

Microbios bioluminiscentes

*Mamá: Vi una maravillosa muestra de olas azules en la costa Anoche,
¿tienen algo que ver con las luciérnagas?*



Pat M. Fidopiastis, Ph.D.

California Politécnica Universidad Estatal, San Luis Obispo, California

Microbios bioluminiscentes

Historia

Los titulares sobre las "bacterias" aterradoras y las "superbacterias mortales" atraen invariablemente más atención que un titular sobre una bacteria brillante que vive pacíficamente dentro de una especie oscura de calamares. A pesar de la atención desproporcionada que reciben los microbios dañinos, la gran mayoría de las interacciones animales-microbios son en realidad beneficiosos mutuamente. Las bacterias bioluminiscentes son un ejemplo de un grupo carismático de microbios beneficiosos. Los miembros de este grupo pueden crecer dentro de los peces y los calamares, intercambiando la producción de luz para alimentos y un lugar seguro para vivir. A primera vista, parece paradójico que un microbio se beneficiaría al gastar cargas de energía para hacer luz. ¿Cómo podría brillar posiblemente beneficiar a un pequeño microbio que está nadando solo en el océano? Los dinoflagelados bioluminiscentes de células unicelulares pueden alcanzar densidades excepcionalmente altas en agua cálida y rica en nutrientes. Esto se llama dinoflagelado "Bloom", en el que los números de células aumentan tanto que ya no necesitamos un microscopio para verlos. No es sorprendente que estos microbios prosperen en la contaminación antropogénica y el cambio climático. Los dinoflagelados usan su bioluminiscencia colectiva para confundir a los depredadores.



Figura 1. Floración de dinoflagelados bioluminiscentes en Morro Rock (Morro Bay, CA)

Sin embargo, en comparación con los dinoflagelados, las bacterias bioluminiscentes son mucho más pequeñas, nunca alcanzan densidades celulares tan altas en el océano, y sus depredadores no tienen ojos que puedan confundirse con destellos de luz colectivos. Entonces, ¿cómo los beneficia la bioluminiscencia? La bacteria bioluminiscente *Vibrio fischeri*, que está estrechamente relacionada con muchos tipos de bacterias dañinas, tiene una respuesta inteligente a esta pregunta. Primero, las células *V. fischeri* fabrican *pheromone signals* - productos químicos que permiten a las bacterias comunicarse entre sí y que les permiten detectar sus hermanos. Si se detectan pocos hermanos, las células no harán luz. Esta forma de cooperación se llama detección de quórum y asegura que solo cuando se elaboren suficientes linternas pequeñas, hará suficiente luz para ser visible. "¿Cómo evitan que las señales de feromona floten?" y "¿Visible para quién?" son las preguntas correctas para hacer. De todas las bacterias en el océano, solo *V. fischeri* puede navegar por el guante de las defensas y nadar en el órgano de luz especializado del calamar bobtail hawaiano, *Euprymna scolopes* (Box 3). Una vez dentro, la bacteria vuelve a modelar su nuevo hogar y se les anima a adoptar un estilo de vida de "quedarse en casa", ya que los alimentos

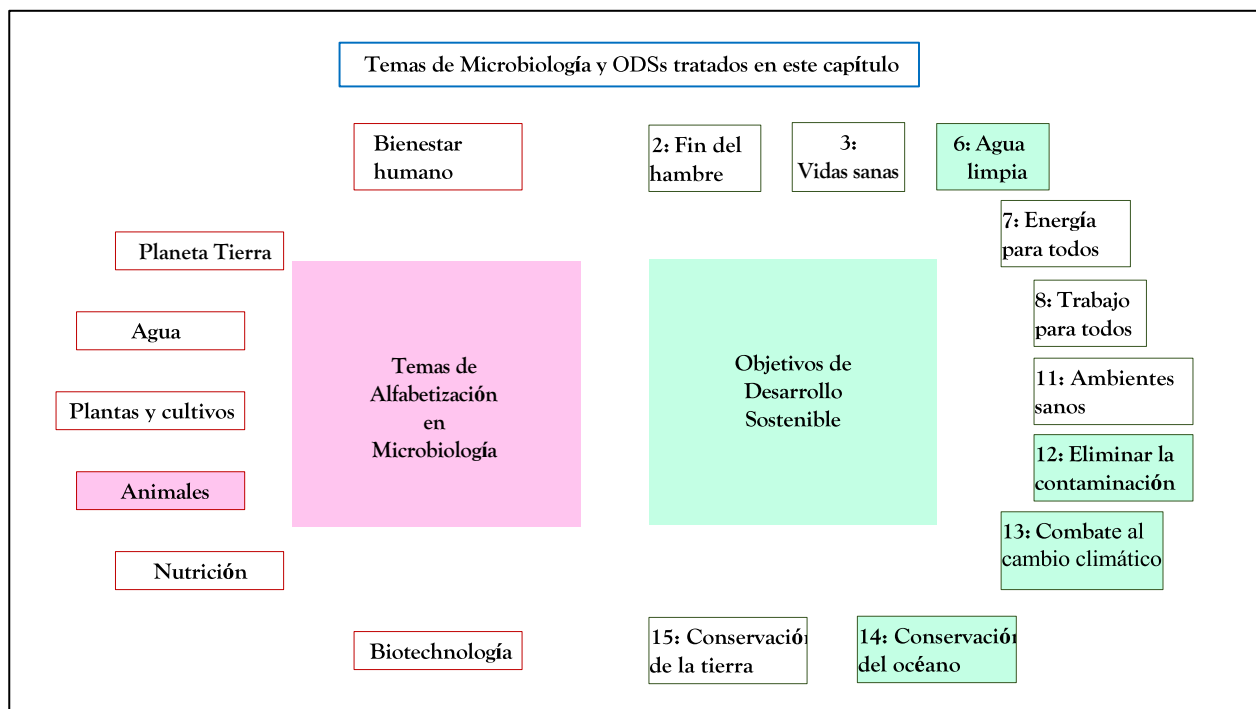
Un marco de educación en microbiología centrado en la niñez

derivados de los calamares se les entrega directamente a ellos. A cambio, las bacterias felizmente alimentadas combinan oxígeno y otros productos químicos para hacer luz, gracias a la acumulación de sus señales de feromona sensata de hermanos dentro del espacio confinado. El calamar luego usa sus tejidos especializados para proyectar la luz bacteriana en el medio ambiente para iluminar sus actividades nocturnas. Cuando sale el sol, el calamar se enterrará en arena suave hasta el anochecer, cuando resurjan.

El contexto de la microbiología y la sociedad

The microbiología: Evolución de bacterias dañinas y beneficiosas, influencia de bacterias beneficiosas en el sistema inmune, nutrición y desarrollo de tejidos en animales, influencia de la genética y fisiología bacteriana en el comportamiento y la ecología animal, cooperación entre bacterias beneficiosas, cooperación entre bacterias beneficiosas y su huésped animal.

Sustainability issues: salud animal, quórum en enfriamiento como alternativas a los antibióticos y una forma de inhibir la biofouling, capacidad de los animales para adaptarse al cambio climático, calidad del agua y dinoflagelados bioluminiscentes tóxicos, bioensayo de microtox para detectar toxinas ambientales, estudiar dinoflagelados bioluminiscentes tóxicos como una forma de comprender los efectos del cambio climático.

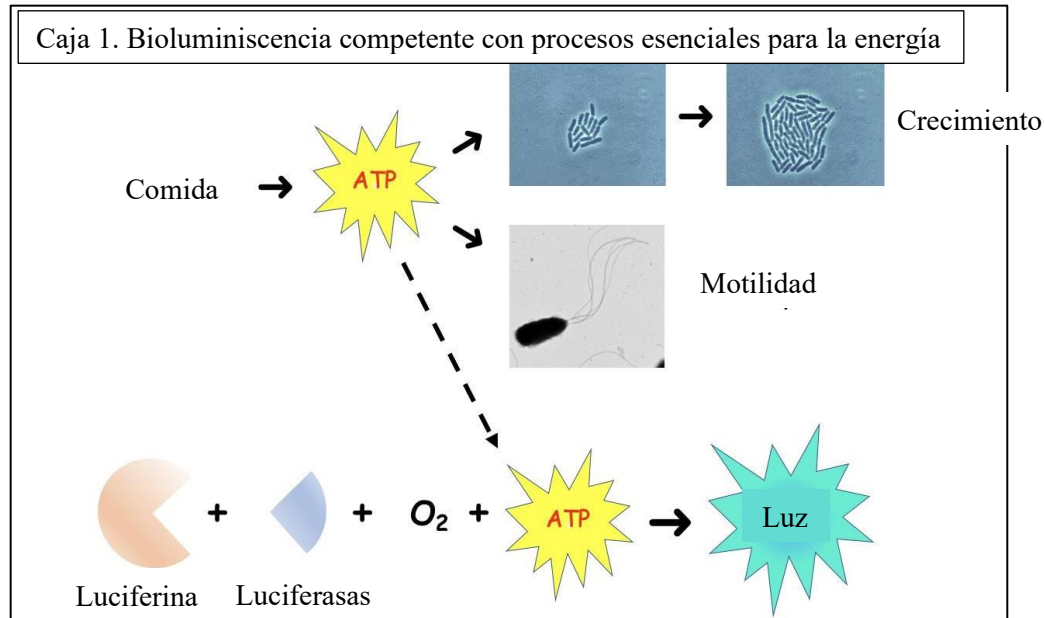


Microbios bioluminiscentes: la microbiología

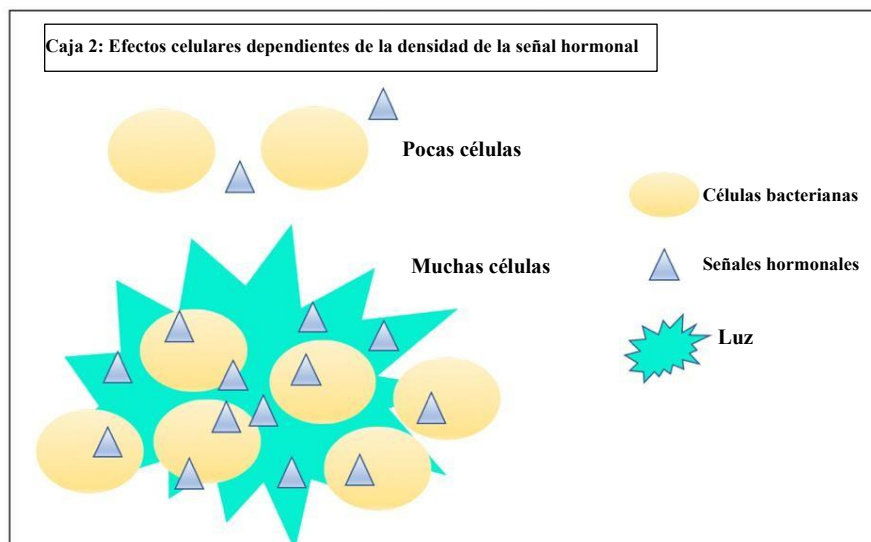
1. **La bioluminiscencia es energéticamente costosa.** bioluminiscencia en bacterias, moscas de fuego y dinoflagelados está mediado por oxígeno, un sustrato genéricamente conocido como "luciferina" y una enzima genéricamente conocida como "luciferasa". Sin embargo, sus respectivas luciferinas y luciferasas son productos químicos muy diferentes, y también lo son las reacciones genera doras de luz que realizan. Un tema consistente en estas reacciones muy diferentes es el gasto de la energía y, por lo tanto, la necesidad de un control cuidadoso. Las bacterias son pequeñas máquinas eficientes que prefieren no desperdiciar energía. Cada bit de energía (ATP) que obtienen de sus alimentos debe gastarse sabiamente en procesos esenciales,

Un marco de educación en microbiología centrado en la niñez

como la motilidad y el crecimiento. Sin embargo, allí es un costo adicional asociado con ser una bacteria bioluminiscente. Estas bacterias deben desviar parte de su energía lejos de los procesos esenciales para hacer luz (Box 1). ¿Cómo se aseguran las bacterias bioluminiscentes de que no están desperdiciando energía en la producción de luz?



2. **Bacterias utilizan señales de feromona para regular procesos importantes, como la bioluminiscencia.** Las células de bacterias bioluminiscentes no solo son buenas para cooperar con animales, sino que también son bastante buenas para cooperar entre sí a través de un proceso llamado "detección de quórum". Cada pequeña célula produce "feromonas" que se liberan al entorno circundante. Las feromonas se mueven libremente hacia las células vecinas y las estimulan a hacer chispas de luz. La señal de feromona se amplifica, especialmente en un espacio cerrado, a medida que aumenta el número de células vecinas. En las condiciones correctas, las chispas fugaces en algunas células dispersas eventualmente se amplifican en la población bacteriana en crecimiento y se convierten en *flames*. De esta manera, las bacterias bioluminiscentes pueden orquestar cuidadosamente la producción de luz y mantener la sinergia entre una cohorte de células relacionadas genéticamente (Cuadro 2).



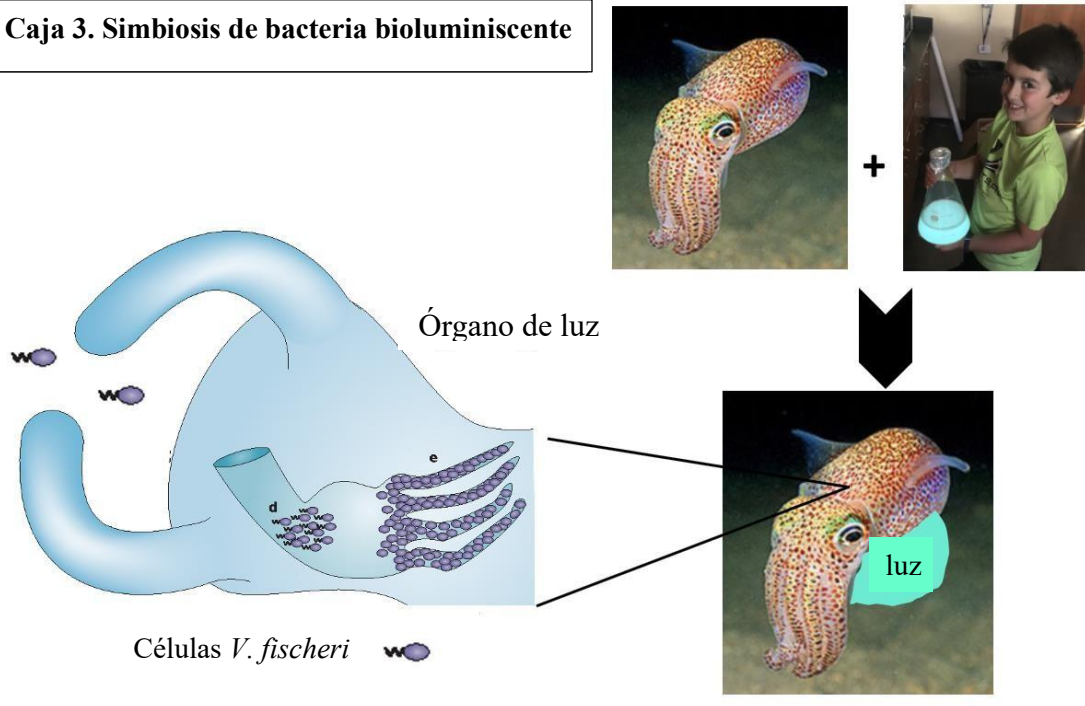
La detección de quórum se reconoció por primera vez en las bacterias bioluminiscentes,

pero ahora sabemos que esta forma de comunicación química es utilizada por muchos tipos de bacterias para orquestrar actividades diversas que requieren o se benefician de un esfuerzo de población coordinado, como un ataque a las defensas corporales por bacterias patógenas. Se pueden encontrar circuitos de detección de quórum similares tanto en bacterias bioluminiscentes beneficiosas como en sus parientes patógenos. Por ejemplo, mientras que *Vibrio fischeri* utiliza un circuito de detección de quórum particular para regular la bioluminiscencia, su relativo *V. cholerae* utiliza un circuito similar para regular las toxinas mortales que causan la diarrea y la producción de limo de biopelícula adhesiva.

3. ***La bioluminiscencia también está controlada por el medio ambiente.*** Las bacterias bioluminiscentes que nadan en el océano nunca alcanzan la densidad de población del plancton de células unicelulares mucho más grandes, llamados dinoflagelados, cuya bioluminiscencia dependiente de oxígeno puede iluminar el surf por la noche. Las bacterias bioluminiscentes solo son visibles cuando se mantienen cautivas en cultivo de laboratorio, o se congregan en tejidos animales, como cuando las células de *Vibrio fischeri* colonizan el órgano de luz de calamar especializado. Al estar en un espacio cerrado, ya sea un matraz de laboratorio o un órgano ligero, permite que las feromonas bacterianas acumulen y estimulen la producción de luz colectiva entre las células en crecimiento. Las bacterias bioluminiscentes requieren las condiciones ambientales correctas (es decir, oxígeno, nutrientes, temperatura, etc.) o la bioluminiscencia se desactivarán. La entrega de oxígeno y nutrientes al órgano ligero es cuidadosamente controlada por el animal. Sin embargo, el calamar tiene un control limitado sobre la temperatura o el contenido de oxígeno del entorno. Por la noche, cuando los calamares están activos, pueden usar su linterna bacteriana para ayudarlos a encontrar alimento y condiciones ambientales ideales. De esta manera, la pareja animal en una simbiosis bioluminiscente puede controlar la cantidad y la intensidad de la luz derivada de bacterias para satisfacer sus necesidades.

4. ***Las relaciones bacterias bioluminiscentes-animales se han perfeccionado durante millones de años.*** Hay miles de diferentes tipos de microbios en el agua de mar, pero solo las células de *V. fischeri* pueden navegar por la vía tensa hacia el órgano ligero especializado del calamar. Su viaje los lleva a través de conductos llenos de moco tóxico y viscoso, y una respuesta inmune vigorosa, antes de llegar a las cámaras interiores llamadas "criptas" (Cuadro 3). Dentro de estas criptas, las células *V. fischeri* crecen en nutrientes derivados de calamares, secretan feromonas y producen la cantidad de luz deseada, de lo contrario el calamar los expulsará. El órgano de luz de calamar claramente evolucionó sobre milenios con el único propósito de viviendo esta población particular de bacterias bioluminiscentes. El proceso de colonización de órganos ligeros es paralelo a la colonización bacteriana del tejido intestinal en muchos tipos de animales, particularmente aquellos con un intestino posterior agrandado, que al igual que el órgano ligero, probablemente evolucionó para albergar microbios beneficiosos. Sin embargo, en el caso del intestino posterior, no se alienta a los microbios a hacer luz, en su lugar ayudan a los bits de alimentos recalcitrantes de los animales (ver también el marco del tema *El Rumen*). Para colonizar el intestino, los microbios deben pasar una respuesta inmune vigorosa a medida que pasan a través de tejidos forrados de moco del esófago, el estómago de pH bajo y los intestinos.

Caja 3. Simbiosis de bacteria bioluminiscente

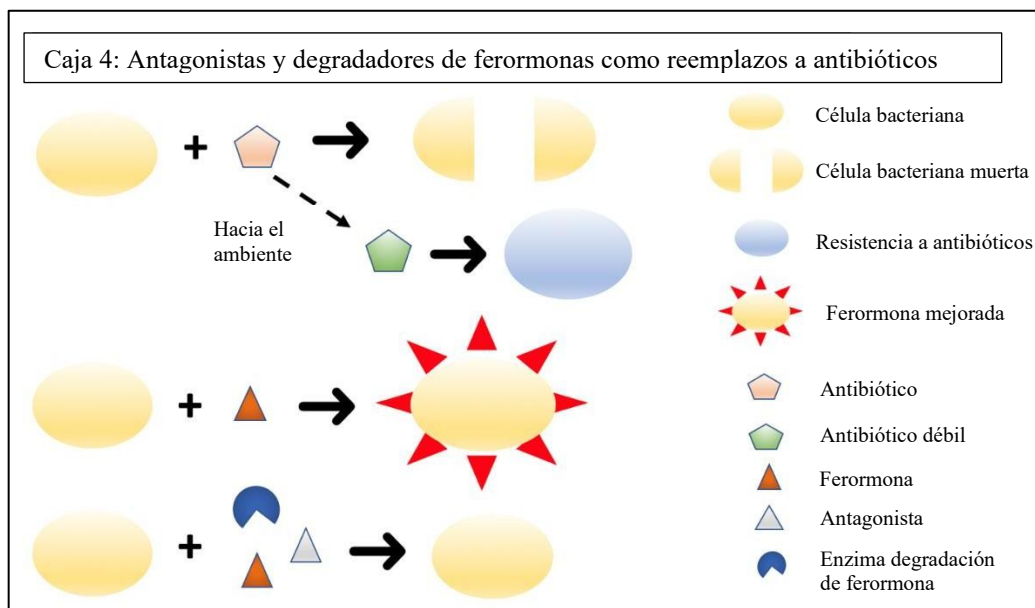


Relevancia para los objetivos de desarrollo sostenible y los grandes desafíos

- **Objetivo 6. Asegurar la disponibilidad y el manejo sostenible del agua y el saneamiento para todos** (agua potable segura, mejorar la calidad del agua, reducir la contaminación, proteger los ecosistemas relacionados con el agua, mejorar la gestión del agua y el saneamiento). Los biorreactores de membrana (MBRS) son una tecnología altamente efectiva en el tratamiento de aguas residuales. WASTWATER activará la producción de limo de biopelícula utilizando circuitos de detección de quórum similares como *V. fischeri*. Longevidad de los filtros de membrana.
- **Objetivo 12. Asegurar patrones de consumo y producción sostenibles** (lograr prácticas sostenibles de producción y uso/consumo, reducir la producción de residuos/liberación de contaminantes al medio ambiente, alcanzar ciclos de vida de residuo cero, informar a la población sobre prácticas de desarrollo sostenible). Ningún entorno en la Tierra es demasiado remoto para ser salvado de la contaminación antropogénica. Se pueden encontrar pesticidas, metales y otros contaminantes en todos nuestros ríos, lagos, océanos, sedimentos y suelos. Incluso las partes más profundas del océano no se eliminan del impacto humano. A medida que se agotan los recursos minerales terrestres, existe un creciente interés en la minería de aguas profundas. ¿Cómo se cuantificarán los impactos ecológicos de estas operaciones mineras de aguas profundas? Una estrategia importante para combatir la contaminación en cualquier entorno es la detección. En particular, la investigación básica sobre la bioluminiscencia condujo a un método rentable, rápido y confiable para detectar y cuantificar la contaminación ambiental: el ensayo Microtox. La energía para la bioluminiscencia proviene del metabolismo de los alimentos. Las sustancias tóxicas en las muestras ambientales interrumpirán el metabolismo. En el ensayo Microtox, las células de *V. fischeri* están expuestas a muestras ambientales, y las interrupciones en la bioluminiscencia se correlacionan con el grado de toxicidad de una muestra ambiental. La contaminación de los antibióticos, principalmente de las plantas de tratamiento de aguas residuales, las granjas y la acuicultura, es una enorme crisis de salud pública que recibe poca atención. ¿Qué pasaría si

Un marco de educación en microbiología centrado en la niñez

pudiéramos usar feromonas terapéuticas en lugar de antibióticos para combatir las infecciones bacterianas? Las bacterias producen feromonas que pueden desencadenar capacidades mejoradas entre su población, como la producción de limo o toxinas de biopelículas. Los cambios dirigidos a la estructura química de las feromonas pueden dar lugar a moléculas antagonistas que confunden los circuitos de detección de quórum de los microbios mortales mientras tienen un efecto mínimo en los circuitos no objetivo. Se sabe que las plantas producen una amplia variedad de antagonistas de detección de quórum, presumiblemente para prevenir la colonización por los patógenos. Estos antagonistas de feromonas naturales podrían convertirse en una nueva clase de antimicrobianos. Alternativamente, o además, las enzimas degradantes de feromonas podrían usarse para interrumpir los circuitos de detección de quórum de los patógenos. Por lo tanto, las feromonas podrían mitigar el uso de antibióticos, reduciendo así estos contaminantes ambientales. Presumiblemente, debido a que las feromonas terapéuticas modifican principalmente el comportamiento bacteriano sin matarlas, es menos probable que fomenten el desarrollo de la resistencia (Cuadro 4).



- **Objetivo 13. Tome medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos** (*reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mitigar las consecuencias del calentamiento global, desarrollar sistemas de alerta temprana de las consecuencias del calentamiento global, mejorar la educación sobre la producción de gases de efecto invernadero y el calentamiento global*). El cambio climático ya está teniendo efectos medibles en todo, desde la frecuencia y la intensidad de los huracanes, las sequías y los incendios salvajes, hasta las propiedades químicas fundamentales de nuestros océanos. A medida que aumentan las temperaturas del océano, las bacterias bioluminiscentes y sus huéspedes animales deben adaptarse sincrónicamente, o estas relaciones no serán sostenibles, lo que dará como resultado la pérdida de biodiversidad única. El aumento de las temperaturas del océano también significa disminuir los niveles de oxígeno disuelto. ¿Cuáles serán los efectos a largo plazo del agotamiento del oxígeno sobre la capacidad de las bacterias bioluminiscentes para llevar a cabo la producción de luz dependiente de oxígeno dentro de su huésped animal?

Las aguas más cálidas han aumentado el rango doméstico de los dinoflagelados bioluminiscentes. Estos microbios no solo producen toxinas, sino que son depredadores voraces de diatomeas. Las diatomeas son plancton fotosintético que fijan enormes cantidades de CO₂ en carbono orgánico (por ejemplo, azúcar). Además, a medida que las diatomeas mueren, arrastran toneladas de carbono al océano profundo. Por lo tanto, las diatomeas son un firewall importante contra los niveles ascendentes de CO₂ y cumplen un papel esencial en el ciclo de carbono. Si bien estos dinoflagelados bioluminiscentes crean hermosas exhibiciones de luz, simbolizan un océano en apuros. No se puede subestimar el papel de los dinoflagelados bioluminiscentes para exacerbar los efectos del cambio climático. Estudiar flores de dinoflagelados será un componente esencial de la pesca relacionada con el clima y la gestión de la acuicultura, así como un sistema de advertencia para problemas de salud pública relacionadas con el clima.

- **Objetivo 14. Conserve y use de manera sostenible los océanos, mares y recursos marinos para el desarrollo sostenible** (*prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la procedente de actividades terrestres, incluidos los desechos marinos y la contaminación por nutrientes*). Las flores de dinoflagelados bioluminiscentes tóxicos se preceden típicamente al calentamiento de las aguas y una infusión de contaminación de nutrientes de fuentes antropogénicas como la escorrentía de la granja y los derrames de aguas residuales. Durante el día, estas flores pueden aparecer como eventos de "marea roja", en los que los pigmentos fotosintéticos colorean el agua. Al rastrear estas flores, deberíamos poder identificar y mitigar fuentes de contaminación.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. Individual

a. Las ondas bioluminiscentes son hermosas, pero están formadas por dinoflagelados formadores de toxinas. Las toxinas dinoflageladas pueden causar problemas neurológicos, como la desorientación, las náuseas, los vómitos y la parálisis. La necesidad de sumergirse en ondas bioluminiscentes para capturar la "selfie" perfecta debe sopesarse contra el potencial de efectos secundarios tóxicos.

b. Las bacterias bioluminiscentes forman asociaciones con calamares que viven en aguas poco profundas con fondos arenosos suaves en lugares como Hawái, Japón, Francia y Australia. Al pisotear estos hábitats, ¿qué impacto pueden tener los bañistas en estas asociaciones simbióticas?

2. Políticas comunitarias y nacionales

a. Los gobiernos locales deben usar ondas bioluminiscentes como indicador de

Un marco de educación en microbiología centrado en la niñez

degradación ambiental.

b. Las pruebas y observación regulares (por ejemplo, tecnología microtox, rastreo de flores bioluminiscentes) deben informar políticas que mitigan la contaminación y limiten la exposición pública a entornos contaminados.

c. Deberíamos continuar aprovechando la investigación sobre la regulación de la bioluminiscencia bacteriana en aras de un ambiente más limpio (por ejemplo, microbios de "enfriamiento de quórum" en filtros de purificación de agua para evitar la biofouling)

d. Financiación gubernamental para aplicaciones en investigación de bioluminiscencia y salud ambiental (por ejemplo, tecnologías microTOX, alternativas de feromonas a fungicidas y pesticidas; control de flores de dinoflagelados)

e. Financiación del gobierno para aplicaciones en la investigación relacionada con la bioluminiscencia sobre la salud de los animales (por ejemplo, enzimas degradantes de feromonas y análogos de feromonas como alternativas a los antibióticos; formas de controlar las flores de dinoflagelados)

f. Las asociaciones de bacterias se encuentran típicamente a lo largo de la costa en áreas con fondos suaves y arenosos. ¿Qué efecto podrían tener los baños en estos entornos? ¿Deberían protegerse estos entornos?

Participación de la pupila

1. *Discusiones de clase sobre la ciencia de la bioluminiscencia y las simbiosis bioluminiscentes*

2. *Conciencia de lo interesante para el alumno*

a. ¿Cómo ayudan los microbios beneficiosos a los animales? (por ejemplo, papel de la bioluminiscencia en asociaciones de bacterias animales).

b. ¿Cómo podrían los microbios bioluminiscentes amenazar la salud pública?

c. ¿De qué manera puede la investigación de bioluminiscencia mejorar la salud pública? (por ejemplo, sistemas modelo para estudiar la colonización beneficiosa de tejido, reguladores de bioluminiscencia, sus homólogos y degradantes como nuevas clases de antibióticos y pesticidas, bioluminiscencia como una forma de detectar toxinas y fuentes de contaminación, etc.

d. ¿Cómo podría el cambio climático afectar los microbios bioluminiscentes?

3. *Ejercicios*

a. ¿Cómo podríamos usar la tecnología para observar las formas en que los animales usan bioluminiscencia en su vida diaria? Conéctese con un acuario que mantiene animales con simbiontes bacterianos bioluminiscentes (por ejemplo, el acuario de Tennessee, exhibición de la linterna del acuario de Waikiki).

b. Diseñe un plan para monitorear las mareas rojas de día y surf bioluminiscentes por la noche. ¿Qué medidas se pueden tomar para notificar al público sobre los peligros potenciales e identificar la (s) fuente (s) de la contaminación que fomenta la floración de los dinoflagelados?

c. Establezca una reunión (virtual o en persona) con expertos en el campo de la bioluminiscencia para discutir los sistemas modelo y las contribuciones de la detección de quórum y la bioluminiscencia en la salud pública.

La base de evidencia, lectura y enseñanza adicionales

M.V. y D. Iglesias-Rodriguez (2013) Comprender la bioluminiscencia en los dinoflagelados, ¿cuán

Un marco de educación en microbiología centrado en la niñez

lejos hemos venido? *Microorganisms* 1 (1): 3–25.

- K. J. Boettcher y, p. Ruby (1990) Emisión de luz deprimida por simbiótico *Vibrio fischeri* del calamar sepiolid *Euprymna scolopes*. *J. Bacteriol.* 172: 3701-6. 3. S.V. Nyholm y M.J. McFall-Ngai (2004) The Winnowing: Estableciendo la simbiosis Squid- *Vibrio*. *Nat rev microbiol.* 2: 632-42. 4.
- M. Whiteley, S.P. Diggle y E.P. Greenberg (2017) Sensación de quórum bacteriano: el progreso y la promesa de un área de investigación emergente. *Nature* 551: 313-320. 5. D.D. Zwart y W. Slo of (1983). El microtox como un ensayo alternativo en la evaluación de toxicidad aguda de los contaminantes del agua. Instituto Nacional de Suministro de Agua. *Aquatic Toxicology* 4: 129-138. 6.
- N. Bouayed, N. Dietrich y C. Lafforgue, C-H. Lee y C. Guigui. 2016. Revisión orientada al proceso del enfriamiento del quórum bacteriano para la mitigación de biofouling de membrana en biorreactores de membrana (MBRS). *Membranes* 2016, 6, 52. 7.
- M. L. Wells, V.L. Trainer, T.J. Smayda, B.S.O. Karlson, c.g. Truco, R.M. Kudela, A. Ishikawa, S. Bernard, A. Wulff, D.M. Anderson y W.P. Cochlan (2015). Floraciones de algas dañinas y cambio climático: aprender del pasado y el presente para pronosticar el futuro. *Harmful Algae* 49: 68-93.
- Cómo los peces de linterna nadan juntos en la oscuridad. https://www.youtube.com/watch?v/v14hh4legu-kb_e9.
- Squid Glowing-Science Nation <https://www.youtube.com/watch?v/v15}x5-vejyzrc410>.
- Symbiosis más linda de la naturaleza: The Bobtail Squid | I Contate MultiTudes. <https://www.youtube.com/watch?v17}3ivmsci-y2q>

Glosario

Antropogénico: Causado por los seres humanos.

Antibiótico: Sustancia química natural o sintética utilizada para matar bacterias o inhibir su crecimiento.

ATP: Fuente química de energía en las células vivas (trifosfato de adenosina).

Biofilm: Grupo de microbios unidos por un limo pegajoso.

Biofouling: Formación de biofilm en una superficie.

Bioluminiscencia: Producción y emisión de luz por un organismo vivo.

Diatomea: Algas microscópicas que utilizan la luz solar para producir energía y alimentos.

Dinoflagelado: Plancton microscópico, algunos pueden producir bioluminiscencia y toxinas.

Fungicida: Sustancia química que mata la levadura, el moho u otros hongos.

Un marco de educación en microbiología centrado en la niñez

Bacterias carnívoras: Bacterias capaces de dañar la piel y el tejido subyacente.

Órgano luminoso: Estructura especializada de ciertos animales colonizada por bacterias bioluminiscentes.

Luciferasa: Sustancia química necesaria para la bioluminiscencia.

Luciferina: Sustancia química necesaria para la bioluminiscencia.

Biorreactor de membrana: Combinación de métodos, incluyendo filtros, para limpiar aguas residuales.

Mucus: Baba producida por animales para proteger ciertas superficies corporales.

Nocturno: Se produce por la noche.

Pesticida: Sustancia química utilizada para matar insectos dañinos u otras “plagas”.

Feromona: Sustancia química producida por un organismo que cambia el comportamiento de otro organismo.

Análogo de feromona: Sustancia química que se parece mucho a una feromona pero difiere en su actividad.