

Acuicultura

Freddie, ¿estas hermosas especies marinas también están infectadas por el coronavirus? No, Lou, pero estos animales tienen sus propios problemas.



Alanis Bach¹, Matias Colin¹, Loïcia Gueguen¹, Leo Not¹, Alana Robert¹, Lou Sevin¹, Leoni Thiebaut¹ and Frederique Le Roux^{1,2},



¹Sorbonne Universités, UPMC Paris 06, CNRS, UMR 8227, Biología Integrativa de Modelos Marinos, Estación Biológica de Roscoff, CS 90074, F-29688 Roscoff cedex, Francia; y ²Ifremer, Unidad de Fisiología Funcional de los Organismos Marinos, ZI de la Pointe du Diable, CS 10070, F-29280 Plouzané, Francia.

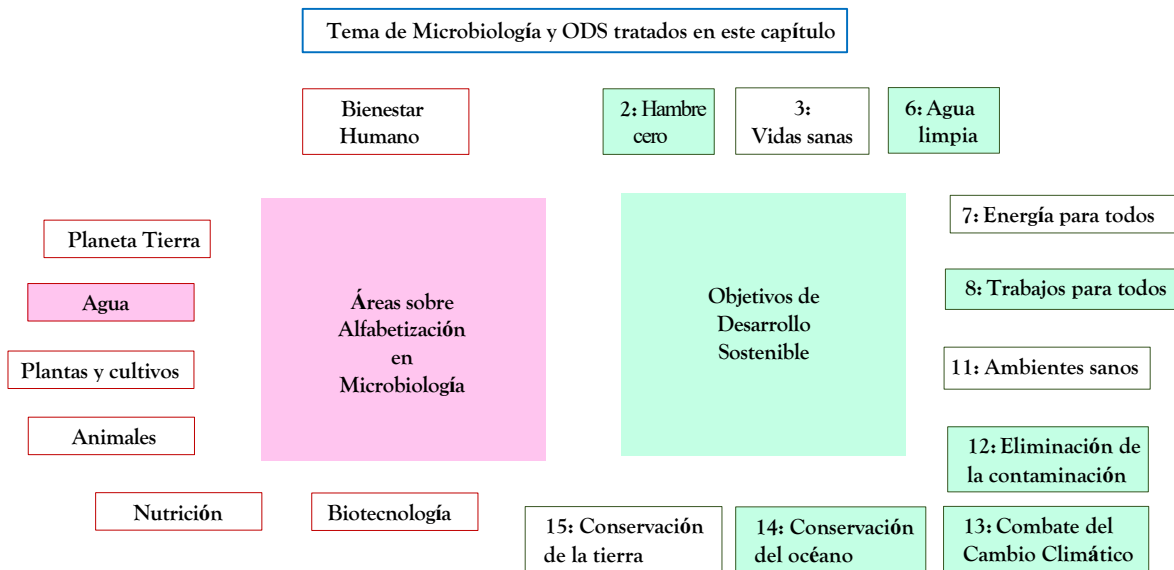
Acuicultura*

Historia

Las enfermedades infecciosas amenazan la supervivencia a largo plazo de las poblaciones comerciales y naturales de especies marinas. Nuestra comprensión y gestión de las enfermedades son de vital importancia, ya que la acuicultura es un aspecto importante para hacer frente a la inminente escasez mundial de alimentos. La gestión de las enfermedades debe tener en cuenta la fragilidad del medio ambiente y mantener ecosistemas estables en todas las escalas de la vida. En particular, el uso intensivo de antibióticos en la ganadería supone un riesgo importante no solo para la salud pública, sino también para la biodiversidad. Los antibióticos, que no tienen ningún efecto sobre los virus, actúan sobre una amplia gama de bacterias, tanto las perjudiciales como las necesarias para el equilibrio biológico. El uso de antibióticos favorece la aparición de bacterias resistentes, que pueden ser responsables de epidemias o incluso **pandemias** en un futuro próximo. Por lo tanto, la investigación se centra en alternativas “ecológicas” a los antibióticos, como el uso de bacteriófagos, que son virus muy abundantes en los medios acuáticos capaces de infectar solo a las bacterias.

El contexto de la microbiología y la sociedad

Microbiología: agentes infecciosos asociados con enfermedades de especies marinas; virus, bacterias, protozoos; microbios buenos y malos; contaminación; enfoques profilácticos y terapéuticos; vacunación; antibióticos; probióticos, prebióticos; terapia con fagos. *Cuestiones de sostenibilidad:* acuicultura; apoyo alimentario, ácidos grasos omega-3, prevención de la sobrepesca; reintroducción de especies; alternativas ecológicas; creación de empleo; gastronomía; invasión de especies no endémicas; degradación de los ecosistemas; eutrofización.



* **Nota de Frederique Le Roux:** La pandemia del coronavirus y la obligación de confinamiento dieron a los autores (de entre 7 y 15 años) la oportunidad de trabajar a distancia sobre un tema relacionado con las enfermedades infecciosas no humanas vinculadas a la calidad del medio ambiente. Primero discutimos un esquema general en cuatro temas: acuicultura, enfermedades infecciosas, antibióticos y alternativas ecológicamente responsables. Cada uno de los autores buscó información sobre estos temas, definiciones, ventajas y desventajas. Esta información se intercambió por escrito y luego se discutió durante videoconferencias semanales. Se redactó una síntesis que fue criticada por todos los autores. Las palabras difíciles de entender se definieron en un glosario para que los jóvenes pudieran comprender el artículo. Los artistas se expresaron a través de las ilustraciones. Durante estas semanas, me impresionó la seriedad de los autores, su motivación, su creatividad, su espíritu crítico y su autonomía en el trabajo. ¿No son estas todas las cualidades necesarias para ser científico?

Acuicultura: la microbiología

1. **¿Qué es la acuicultura?** La acuicultura es una fuente de riqueza, y con razón. La palabra acuicultura proviene de los términos latinos “aqua” y “cultura”, que significan “agua” y “cultivar”, respectivamente. “Cultura” se refiere al cuidado de la tierra, pero también a la atención prestada al espíritu. Por lo tanto, la acuicultura puede definirse como el cuidado que se presta al cultivo de especies que viven en un medio acuático (agua dulce, **salobre** o salada), ya sean animales, algas o plantas (Figura 1). La acuicultura incluye la piscicultura (cría de peces), la maricultura (cría de mariscos), la algicultura (macro y microalgas), la carcinocultura (crustáceos) y la coralicultura (corales). Se crían especies acuáticas de diversos tamaños para la alimentación, la **farmacopea** y los acuarios.

PECES	Salmón Lubina Dorada Carpa Lucio Trucha
MARISCOS	Mejillón Ostra plana Ostra japonesa Ostra perlífera Vieiras Almeja
CRUSTÁCEOS	Camarón Cangrejo de río
CORAL	Coral
ALGAS	Wakame Kombu
PLANTAS	Acorus gramineus Barclaya Bacopa



Fig. 1 Las diferentes especies criadas en entornos acuáticos, incluidas las especies introducidas.

2. **La acuicultura tiene ventajas.** Las **proteínas** animales son una fuente esencial de alimento para los seres humanos. La cría intensiva de animales terrestres para la producción de carne o leche (ganado vacuno, ovino) tiene profundos impactos ambientales. Entre ellos se incluyen, por ejemplo, la emisión de gases de efecto invernadero o la deforestación causada por el cultivo de piensos para animales. La producción de proteínas animales a partir de especies acuícolas podría, por lo tanto, parecer una alternativa ecológica, especialmente porque ayuda a preservar las especies marinas amenazadas por la sobrepesca. También permite la reintroducción en el medio ambiente de animales que han desaparecido debido a la sobrepesca, la contaminación o las enfermedades. Los pescados grasos (por ejemplo, el salmón), los crustáceos y los moluscos proporcionan una gran cantidad de ácidos grasos omega-3 que son esenciales para los seres humanos. La acuicultura crea puestos de trabajo (tanto para hombres como para mujeres) y, para algunas regiones del mundo, es un componente importante de la industria de procesamiento de alimentos. Asia, el continente más poblado del planeta, es el mayor consumidor de especies acuáticas. La producción pesquera se estima en 80 millones de toneladas para la pesca y 52 millones de toneladas para la acuicultura, y sigue creciendo. Por último, la acuicultura no solo tiene como objetivo satisfacer la necesidad de alimentos, sino también el disfrute, ya sea gastronómico, decorativo en un acuario o incluso dedicado al diseño de joyas en el caso de las perlas cultivadas.

3. La acuicultura tiene sus inconvenientes. Los peces también se alimentan de proteínas animales. La producción de 1 kg de pescado requiere entre 3 y 7 kg de harina animal, que a su vez se elabora a partir de peces silvestres. Esto plantea dudas sobre el impacto positivo de la piscicultura en la lucha contra la sobrepesca. Los animales (por ejemplo, las ostras) pueden escapar de la zona de cría y crecer en el medio natural en detrimento de otras especies. Lo mismo ocurre con las algas introducidas por el hombre, que pueden invadir el medio ambiente más allá de su zona de cultivo. Si estos animales se introducen desde otras regiones o países, pueden facilitar la aparición de nuevas enfermedades. Al igual que en la agricultura, la práctica intensiva de la acuicultura puede provocar la degradación de los **ecosistemas**. Por un lado, los animales producen excrementos que se depositan en el fondo. Esta **materia orgánica** es utilizada como alimento por los microbios para **proliferar**, utilizando el oxígeno disponible y asfixiando a los organismos acuáticos que viven cerca del fondo. Los excrementos también contienen y liberan nitrógeno y fósforo, lo que permite que las microalgas fotosintéticas “florezcan” —crezcan en grandes cantidades—, un proceso denominado eutrofización. Y cuando estas microalgas mueren, también son utilizadas como alimento por los microbios, lo que agota aún más el oxígeno del agua y asfixia a más organismos acuáticos. Por otra parte, el establecimiento de zonas de cría puede provocar la destrucción de hábitats naturales, como ya ocurre con los manglares. Por último, la agricultura intensiva, ya sea acuícola o terrestre, está asociada a la aparición de enfermedades. Los animales son muy numerosos para el poco espacio que ocupan. Cuando se mueven, pueden lesionarse por contacto. El entorno confinado, rico en materia orgánica y microbios, favorece las infecciones, que se transmiten con mayor rapidez debido a que el contacto entre los animales es frecuente. El uso masivo de medicamentos como los antibióticos para reducir las enfermedades causa profundos daños al ecosistema circundante.

4. Los microbios son la causa de las enfermedades infecciosas en las especies criadas en granjas. La palabra microbio proviene de los términos griegos “mikros” y “bios”, que significan “pequeño” y “vida”, respectivamente. Estos organismos invisibles a simple vista, que solo pueden observarse con un microscopio (Figura 2), se describen detalladamente en la sección 1, por lo que aquí nos centraremos en los microbios que causan infecciones en la acuicultura. Las enfermedades infecciosas causadas por microbios afectan a muchas especies de fauna silvestre y ganado, con consecuencias económicas para la pesca o la acuicultura. Entre los ejemplos de enfermedades mejor descritos, el 25 % son causadas por virus, el 34 % por bacterias y el 19 % por protozoos. La mayoría de estos microbios provocan la mortalidad de las especies. Por ejemplo, en la década de 1970, un virus (iridovirus) diezmó las ostras (*Crassostreae angulata* u ostras portuguesas) en Francia. Los ostricultores importaron entonces en masa otra especie de ostra de Japón (*Crassostreae gigas*), que era resistente a este virus. Otro virus (un virus del herpes) y bacterias (vibrios) amenazaban ahora la sostenibilidad de la producción de ostras en todo el mundo. En Estados Unidos, el protozoo *Perkinsus marinus* causa enfermedades y mortalidad en las ostras adultas del este (*Crassostrea virginica*). Otros microbios solo afectan al crecimiento de las especies o a su comercialización. Por ejemplo, una bacteria llamada *Vibrio tapetis* afecta al crecimiento de las almejas en Europa. UN parásito microscópico llamado Kudoa (el nombre científico de este tipo de parásito es mixospórico) infecta a los peces marinos. Este parásito provoca una “mioliquefacción” post mortem, es decir, un ablandamiento de la carne hasta tal punto que el pescado se vuelve invendible. La mayoría de los microbios que causan daños a las especies marinas no son capaces de infectar a los seres humanos.

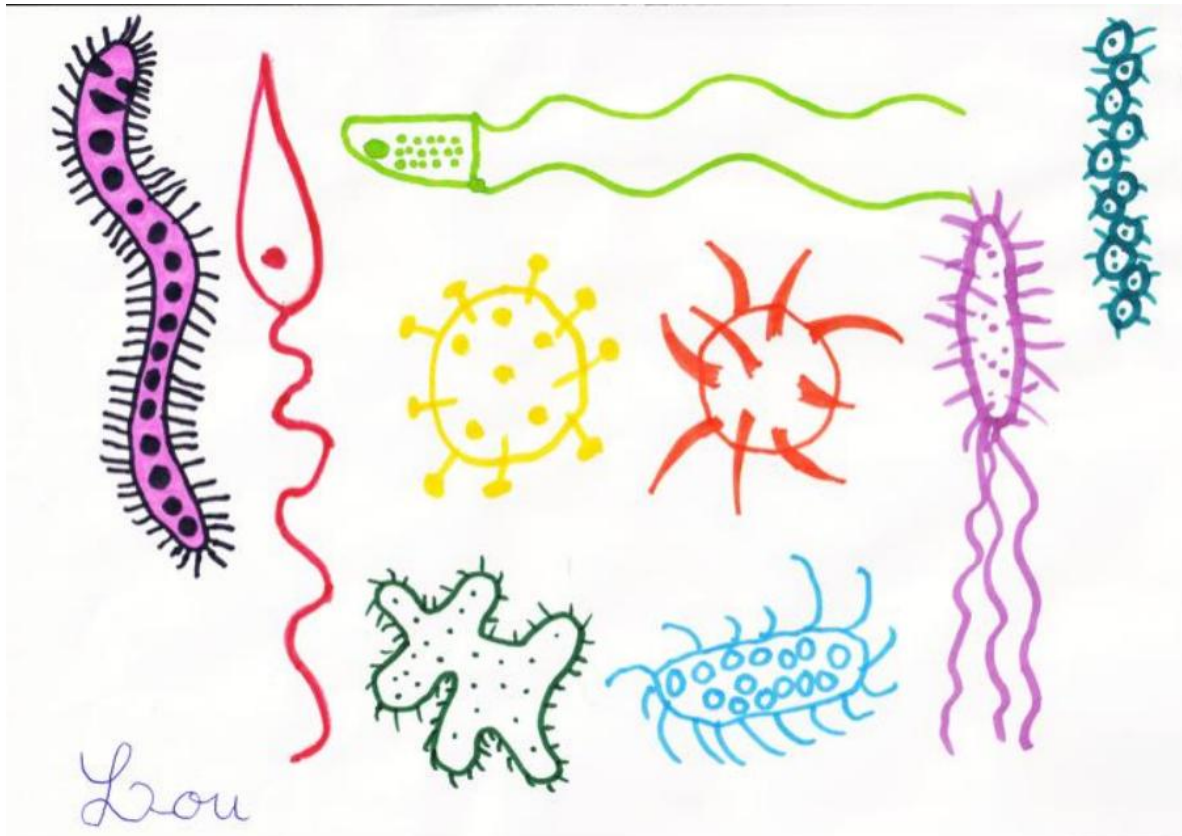


Fig. 2 Los microbios tienen formas muy diversas.

5. Algunas enfermedades infecciosas pueden transmitirse de las especies de peces y mariscos a las personas. Los microbios que infectan a los animales marinos también pueden causar enfermedades en los seres humanos, conocidas como zoonosis. Las zoonosis son principalmente infecciones asociadas con bacterias. Estas infecciones a menudo no enferman a los animales, pero pueden causar enfermedades graves en los seres humanos, especialmente si estos se encuentran debilitados (inmunosupresión, enfermedad crónica, embarazo). Por ejemplo, varias especies de *Mycobacterium* infectan a una amplia variedad de especies de peces. En algunos casos, estas bacterias causan enfermedades en los peces. En la mayoría de los casos, los peces son asintomáticos, es decir, están sanos a pesar de la presencia de las bacterias. La transmisión a los seres humanos se produce a través del contacto con una lesión cutánea al sumergirse en agua contaminada: acuarios, y más raramente agua de ríos o lagos. Las personas infectadas con esta bacteria pueden desarrollar “granulomas” que aparecen como llagas o nódulos en la piel, generalmente en las manos. Las personas inmunodeprimidas pueden desarrollar una enfermedad pulmonar similar a la tuberculosis. *Vibrio* y *Salmonella* son bacterias patógenas que pueden transmitirse por contacto con una herida, pero también por ingestión de agua o consumo de animales marinos crudos (por ejemplo, ostras). Estas bacterias pueden causar gastroenteritis con vómitos y diarrea. En personas inmunodeprimidas puede producirse una infección más grave y potencialmente mortal, la septicemia. Podemos protegernos de la mayoría de estas enfermedades siguiendo procedimientos básicos de higiene, como protegernos las manos con guantes (especialmente si tenemos llagas) al manipular el agua del acuario. Es importante familiarizarse con los animales con los que entramos en contacto y las posibles enfermedades zoonóticas asociadas a cada especie. También se debe evitar comer animales crudos que no estén bajo vigilancia sanitaria. Por eso, a veces se prohíbe la pesca desde la costa. Por último, es aconsejable congelar ciertos pescados que se comen en forma de sushi o tartar 7 días antes de consumirlos crudos. Esto es para evitar la presencia de otro tipo de parásito, más grande que los microbios, llamado Anisakidae. De hecho, se trata de un gusano. Aunque los casos de infección humana por este parásito son bastante raros en Francia (unos 10 casos al año), pueden ser muy graves (perforación del estómago).

6. El control de las enfermedades depende de la especie criada y del agente infeccioso. Existen dos medios principales para controlar las enfermedades infecciosas: la profilaxis y la terapia. La profilaxis es la prevención de la infección y la propagación del agente infeccioso. Implica mejorar las prácticas ganaderas para evitar que las especies se encuentren en un estado de debilidad, por ejemplo, reduciendo el número de animales en la granja. También se trata de evitar que el entorno sea propicio para el desarrollo de agentes infecciosos, por ejemplo, limpiando y desinfectando las instalaciones. Los animales también pueden protegerse estimulando su sistema inmunitario o vacunándolos. En los seres humanos, el consumo de fruta y su aporte de vitamina C estimulan las **defensas inmunitarias**. Lo mismo podría ocurrir con los “remedios caseros”, como el aceite esencial de orégano, las semillas de pomelo o de coco, el vinagre de sidra, la miel, el ajo o los alimentos fermentados. En los animales de granja, se pueden añadir al pienso ciertos compuestos, en particular azúcares extraídos de algas, para estimular las defensas inmunitarias.

La vacunación consiste en inocular un microbio inactivado (o parte del microbio) para inducir una respuesta inmunitaria en el animal, que persiste en el tiempo, conocida como memoria inmunitaria. Esta inmunidad se basa en la actividad de los glóbulos blancos llamados linfocitos. En particular, estas células controlan la producción de anticuerpos, moléculas que reconocen las partículas “no propias”. La ausencia de linfocitos en los invertebrados sugiere que estos animales no tienen un sistema inmunitario con memoria y, por lo tanto, no pueden ser vacunados. Sin embargo, también existe alguna forma de memoria inmunitaria en los invertebrados, aunque los mecanismos implicados solo se conocen parcialmente. Esta memoria inmunitaria permite, por ejemplo, prevenir ciertas enfermedades infecciosas en los camarones. Un último medio de profilaxis, aplicable tanto a vertebrados como a invertebrados, consiste en seleccionar animales resistentes a los agentes infecciosos. Cuando esta resistencia se transfiere a las generaciones posteriores, hablamos de selección genética. Esta selección genética no está exenta de riesgos. Por un lado, va en contra de la diversidad natural y, por otro, puede asociarse a desventajas como un menor crecimiento o la susceptibilidad a otras enfermedades.

La terapéutica es el uso de un tratamiento (medicación) para curar una enfermedad o aliviar sus síntomas. En el campo de la acuicultura, la terapéutica se centra exclusivamente en el control de las infecciones bacterianas. En particular, esto implica el uso de antibióticos.

7. ¡Los antibióticos no son automáticos! La palabra antibiótico proviene de los términos griegos “anti” y “bios”, que significan respectivamente “contra” y “vida”. Alexander Fleming descubrió el primer antibiótico en 1928. Fue por casualidad que observó que un hongo que había contaminado sus cultivos bacterianos (*staphylococcus*) secretaba una sustancia antimicrobiana, la penicilina (Figura 3). En el contexto de la Segunda Guerra Mundial, este descubrimiento fue el punto de partida de la era de los antibióticos (1942-2000). También ilustra una famosa cita de Louis Pasteur, pionero en microbiología, que dice que “la suerte solo favorece a las mentes preparadas” (1854).

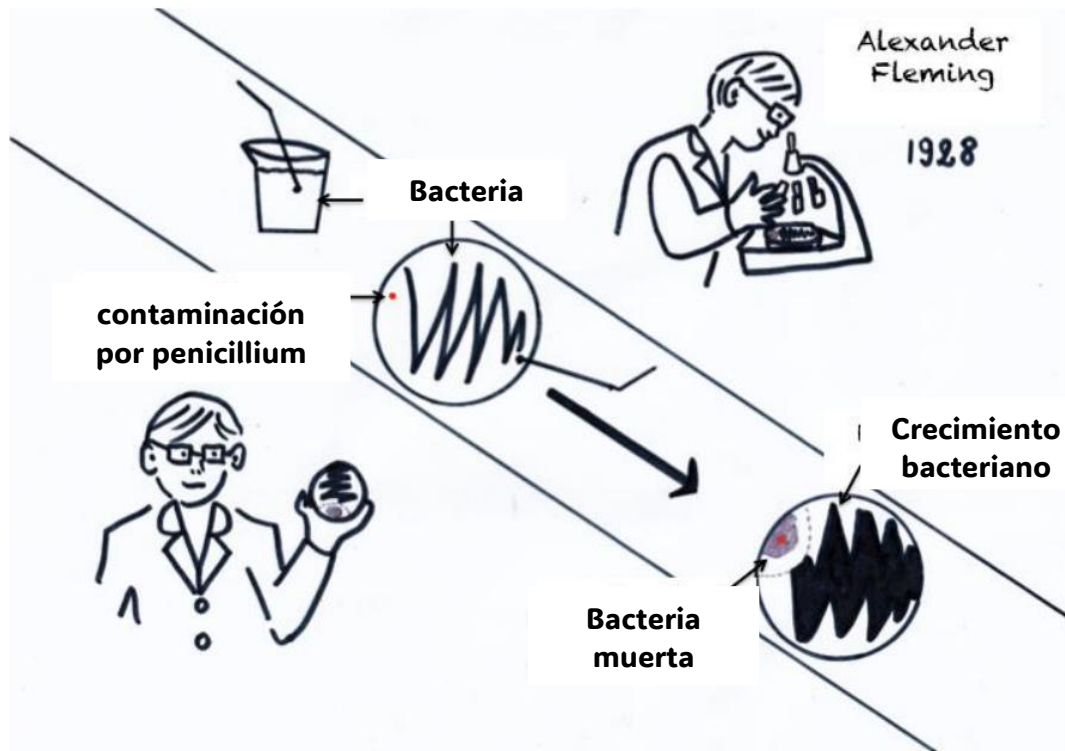


Fig. 3 Descubrimiento de la penicilina por Alexander Fleming en 1928. A su regreso de vacaciones, Fleming descubrió que la placa de Petri en la que crecía una bacteria (staphylococcus) había sido contaminada por un hongo microscópico, el *Penicillium*. Su vecino de mesa estaba trabajando con este hongo... Pero entonces observó que las bacterias no crecían cuando entraban en contacto con el mofo, por lo que planteó la hipótesis de que el hongo secretaba una molécula antibacteriana.

Los antibióticos son moléculas naturales (producidas por microorganismos) o sintéticas (creadas por el hombre). Los antibióticos bactericidas matan las bacterias. Los antibióticos bacteriostáticos bloquean el crecimiento bacteriano. Estas moléculas pueden actuar sobre diferentes enzimas y etapas de la vida celular, como la síntesis de la pared bacteriana, la replicación del ADN, la transcripción del ARN o la síntesis de proteínas. Los antibióticos no son eficaces contra los virus.

Si bien es obvio que los antibióticos han salvado millones de vidas, tienen la desventaja de dañar las bacterias útiles de los organismos. Se trata de las bacterias que intervienen en la digestión o en la respuesta inmunitaria. Estas bacterias están presentes en la piel, en el intestino de los seres humanos y los peces e incluso en la sangre de los invertebrados. Otra desventaja de los antibióticos es la aparición de bacterias resistentes a estos fármacos. Esto se debe a que el ADN de las bacterias puede sufrir mutaciones que alteran el objetivo del antibiótico (por ejemplo, una enzima). La enzima se vuelve insensible a la molécula. El antibiótico atacará a todas las bacterias susceptibles y solo las bacterias que hayan adquirido resistencia podrán sobrevivir y proliferar, es decir, serán seleccionadas (Figura 4). Por último, aún más preocupante es la aparición de bacterias multirresistentes a los antibióticos o "superbacterias". Surgen debido a la capacidad de las bacterias para transferirse fragmentos de ADN entre sí. Algunos de estos fragmentos contienen genes resistentes a los antibióticos, como los que codifican las enzimas que destruyen el fármaco. Si un fragmento de ADN lleva tres genes de resistencia, el tratamiento con un solo antibiótico seleccionará bacterias resistentes a tres antibióticos diferentes. La aparición de las superbacterias supone ahora un callejón sin salida terapéutico para los antibióticos. Se asocia a 700 000 muertes al año en todo el mundo y algunos científicos predicen que en 2050 se asociará a 10 millones de muertes, más que el cáncer (8 millones). Por lo tanto, es probable que las superbacterias causen futuras pandemias. Será imposible tratar infecciones que actualmente no suponen ningún problema, como las infecciones cutáneas, dentales o urinarias.

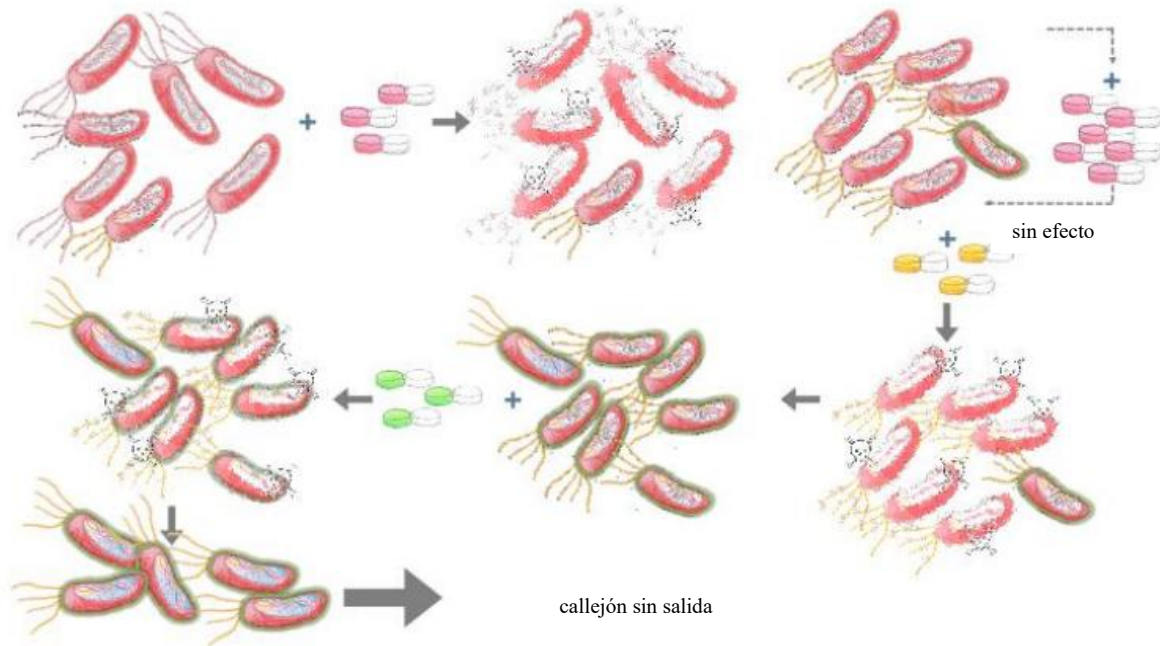


Figura 4. La selección de resistencia a múltiples antibióticos conduce a un callejón sin salida terapéutico. Las bacterias pueden sufrir mutaciones en su ADN, y algunas pueden alterar la sensibilidad a los antibióticos. En presencia de este fármaco, se seleccionan las bacterias resistentes. Si se cambia el antibiótico, se puede seleccionar una nueva resistencia.

Los antibióticos no son automáticos, pero siguen siendo necesarios para tratar las infecciones bacterianas humanas. Por lo tanto, deben reservarse para preservar su utilidad. Ante esta prioridad de salud pública, la agronomía, la acuicultura y las ciencias veterinarias deben tener en cuenta el riesgo del uso masivo de antibióticos en las explotaciones agrícolas, su dispersión en el medio ambiente, la aparición de resistencias múltiples y la propagación de genes de resistencia. Esto es especialmente cierto dado que el origen (o reservorio) de los genes de resistencia a los antibióticos es el medio ambiente. De hecho, como se ha explicado anteriormente, los microorganismos producen antibióticos naturales para combatir a sus competidores. A su vez, estos competidores pueden adquirir resistencia para contraatacar. Esto se denomina evolución de la resistencia. Por eso, la resistencia a los antibióticos precede al descubrimiento y al uso clínico de los mismos. Por ejemplo, se han aislado bacterias multiresistentes en entornos libres de antibióticos. Tenemos mucho que aprender de la naturaleza. ¿Y si la clave para nuevos antimicrobianos viniera de observar lo que ocurre en el medio ambiente?

8. Alternativas a los antibióticos. La salud humana y animal está íntimamente relacionada con la calidad del medio ambiente y el mantenimiento de la biodiversidad. Por ejemplo, una enfermedad del coral llamada blanqueamiento está asociada con el calentamiento global, la acidificación de los océanos y la sobrepesca. En algunas zonas del océano, la abundancia y diversidad de peces ha disminuido tanto que las medusas, que ya no se ven amenazadas por sus competidores, están invadiendo el medio ambiente. A escala microscópica, la biodiversidad también es sinónimo de calidad del medio ambiente. Los competidores y depredadores controlan la abundancia de bacterias nocivas (o bacterias patógenas). Identificar a los actores y comprender los mecanismos de este control en la naturaleza podría ayudar a desarrollar alternativas a los antibióticos.

Un marco de educación microbiana enfocado en niños

Las bacterias competitivas pueden sustituir a los **patógenos** en el nicho ecológico (por ejemplo, una pecera o el intestino de un pez) porque se adaptan mejor a este entorno sin dañar al animal. Las bacterias útiles que se utilizan para combatir enfermedades se denominan probióticos. Los prebióticos (incluidos algunos remedios caseros) son moléculas que estimulan el crecimiento de bacterias buenas. Algunas bacterias producen antibióticos naturales para ganar la batalla. En la sangre de las ostras (o hemolinfa), algunas bacterias producen pequeñas moléculas llamadas péptidos antimicrobianos, que se alojan en la membrana de la bacteria y la matan. Por último, algunas bacterias producen moléculas que impiden que las bacterias se comuniquen y actúen de forma concertada para causar enfermedades.

Los depredadores se definen como organismos que matan a sus presas para alimentarse. Por lo tanto, este fenómeno desempeña un papel importante en los equilibrios biológicos y microbiológicos. Los depredadores de bacterias son generalmente organismos celulares ligeramente más grandes, eucariotas **unicelulares** (o protistas). Por lo general, no son muy específicos y, por lo tanto, atacan tanto a bacterias útiles como a bacterias patógenas. Además, algunos protistas (como las amebas) también son patógenos y, por lo tanto, no constituyen una alternativa preferible a los antibióticos hasta la fecha.

Los bacteriófagos también son depredadores de bacterias. Fueron descritos y nombrados por Felix d'Hérelle (1917) como organismos muy pequeños que se alimentan de bacterias (fagos), y no fue hasta el descubrimiento del microscopio electrónico en la década de 1940 cuando se pudieron observar (Figura 5A). De hecho, son virus capaces de infectar únicamente a las bacterias. Al igual que otros virus, los fagos se adhieren a la célula bacteriana a través de un receptor muy específico (Figura 5B).

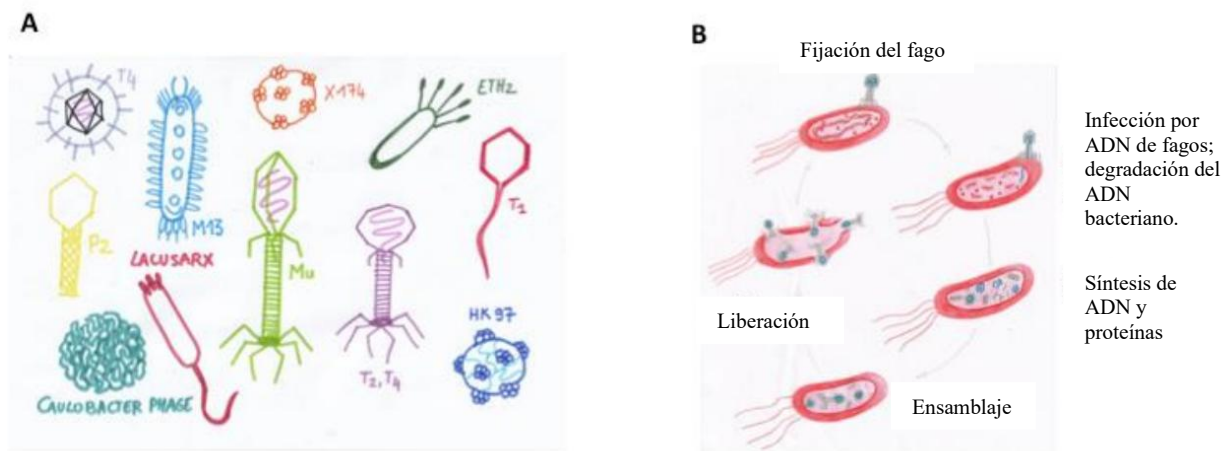


Figura 5. Bacteriófagos (o fagos) **A.** Los fagos pueden observarse con un microscopio electrónico. Presentan una gran variedad de formas. **B.** Los fagos infectan específicamente a las bacterias inyectando su genoma en la célula, secuestrando la maquinaria celular para replicarse y matando a la célula para liberarse (adaptado de Sawakinome).

Inyectan su genoma en la célula y secuestran la maquinaria celular para multiplicarse. Este secuestro solo funciona con la maquinaria de la bacteria; por eso los fagos no pueden infectar a otros organismos unicelulares, animales, plantas o algas. Los fagos completan su ciclo de vida expresando enzimas que perforan la pared para liberar unos 100 fagos nuevos. La ecuación es simple: si un fago encuentra una bacteria que porta su receptor, la muerte de la bacteria infectada conduce a la producción de 100 veces más fagos. Se dice que los fagos son capaces de autoamplificarse. Si todas las bacterias sensibles mueren, el fago ya no puede multiplicarse y se elimina. La autoamplificación y la autoeliminación son ventajas importantes de los fagos sobre los antibióticos. Otra ventaja es su extrema especificidad. Solo son capaces de infectar a determinadas bacterias, por lo que se pueden

Un marco de educación microbiana enfocado en niños

buscar fagos que infecten únicamente a bacterias patógenas y no a bacterias útiles. Esta especificidad también puede ser una limitación, ya que a veces es necesario utilizar diferentes fagos (un cóctel) para matar todas las bacterias patógenas, ya sea porque el fago solo infecta a una parte de las bacterias patógenas o porque estos últimos son capaces de desarrollar una resistencia, al igual que con los antibióticos. Sin embargo, aunque el desarrollo de resistencia a los fagos se observa a menudo en el laboratorio, parece que en la naturaleza no es tan sencillo. En un juego de “carrera armamentística”, la bacteria desarrolla mecanismos para resistir a los fagos, que a su vez contraatacan desarrollando nuevos mecanismos de infección. Esta coevolución del fago y la bacteria puede ir en detrimento de otras capacidades. Puede tener un coste, al igual que la selección genética descrita anteriormente. Por ejemplo, puede dar lugar a un menor crecimiento de la bacteria y del fago.

A pesar de estas limitaciones, los fagos son extremadamente abundantes (entre 10 y 100 veces más que sus bacterias hospedadoras) en el medio ambiente, especialmente en el agua, donde desempeñan un papel fundamental en la regulación de la abundancia de bacterias, su evolución y, por lo tanto, la biodiversidad microbiana. Una alternativa a los antibióticos sería, por lo tanto, comprender cómo los fagos controlan en la naturaleza las bacterias patógenas y evaluar si es posible utilizarlos como herramientas terapéuticas o profilácticas. La producción de fagos de alto rendimiento puede llevarse a cabo en el laboratorio a bajo coste. Numerosos equipos de investigación están trabajando actualmente en el desarrollo de la terapia con fagos para muchos campos de aplicación, incluida la acuicultura. Los investigadores pueden aprovechar la experiencia de sus colegas de la antigua Unión Soviética, en particular los del Instituto Eliava de Georgia, que lleva practicando la terapia con fagos en medicina humana desde la década de 1930.

Paralelamente, y en el contexto de una nueva revolución científica, la de la biología sintética, otro enfoque consiste en recrear la vida en el laboratorio haciéndola más “inteligente”. Esto puede considerarse ilusorio, ya que las condiciones de laboratorio simplifican considerablemente la naturaleza, cuyo funcionamiento aún se conoce muy poco. Sin embargo, en el caso de la búsqueda de alternativas a los antibióticos, los investigadores están trabajando en la creación de fagos capaces de infectar específicamente a bacterias patógenas o resistentes a los antibióticos. Por ejemplo, los eligobióticos son robots biológicos inspirados en los fagos que cuentan con un sistema para reconocer una secuencia de ADN específica (por ejemplo, un gen de resistencia a los antibióticos) junto con un sistema para la destrucción masiva del ADN de la bacteria (nombre científico: sistema CRISPRcas). El eligobiótico infecta la célula bacteriana y, si esta porta el gen de resistencia, destruye su ADN y la mata.

Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Grandes Desafíos

La dimensión microbiana de la acuicultura se relaciona con varios ODS (*los aspectos microbianos aparecen en cursiva*), entre ellos

- **Objetivo 2. Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y mejorar la nutrición, y promover la agricultura sostenible** (*acabar con el hambre y la malnutrición, aumentar la productividad agrícola*). La acuicultura es un importante contribuyente a la producción de alimentos y nutrientes esenciales y, por lo tanto, es fundamental para acabar con el hambre y la malnutrición. Las enfermedades microbianas reducen el rendimiento alimentario de la acuicultura, mientras que los tratamientos respetuosos con el medio ambiente, como los probióticos microbianos, los prebióticos y los fagos, pueden aumentar el rendimiento alimentario de la acuicultura y, por lo tanto, la sostenibilidad de las operaciones acuícolas.
- **Objetivo 3. Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades** (*mejorar la salud, reducir las enfermedades prevenibles y las muertes prematuras*). El pescado y el marisco crudos (incluidos el sushi, el sashimi y el ceviche) pueden transmitir microbios patógenos - en su mayoría bacterias, pero también virus y flagelados tóxicos- algunos de los cuales, como los flagelados productores de neurotoxinas y la *Vibrio vulnificus*,

Un marco de educación microbiana enfocado en niños

pueden provocar enfermedades mortales. Por otro lado, los productos de la acuicultura son saludables, por lo que la reducción de microbios patógenos en los rendimientos y el aumento de los rendimientos mediado por probióticos son actividades microbianas clave que afectan a este ODS.

- **Objetivo 6. Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos** (*garantizar el agua potable, mejorar la calidad del agua, reducir la contaminación, proteger los ecosistemas relacionados con el agua, mejorar la gestión del agua y el saneamiento*). Los recintos de acuicultura son fuentes puntuales de contaminación del agua: los piensos y las heces contribuyen a la eutrofización y a la creación de zonas con un mínimo de oxígeno que asfixian a los animales acuáticos; las adiciones de promotores del crecimiento, como los antibióticos, seleccionan y enriquecen los microbios resistentes a los antibióticos, y los patógenos se enriquecen con los monocultivos de alta densidad, por lo que son retos importantes para la sostenibilidad.

- **Objetivo 8. Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos** (*promover el crecimiento económico, la productividad y la innovación, la creación de empresas y el empleo*). La acuicultura es una industria y un empleador importante, y un contribuyente clave al suministro de alimentos. Las medidas adecuadas para aumentar la contribución positiva de los microbios y mejorar los negativos contribuirán de manera significativa a la sostenibilidad de la acuicultura como factor que contribuye a la economía y al empleo.

- **Objetivo 14. Conservar y utilizar de manera sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible** (*reducir la contaminación de los sistemas marinos por productos químicos tóxicos/nutrientes agrícolas /residuos como los plásticos, desarrollar medidas de mitigación de la acidificación, mejorar el uso sostenible de los océanos y sus recursos*). Las prácticas actuales de acuicultura, que implican el hacinamiento de los animales destinados al consumo y el uso de promotores del crecimiento y compuestos para reducir las enfermedades, son contaminantes y no sostenibles. La aplicación de prácticas sostenibles, como los probióticos microbianos, puede mejorar el problema.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. Individual

- a. ¿Debo comer pescado o marisco de criadero o salvaje?

2. Políticas comunitarias

- a. Dadas las consecuencias medioambientales locales (contaminación de los espacios públicos y las masas de agua locales con heces, residuos de antibióticos, propagación de la resistencia a los antibióticos, incluso a microbios que infectan a los seres humanos), pero con consecuencias económicas positivas, ¿debería fomentarse la acuicultura nivel local?
- b. En caso afirmativo, ¿cómo debería regularse para minimizar las consecuencias negativas?
- c. ¿Cómo se debe supervisar una instalación acuícola local en cuanto a seguridad y actividades contaminantes?
- d. ¿Qué planes de contingencia deben ponerse en marcha en una instalación acuícola y por parte de las autoridades locales para responder a los posibles problemas que puedan surgir?

3. Políticas nacionales relacionadas con la acuicultura

- a. ¿Debería fomentarse políticamente el desarrollo de la acuicultura como fuente de alimento para los seres humanos?
- b. ¿Debería permitirse el uso de antibióticos y, en caso afirmativo, deberían estar sujetos a

Un marco de educación microbiana enfocado en niños

supervisión y control?

c. ¿Qué directrices o reglamentos son necesarios para garantizar la seguridad de los alimentos y el agua, incluidas las aguas recreativas?

d. ¿Qué directrices o normativas son necesarias para garantizar que las consecuencias medioambientales de la acuicultura se ajusten a las políticas medioambientales nacionales e internacionales?

e. ¿Deberían imponerse prácticas de “barbecho” para evitar la degradación a largo plazo de las aguas costeras?

f. ¿Qué políticas son necesarias para evitar o minimizar la fuga de especies invasoras a entornos no objetivo?

g. ¿Qué programas de investigación deberían desarrollarse para promover el descubrimiento de nuevas formas de hacer más sostenible la acuicultura?

h. Desarrollar en paralelo investigaciones para prevenir o reducir el uso de antibióticos (con un claro impacto en el medio ambiente).

Participación de los alumnos

1. Debate en clase sobre los problemas relacionados con la acuicultura.

2. Concienciación de los alumnos interesados

- a. La acuicultura tiene consecuencias positivas y negativas para los ODS. ¿Cuáles de ellas son más importantes para ti personalmente/como clase?
- b. ¿Se te ocurre algo que se pueda hacer para reducir las consecuencias negativas, especialmente en la cadena de suministro alimentario?
- c. ¿Se te ocurre algo que puedas hacer personalmente para reducir la huella medioambiental de la acuicultura?

3. Ejercicios (pueden realizarse en cualquier nivel, pero probablemente sean de educación secundaria)

- a. La producción de proteínas animales procedentes de la acuicultura tiene consecuencias para el medio ambiente, pero la pesca también. ¿Qué otras alternativas se te ocurren?
- b. La terapia, en particular con antibióticos, parece un callejón sin salida. ¿Qué opciones sostenibles existen? ¿Cómo podrías formular una acuicultura sostenible para tu región?
- c. ¿Necesitamos comprender cómo la naturaleza controla los microbios y utilizar este conocimiento para crear nuevos antimicrobianos (por ejemplo, mediante el uso de fagos) o utilizar la biología sintética (por ejemplo, los eligobióticos)? ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de estos dos enfoques?

La base de evidencias, lecturas complementarias y materiales didácticos

<https://donnees.banquemondiale.org>

https://www.youtube.com/watch?v=XvIrBwBysQg&ab_channel=BretagneTrite

<https://sante.lefigaro.fr/article/les-bacteries-resistantes-aux-antibiotiques-ont-entraine-33-000-deces-en-2015-en-europe/>

https://www.youtube.com/watch?v=NF_Dtj9v2wI&t=132s

https://www.youtube.com/watch?v=1L2vQRH8w_E

Un marco de educación microbiana enfocado en niños

<https://www.futura-sciences.com/sante/actualites/maladie-phagotherapie-polymeres-cesalternatives-antibiotiques-maj-57869/>

<https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/medecine-phagotherapie-16432/> Quelles stratégies alternatives aux antibiotiques en aquaculture? INRA Prod. Anim., 2007, 20 (3), 253-258

<https://www.passeportsante.net/fr/Actualites/Nouvelles/Fiche.aspx?doc=resistancebacterienne-alternatives-antibiotiques-infection>

<https://www.youtube.com/watch?v=hycAzI9yS10>

<https://www.youtube.com/watch?v=pYokPe-ySKo>

<https://www.animal-ethics.org/les-maladies-affectant-les-poissons-issus-de-aquaculture/> A child-centric microbiology education framework 13

<http://www.fao.org/3/AC910F/AC910F10.htm>

<https://fr.wikidia.org/wiki/Prophylaxie>

https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/biologie-cellulaire/question-de-la-semaine-peuton-considerer-les-virus-comme-des-etres-vivants_111864

<https://cordis.europa.eu/article/id/203871-protecting-aquaculture-by-vaccinating-fish/fr>

<https://cordis.europa.eu/article/id/203871-protecting-aquaculture-by-vaccinating-fish/fr>

<https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/medecine-antibiotique-2992/>

<https://www.foad-spirit.net/cerebro/saviez/humain/bacteries-gentille-mechante.php>

<http://www.microbes-edu.org/etudiant/pathogene.html>

<https://www.comment-economiser.fr/alternatives-naturelles-antibiotiques.html>

https://www.sciencesetavenir.fr/sante/les-virus-phages-une-alternative-auxantibiotiques_132284

<https://fr.wikidia.org/wiki/Bact%C3%A9riophage>

<https://www.comment-economiser.fr/alternatives-naturelles-antibiotiques.html>

https://www.sciencesetavenir.fr/sante/les-virus-phages-une-alternative-auxantibiotiques_132284

<https://fr.wikidia.org/wiki/Bact%C3%A9riophage> Thèse pour le diplôme de doctorat en pharmacie (2019)- Morgane AVEZ - Université de Lille

<https://aquaculture.ifremer.fr/Statistiques-mondiales/Presentation-generale/Les-filieresaquacoles>

<https://www.rts.ch/decouverte/sante-et-medecine/corps-humain/microbes/4658406-lesmicrobes-expliques-aux-enfants.html>

<https://www.infogm.org/6254-animaux-ogm-pas-vraiment-au-point>

<https://www.futura-sciences.com/sante/actualites/maladie-phagotherapie-polymeres-cesalternatives-antibiotiques-maj-57869/>

<https://www.bfmtv.com/sante/la-nouvelle-methode-d-une-chercheuse-de-25-ans-pourcombattre-les-superbacteries-1041655.html>

<https://kids.frontiersin.org/article/10.3389/frym.2019.00146>

Glosario

Farmacopea: colección de medicamentos

Agua salobre: agua con bajo contenido en sal, por ejemplo, el agua de los estuarios marinos.

Omega-3: ácido graso (también llamado lípido) muy importante para nuestra salud, presente en grandes cantidades en el pescado o el marisco, pero también en los frutos secos o la soja.

Ecosistema: comunidad de seres vivos en interrelación (biocenosis) con su entorno (biotopo).

Proliferar: multiplicarse.

Manglar: bosque de árboles que viven en el agua, cuyas raíces forman galerías que crean refugios para muchas especies de todos los tamaños.

Materia orgánica: corresponde a lo que compone a los seres vivos, así como a lo que resulta de su degradación o excreción.

Protozoo: pequeño organismo vivo, normalmente compuesto por una sola célula.

Unicelular: compuesto por una sola célula, es la unidad más pequeña de vida.

Membrana: conjunto de moléculas que separan el interior del exterior de la célula.

Citoplasma: contenido de la célula.

Enzimas: proteínas responsables de la química celular (síntesis de azúcares, lípidos y otras proteínas) y la producción de energía.

Núcleo: membrana de la célula que contiene el ADN.

ADN: ácido desoxirribonucleico.

ARN: ácido ribonucleico.

Flagelo: aparato de locomoción celular.

Patógeno: que provoca enfermedades.

Altruistas: que dan a los demás (lo contrario de egoístas).

Parásito obligado: organismo que solo puede multiplicarse en detrimento de otro organismo.

Defensa inmunitaria, inmunidad: capacidad del organismo para defenderse de los agentes infecciosos, lo “no propio”.

Pandemia: enfermedades infecciosas, epidemia que afecta a organismos de todo el mundo.

Globalización: libre circulación de bienes, capitales, servicios, personas, tecnología e información.