Los polímeros como PHA se llaman "bioplásticos", ya que pueden tener propiedades de plástico y, además, ser producidos por microbios de fuentes renovables, y también son biodegradables. Los microbiólogos industriales usan bacterias de vida libre para transformar productos de desecho de fermentación de aguas residuales a PHA; Las vías metabólicas involucradas están relacionadas con las que se encuentran en las bacterias quimiosintéticas simbióticas.

Relevancia para los objetivos de desarrollo sostenible y los grandes desafíos

- **Objetivo 12. Consumo y producción responsables.** Las bacterias quimiosintéticas producen una nueva biomasa a partir de CO₂ (producción primaria) y reciclan compuestos orgánicos que son productos de desecho de sus huéspedes u otros organismos en el medio ambiente. El reciclaje de desechos nuevamente a la biomasa por estos microbios es análogo al uso de materiales de desecho de la agricultura o la producción de alimentos para hacer nuevos productos, un proceso que se llama "valorización de desechos" en la industria. Un ejemplo de valorización de residuos de la industria alimentaria es el uso de desechos de cáscara de naranja después de que se ha extraído el jugo de las naranjas. Los desechos de cáscara se procesan convencionalmente en alimento para animales o simplemente se incineran. Sin embargo, es rico en sustancias como aceites esenciales y pectina que se pueden extraer y utilizar para productos de consumo. También hay evidencia de que los desechos de cáscara crudo pueden ser un fertilizante para restaurar las tierras forestales degradadas durante un período de varios años. El otro lado de la moneda es reducir la cantidad de alimentos desperdiciados en la cadena, desde productor hasta minorista y consumidor. Se estimó en 2011 que hasta un tercio de toda la producción de alimentos en todo el mundo se desperdicia, o alrededor de 1.300 millones de toneladas al año. En los países desarrollados, hasta el 40% de los desechos ocurren con el minorista o el consumidor, es decir, en las tiendas y en el hogar, en lugar de en la etapa de producción. Aquí es donde las acciones y los hábitos individuales pueden tener un impacto considerable.

- **Objetivo 14. Conserve los océanos.** Estos organismos simbióticos viven en hábitats

como respiraderos hidrotérmicos de aguas profundas y bosques de manglares costeros. Están directamente amenazados por actividades humanas como la minería de aguas profundas, que se dirige específicamente a los depósitos minerales en respiraderos hidrotérmicos, minerales que se utilizan para la fabricación de acero y la electrónica, y la minería de arena en costas y ríos que se usan para hacer concreto para la construcción. Esto se suma a los cambios globales causados por un clima de calentamiento. Las almejas sésiles y los gusanos microscópicos pueden ser menos visibles o visualmente atractivos para el público que las "especies carismáticas" como los pulpos coloridos o los mamíferos grandes. No obstante, respaldan los ciclos biogeoquímicos en sus respectivos hábitats, y son inherentemente interesantes para los científicos por lo que pueden enseñarnos sobre cómo funcionan los sistemas vivos.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. Individual

- a. Aprecie las cantidades de recursos necesarios para la producción primaria para apoyar la vida de los animales, ya sea de plantas verdes o fuentes microbianas.
- b. Reconsidere los hábitos personales con respecto a la preparación, el almacenamiento y el consumo de los alimentos para minimizar el desperdicio de alimentos.
- c. Reconsidere las creencias comúnmente sostenidas de que hábitats como pantanos y manglares son "apestosos" y antihigiénicos.

2. Comunidad

- a. Motive los esfuerzos de la comunidad para reducir el desperdicio de alimentos,
- b. Donación a los bancos de alimentos, redistribución de alimentos no deseados.

3. Nacional

- a. Informe a las políticas sobre el desarrollo o la explotación de recursos de los ecosistemas costeros y profundos, y sea responsable del impacto en la biodiversidad y ecología "invisibles".

Participación de la pupila

1. Discusión en clase sobre ¿quién debería tener la responsabilidad de reducir el desperdicio de alimentos: productores, minoristas o consumidores?

Los alumnos pueden tener en cuenta los siguientes puntos:

- b. ¿En qué parte de la cadena de producción/consumo se produce la mayoría de los desechos?
- c. ¿Cómo influyen las elecciones individuales de los consumidores las decisiones tomadas por minoristas y productores? (por ejemplo, descartar vegetales deformados).
- d. ¿De dónde viene tu comida? ¿Cómo se aseguran los productores de que sobrevive al viaje?

2. Conciencia de la parte interesada del alumno. Auditoría de recursos personales: ¿Cuáles son los recursos necesarios para producir los alimentos que como cada semana?

Esto se puede medir en términos de tierras de cultivo, consumo de energía, emisiones de CO₂, agua y/o tiempo para cosechar. Este ejercicio también tiene como objetivo desarrollar habilidades de aritmética, para hacer estimaciones y trabajar con aproximaciones de orden de magnitud.

- a. Invite a los alumnos a hacer una suposición educada después de proporcionar algunos

- ejemplos de los recursos necesarios para producir alimentos comunes.
- b. Luego pídale que realicen una auditoría personal, con orientación sobre cuáles son los recursos confiables para las estadísticas sobre el consumo de recursos.
 - c. Compare las conjeturas iniciales con sus estimaciones finales después de trabajar a través del ejercicio. ¿Son más altos o bajos de lo que esperaban?

3. Ejercicios

- a. Definir la producción primaria y la autotrófica como la producción biológica de nuevo carbono orgánico de fuentes de carbono inorgánico, principalmente dióxido de carbono.
- b. Compare y contrasta la autotrófica con la heterotrofia, dando ejemplos de organismos que pertenecen a ambas categorías.
- c. Defina la quimiosíntesis como el uso de fuentes de energía química (agentes reductores) para el crecimiento autotrófico.
- d. Compare y contrasta quimiosíntesis con la fotosíntesis.
- e. Dé ejemplos de organismos que tienen un metabolismo quimiosintético y donde viven.
- f. Proponer razones, basadas en condiciones ecológicas y las habilidades metabólicas de los organismos, por qué la quimiosíntesis se limita a hábitats específicos y no apoyaría adecuadamente las necesidades nutricionales de animales como los humanos.
- g. Explique cómo uno estimaría los recursos requeridos para la agricultura en contexto personal, es decir, cuánta tierra y recursos se requieren para apoyar el consumo propio.
- h. Diseñe su propio animal simbiótico. Has visto fotos de estos ciliados, gusanos, mejillones y almejas que tienen bacterias simbióticas. Ahora es su oportunidad de diseñar su propio animal simbiótico con sus propias habilidades especiales. Asegúrese de responder a las siguientes preguntas: (i) ¿Dónde viven las bacterias en el animal y cuántas de ellas hay? (ii) ¿Cómo hacen la bacteria biomasa y cómo se asegura el animal de que las bacterias obtengan suficientes recursos de oxígeno y químicos para hacerlo? (iii) ¿Cómo se transfieren los nutrientes de las bacterias al animal? Los maestros podrían usar imágenes y diagramas de Phyla de animales invertebrados para ayudar a comenzar este ejercicio.

La base de evidencia, lecturas adicionales y ayudas para enseñar

Base de evidencia

Bright, M., Espada-Hinojosa, S., Lagkouvardos, I. y Volland, J.-M. (2014) El ciliado gigante *Zoothamnium niveum* y su epibionte quimiosintético *Candidatus Thiomargarita* Zoothamnicoli: un sistema modelo para estudiar la cooperación entre especies. *Front. Microbiol.* 5: 145.

Childress, J.J. y Girguis, P.R. (2011) Las demandas metabólicas del metabolismo de la quimioesimbiótica en el metabolismo endosimbiótico en las capacidades fisiológicas del huésped. *J. Exp. Biol.* 214: 312–325.

Dubilier, N., Bergin, C. y Lott, C. (2008) Diversidad simbiótica en animales marinos: el arte de aprovechar la quimiosíntesis. *Nat. Rev. Microbiol.* 6: 725–740.

Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R. y Meybeck, A. (2011) Pérdidas mundiales de alimentos y desperdicio de alimentos: extensión, causas y prevención. Organización de Agricultura y Agricultura, Roma.

Jäckle, O., Seah, B.K.B., Tietjen, M., Leisch, N., Liebeke, M., Kleiner, M., et al. (2019) El

simbionto quimiosintético con un genoma drásticamente reducido sirve como almacenamiento de energía primaria en la paracatenula marina del gusano plano. *Proc Natl Acad Sci USA* 116: 8505–8514.

Kleiner, M., Petersen, J.M. y Dubilier, N. (2012) Evolución convergente y divergente del metabolismo en simbiontes oxidantes de azufre y el papel de la transferencia de genes horizontales. *Curr. Opin. Microbiol.* 15: 621–631.

Mackenzie, L.S., Tyrrell, H., Thomas, R., Matharu, A.S., Clark, J.H. y Hurst, G.A. (2019) Valorización de la cáscara de naranja desechos para producir geles de corte de corte. *J. Chem. Educ.* 96: 3025–3029.

Ott, J.A., Novak, R., Schiemer, F., hentschel, U., Nebelsick, M. y Polz, M. (1991) abordan do el gradiente de sulfuro: una estrategia novedosa que involucra nematodos marinos y ectosimbiontes quimioautotróficos. *Marine Ecology* 12: 261–279.

Ritchie, H. y Roser, M. (2013) Uso de la tierra: nuestro mundo en datos. *OurWorldInData.org*.

Roeselers, G. y Newton, I.L.G. (2012) Sobre la ecología evolutiva de las simbiosis entre bacterias quimiosintéticas y bivalvos. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 94: 1–10.

Seah, B.K.B., Antony, C.P., Huettel, B., Zarzycki, J., Schada von Borzyskowski, L., Erb, T.J., et al. (2019) Symbiont s oxidantes de azufre sin genes canónicos para la fijación autotrófica Co 2. *MBio* 10: E01112-19.

Sogin, E.M., Leisch, N. y Dubilier, N. (2020) Simbiosis quimiosintéticas. *Curr. Biol.* 30: R1137 - R1142.

Stewart, F.J., Newton, I.L.G. y Cavanaugh, C.M. (2005) Endosimbiosis quimiosintéticas: adaptaciones a interfaces anóxicas oxic-exic. *Trends Microbiol.* 13: 439–448.

Treuer, T.L.H., Choi, J.J., Janzen, D.H., Hallwachs, W., Pérez-Aviles, D., Dobson, A.P., et al. (2017) Los desechos agrícolas de bajo costo aceleran la regeneración de bosques tropicales. *Restor. Ecol.* 26: 275–283.

Lectura adicional

Yong E. (2016) *I contain multitudes: The microbes within us and a grander view of life*. Casa aleatoria; 2016 18 de agosto.

Fenchel, T. y Finlay, B.J. (1995) *Ecology and Evolution in Anoxic Worlds*. 1^a ed. Oxford University Press, Oxford. Ackerman, D. (31 de agosto de 2020). Minería de aguas profundas: cómo equilibrar la necesidad de metales con impactos ecológicos.

Scientific American. <https://www.scientificamerican.com/article/deep-sea-mining-how-to-balance-need-for-metals-with-ecological-impacts1/beiserV>. (27 de febrero de 2017). Minería de arena: la crisis ambiental global de la que nunca ha oído hablar. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/cities/2017/feb/27/sand-mining-global-ambiental-crisis-never-heard>

Ayudas para enseñar - Vídeos

Symbiosis de aguas poco profundas *Kentrophoros*: vida con arena y azufre <https://vimeo.com/446257781> *Kentrophoros*: un baile simbiótico <https://vimeo.com/89605962> *Paracatenula* sp. <https://vimeo.com/290672261> Varios animales simbióticos del sedimento costero <https://vimeo.com/479952519> Disección de *Kuphus polythalamia*, información complementaria a Distel et al. 2017 <https://www.pnas.org/content/suppl/2017/04/14/1620470114.dcsupplemental> Deep Sea Symbiosis "Cómo sobreviven los gusanos de los tubos gigantes en los vasos hidrotérmicos | Con tre multitudes", presentados por ed yong https://youtu.be/8W_YWZHKR90 "VITENTROTE RMALES HIDERTERMALES EN EL SE SE SE" ", por marumtv <https://youtu.be/rtr6ggdWcjk> 40 años de exploración de ventilación hidrotermal

Fuentes de las imágenes de los collages

- *Solemya velum*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/file:solemya_velum_\(i1271\)_\(29011292636\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/file:solemya_velum_(i1271)_(29011292636).jpg) pSmithsonian Environmental Research Center, cc por 2.0 < <https://createComons.org/licenses/by/by/by/> Wikimedia Commons

- *Paracatenula*

https://commons.wikimedia.org/wiki/file:paracatenula_sediment_oj_2015.tif oliver jäckle, cc by-sa 4.0 < <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0> >, } <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0> >,},}, vo wikimedia

- *Riftia pachyptila*

https://commons.wikimedia.org/wiki/file:riftia_tube_worm_colony_galapagos_2011.jpg Programa de explorador de Okeanos Okeanos, Expedition de Galapagos Rift 2011, Public Domain, Via Wikimedia Commons

- *Leptonemella* sp.

de Piran, Eslovenia (c) Florian Sc harhauser, utilizado con permiso

- *Kentrophoros* sp.

https://commons.wikimedia.org/wiki/file:kentrophoros_from_isola_d%27elba.jpg pgkbseah, cc by-sa 4.0 < <https://createiveCommons.org/licenses/by-sa/4.0>

Glosario

Dióxido de carbono: un compuesto de carbono inorgánico (fórmula química CO_2) que es un componente de la atmósfera y también ambientes acuáticos (por ejemplo, agua de mar, agua del lago) en su forma disuelta. El dióxido de carbono se produce como un producto de desecho por respiración aeróbica, y es utilizado por organismos autótrofos (ver "Autotrofia") como plantas para producir una nueva biomasa. Por lo tanto, es una parte importante del ciclo de carbono en la Tierra.

Un marco educativo de microbiología centrado en la niñez

Quimiosíntesis: el uso de energía de reacciones químicas inorgánicas, por ejemplo, la oxidación del gas de hidrógeno por oxígeno, como la principal fuente de energía para alimentar la producción de biomasa por un organismo.

Fotosíntesis: el uso de la luz por un organismo como la principal fuente de energía para alimentar la producción de biomasa.

Autotrófica: producción de nueva biomasa por un organismo que utiliza solo compuestos inorgánicos (dióxido de carbono, metano) como fuentes de carbono. Las plantas, las cianobacterias y las bacterias oxidantes de azufre son ejemplos de autótrofos.

Heterotrofia: producción de nueva biomasa por un organismo que utiliza compuestos principal mente orgánicos, por ejemplo, azúcares, proteínas, ácidos grasos, como fuentes de carbono. Los humanos y las enterobacterias como *E. coli* son ejemplos de heterótrofos.

Mixotrófica: producción de nueva biomasa por un organismo que utiliza una mezcla de vías autotróficas (ver "Autotrófica") y heterotrófica (ver "Heterotrofia"). Muchas algas eucariotas (por ejemplo *Euglena*) y bacterias oxidantes de azufre (por ejemplo, *Beggiatoa*) son mixotróficas.

Producción primaria: en ecología, esto se refiere a la nueva biomasa (compuestos orgánicos) producidos a partir de dióxido de carbono por organismos autotróficos (ver autotrófica). Este término se aplica más comúnmente a nivel de sistemas (por ejemplo, la producción primaria neta de un ecosistema) en lugar de organismos individuales.

Fermentación: uso de compuestos orgánicos, especialmente carbohidratos, una fuente de energía sin involucrar la respiración.

Polímero: un compuesto químico que está hecho de unidades de repetición, formando cadenas largas que a veces también pueden estar ramificadas. Estos pueden ser de origen natural (por ejemplo, almidón, celulosa en células vegetales) o sintéticos (por ejemplo, poliéster, nylon).

Ventilación hidrotérmica: un tipo de característica geológica en el fondo marino donde se libera agua calentada por procesos geotérmicos. Este fluido de ventilación contiene productos químicos disueltos que provienen de rocas y sedimentos en la corteza. Algunos de estos productos químicos pueden ser utilizados por organismos quimiosintéticos para apoyar su crecimiento (ver "quimiosíntesis").

Valorización de residuos: el reciclaje de residuos, por ejemplo, desde procesos agrícolas o industriales, para ser reutilizados como materias primas para producir productos económicamente útiles.