



Revista

Ciencia
y Naturaleza



Fagoterapia: Aliados Virales en la Lucha Contra las Infecciones

José F. Muñoz Orozco
Valeria Morgan Rodríguez
Jesús J. López López
M. Claudia Villicaña Torres

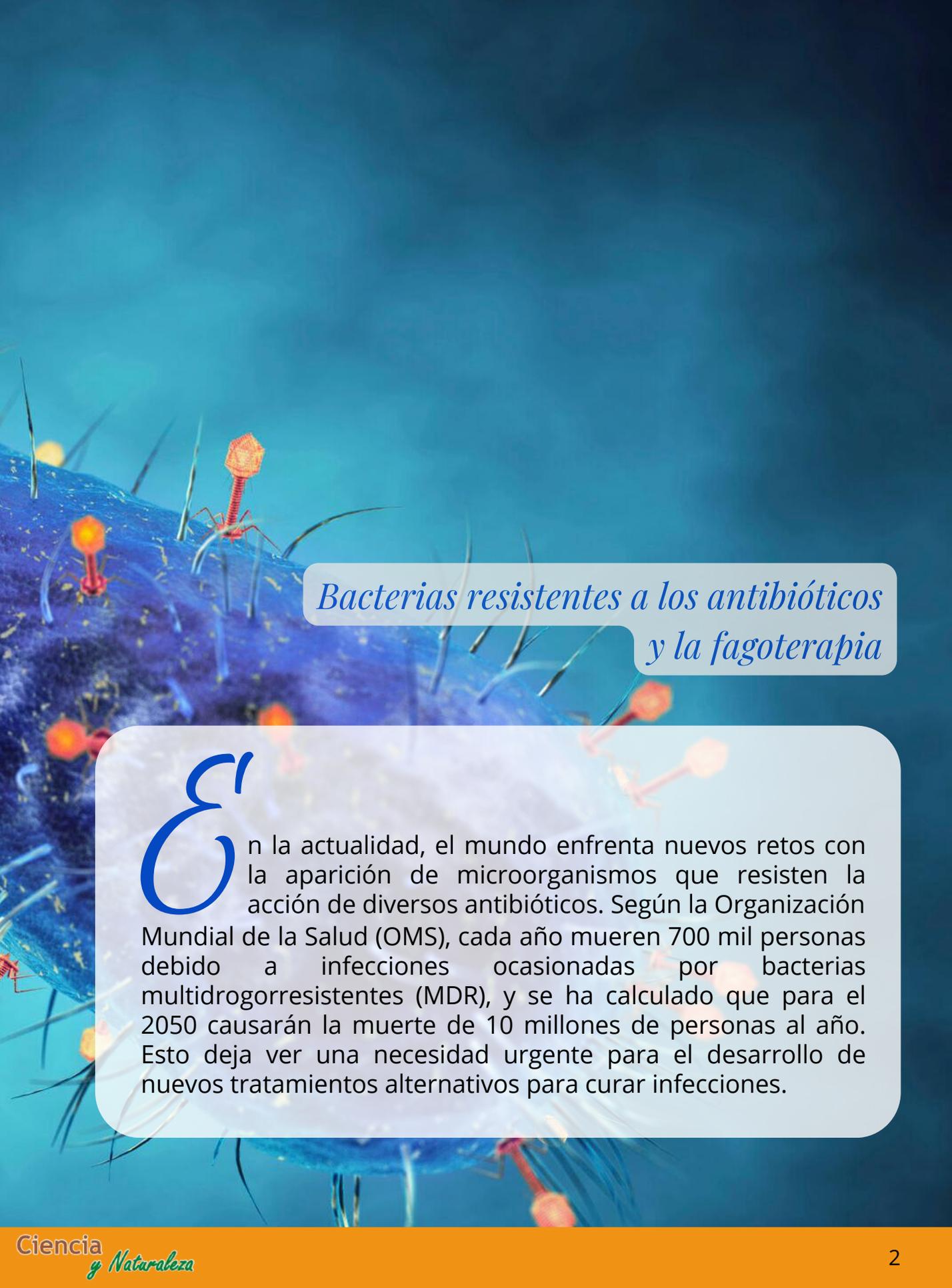


Fagoterapia: Aliados Virales en la Lucha Contra las Infecciones

A detailed illustration of a large, blue, spherical bacterium with numerous thin, hair-like flagella extending from its surface. Numerous orange, hexagonal phages with long, thin tails are shown attached to the bacterium's surface, illustrating the process of phage therapy.

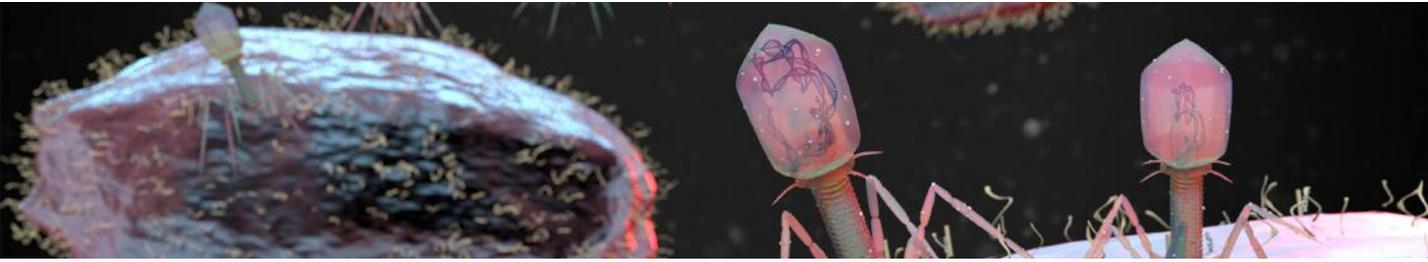
Cómo citar este artículo: Muñoz-Orozco JF, Morgan-Rodríguez V, López-López JJ, Villicaña-Torres MC. 2025. Fagoterapia: Aliados Virales en la Lucha Contra las Infecciones. Revista Ciencia y Naturaleza (1149).



A detailed illustration of a bacterium, shown as a large, textured blue sphere with numerous fine, hair-like structures extending from its surface. Several bacteriophages are attached to the bacterium. Each phage consists of a red, hexagonal head, a long, thin, red tail, and several shorter, thinner tail fibers. The background is a gradient of blue and teal, suggesting a microscopic environment.

Bacterias resistentes a los antibióticos y la fagoterapia

En la actualidad, el mundo enfrenta nuevos retos con la aparición de microorganismos que resisten la acción de diversos antibióticos. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), cada año mueren 700 mil personas debido a infecciones ocasionadas por bacterias multidrogorresistentes (MDR), y se ha calculado que para el 2050 causarán la muerte de 10 millones de personas al año. Esto deja ver una necesidad urgente para el desarrollo de nuevos tratamientos alternativos para curar infecciones.



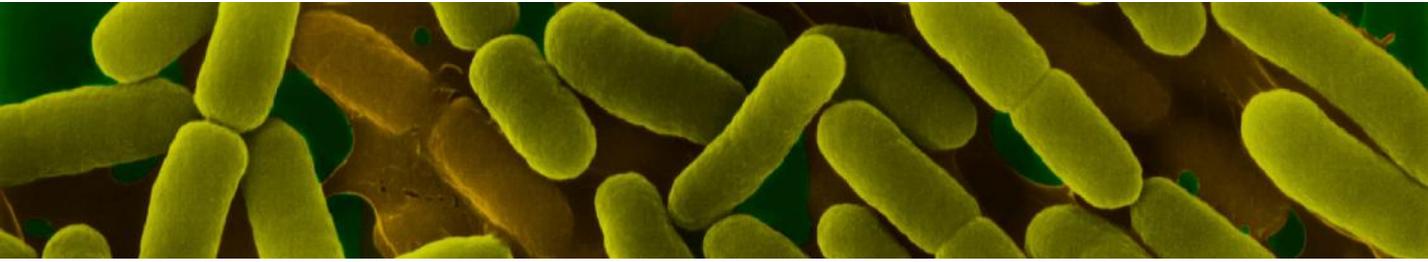
Los bacteriófagos, comúnmente conocidos como “fagos”, son virus que infectan exclusivamente a organismos del dominio de las bacterias. La fagoterapia es una alternativa terapéutica para combatir las infecciones bacterianas a través del uso de fagos, los cuales se introducen en la bacteria y provocan la lisis o deterioro celular para que ésta pueda ser destruida. Estos virus se conocen desde hace más de un siglo, pero en las últimas dos décadas, la administración de fagos ha ganado popularidad en todo el mundo como tratamiento emergente contra estas “superbacterias” MDR.



Las primeras observaciones de la actividad de los fagos fueron reportadas por el investigador británico Ernest Hanbury Hankin, en 1896. Estudiando agua del río Ganges en la India, descubrió la presencia de un agente que ayudaba a eliminar la bacteria del cólera. No fue hasta la Primera Guerra Mundial, que el bacteriólogo británico Frederick Twort (1915) y el microbiólogo francés Felix d'Herelle (1917), trabajando independientemente, detectaron por primera vez en medios de cultivo sólidos zonas libres de bacterias.

d'Herelle propuso que este fenómeno era causado por un agente capaz de parasitar y de “comerse” a las bacterias acuñando el nombre de “bacteriófago” que significa “que come bacterias”.





Desde su descubrimiento, d'Herelle comenzó a aplicar los fagos en la práctica clínica para tratar infecciones en humanos como la disentería en niños y para erradicar el tifus en pollos, naciendo así la fagoterapia.

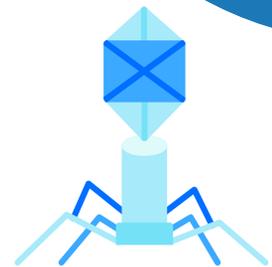
Desafortunadamente, el uso de los fagos se vio eclipsado con la llegada de los antibióticos, por su potente actividad, amplio espectro y estabilidad durante la preparación. Así, a finales de los años 40 se frenó totalmente el desarrollo de la fagoterapia en el mundo occidental, mientras que en lo que hoy es Rusia y Georgia su desarrollo continuó, siendo la cuna de la fagoterapia.

El Enemigo Natural de las Bacterias

Características de los Bacteriófagos

Los fagos son muy comunes en la biósfera y se consideran las entidades más abundantes del planeta ya que superan en número a las bacterias, ya que por cada bacteria hay al menos 10 fagos. El único factor que limita su aparición es la presencia de hospederos microbianos, por lo que podemos encontrarlos casi en todas partes afectando a las poblaciones bacterianas en todo tipo de ambientes.

Los fagos se forman principalmente de dos componentes: el genoma y la cápside. El genoma puede ser ADN (ácido desoxirribonucleico) o ARN (ácido ribonucleico), y éste a su vez puede ser de cadena sencilla o doble, siendo el más común el ADN de doble cadena.





El genoma se encuentra contenido en la cápside, la cual es una estructura proteica y conforma la “cabeza”. Por otro lado, otra región adicional es la “cola”, la cual está constituida por estructuras como el cuello, el tallo recubierto de la vaina, la placa basal, las espículas y las fibras de la cola, que ayudan al fago a reconocer a sus células hospederas. Aproximadamente el 96% de los fagos conocidos presentan la estructura cabeza-cola, haciendo que tengan la apariencia de naves alienígenas (Figura 1).

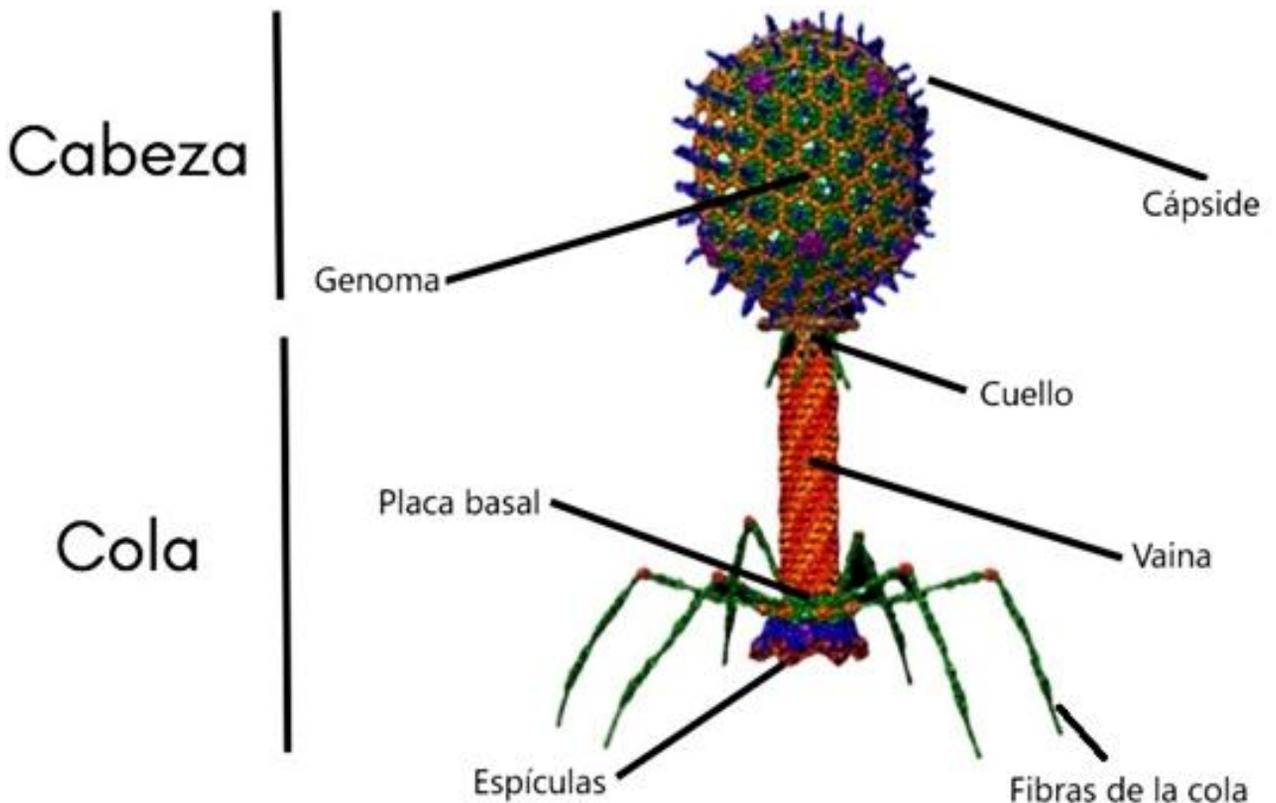
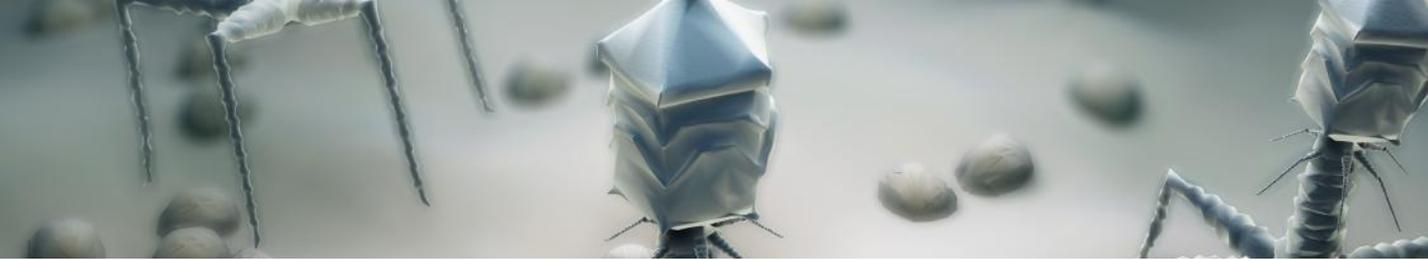


Figura 1. La estructura típica de un fago presenta dos regiones: la cabeza, conformada por el genoma y la cápside; y la cola, que inicia desde el cuello y está constituida por diversas estructuras que ayudan a reconocer a su hospedero, adherirse e incluso introducir su genoma en la bacteria.



Ciclos de vida

Existen dos ciclos de vida, el lítico y el lisogénico (Figura 2). En el ciclo lítico, el fago infecta a su bacteria hospedera para producir nuevos fagos que al liberarse matan a la bacteria. En el ciclo lisogénico, el genoma del fago, en vez de producir los componentes del fago, se une al genoma de la bacteria formando lo que se conoce como profago. Los fagos son líticos cuando solo presentan el ciclo lítico, o pueden ser temperados, ya que dependiendo de las condiciones ambientales (luz, temperatura, pH, nutrientes) o el estado fisiológico del hospedero, pueden presentar ambos ciclos.

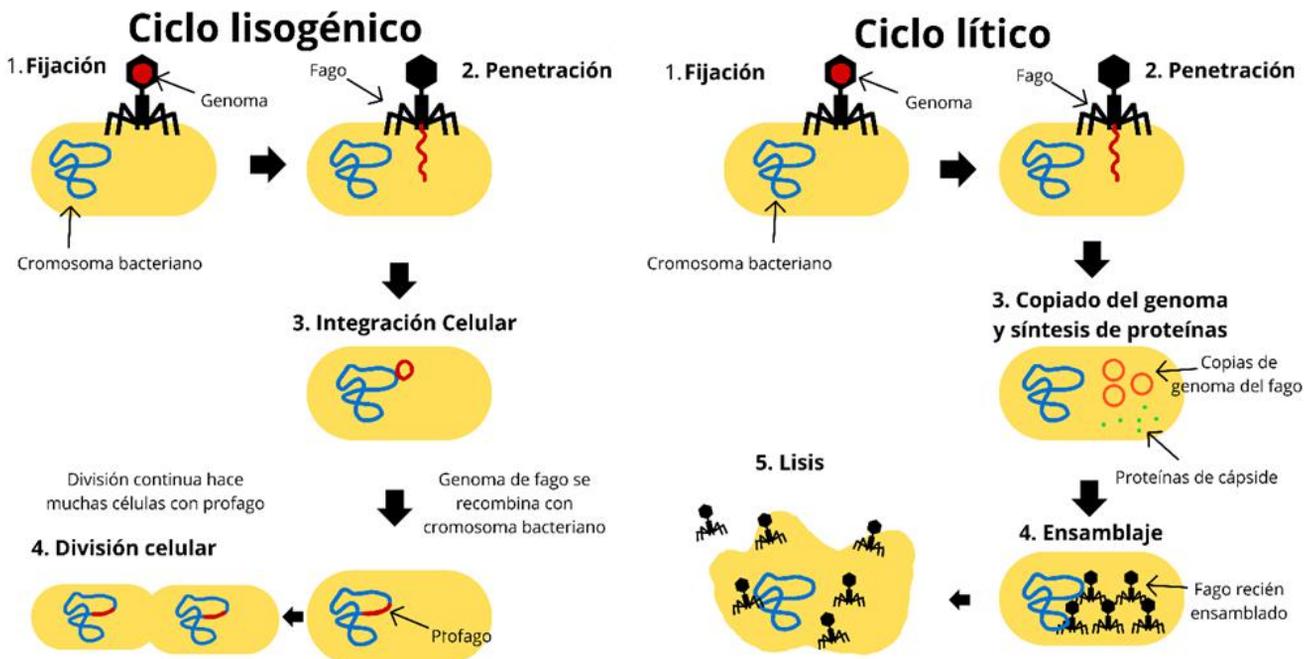
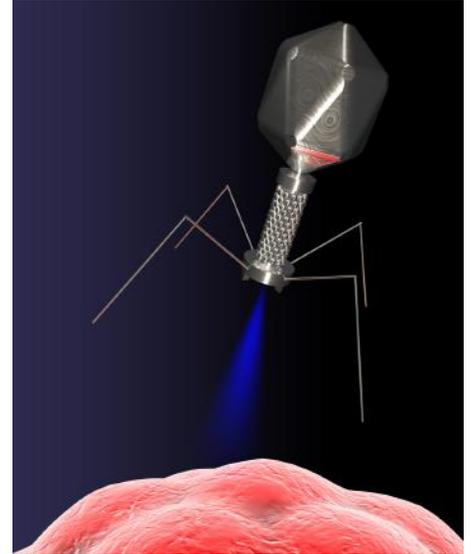


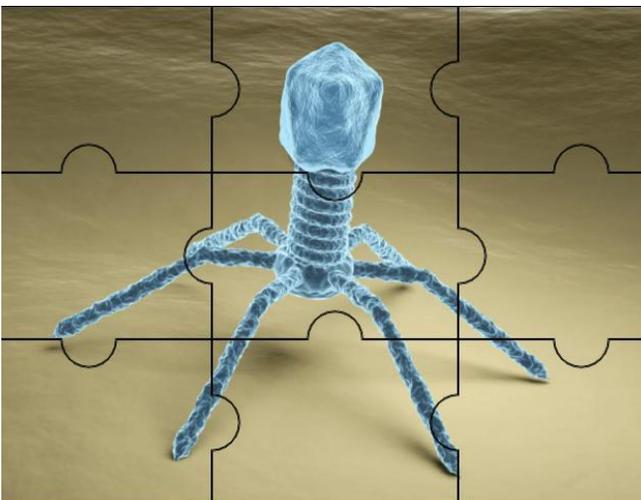
Figura 2. Ciclos de vida de los fagos. En el ciclo lisogénico, el genoma del fago se integra en el genoma de la bacteria y se divide junto con la bacteria. En el ciclo lítico, el genoma del fago utiliza la maquinaria metabólica de la bacteria para producir más fagos y finalmente revienta la célula para liberar la nueva descendencia de fagos.



Cualquiera de los dos ciclos inicia con el encuentro al azar entre la bacteria y el fago permitiendo la **adsorción**, que consiste en el reconocimiento de los receptores en la superficie de la bacteria por el fago; esto define el rango de hospedero, el cual se refiere al conjunto de cepas de una misma especie que el fago puede lisar. Después, el fago perfora la pared celular de la bacteria con ayuda de enzimas como la lisozima e inyecta el material genético dentro de la bacteria.



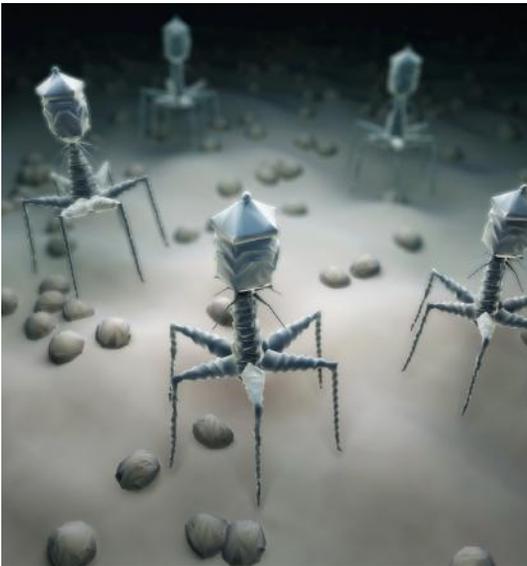
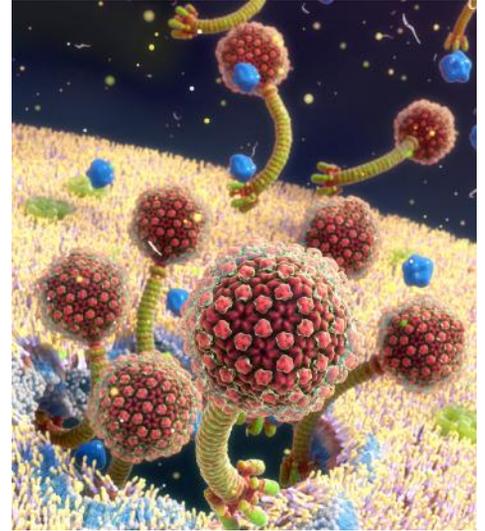
Una vez adentro, el material genético del fago puede seguir dos caminos: 1) se une al genoma de la bacteria para seguir el ciclo lisogénico, o 2) los genes que contiene se expresan para producir proteínas que ayudarán a replicar el genoma viral y a formar la estructura del fago siguiendo el ciclo lítico.



Así, el genoma, la cápside, el tallo, las fibras y todas las demás estructuras funcionan como piezas de un rompecabezas que se ensamblan para formar la cabeza y la cola del fago, siendo esta etapa conocida como ensamble. Después del ensamble, imaginemos a la bacteria como un globo lleno de pequeños fagos.



Estos no pueden liberarse al exterior por sí solos, sino que utilizan unas proteínas especiales llamadas endolisinas, holinas y espaninas, las cuales son producidas por instrucciones del genoma del fago. Estas proteínas se encargan de formar poros y romper la pared celular ocasionando que la bacteria "reviente" y con ello ocurra la salida de los nuevos fagos.

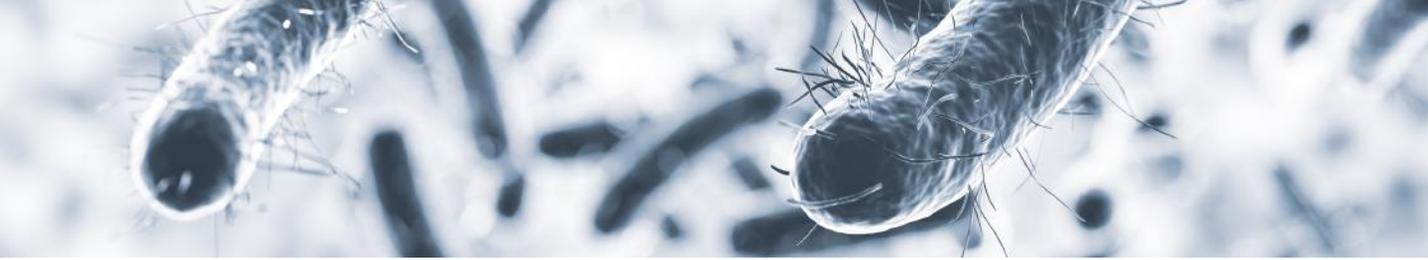


Los fagos líticos son los preferidos para la fagoterapia ya que una vez que infectan a su célula hospedera matan a la mayoría de las bacterias, siendo adecuados para su uso terapéutico. En cambio, cuando se utilizan fagos temperados, muchas bacterias sobreviven ocasionando que su efectividad como tratamiento para infecciones sea baja.

"En Las Más Pequeñas Cosas, La Naturaleza Muestra Las Mayores Maravillas."

-Antonie Van Leeuwenhoek"

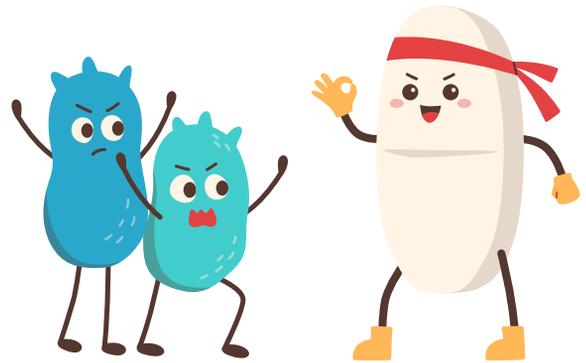




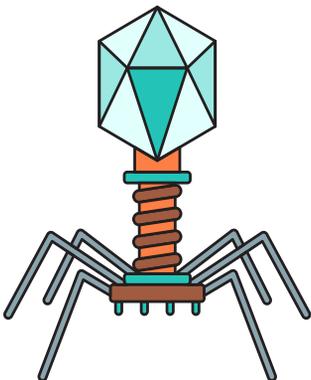
El uso de los bacteriófagos en la clínica

Bacteriófagos vs antibióticos

Los fagos reconocen a su hospedero a través de receptores únicos en su superficie celular, lo que significa que los fagos atacan a cepas específicas sin dañar a otras especies bacterianas ni a las células eucariotas. En contraste, los antibióticos generalmente eliminan un amplio rango de bacterias, incluyendo bacterias patógenas y benéficas. Por tal, los tratamientos con antibióticos suelen ser agresivos provocando efectos secundarios que incluyen diversos síntomas debido a que alteran la composición de la comunidad bacteriana en los intestinos, la cual se conoce como microbiota.



Gracias a su especificidad, el uso de fagos para el tratamiento de infecciones bacterianas tiene pocos efectos secundarios en el paciente ya que van dirigidos para eliminar a bacterias patógenas específicas, lo cual no afecta la microbiota y promueve un estado saludable.



Sin embargo, los fagos al ser tan específicos tienen el inconveniente de que no logren eliminar a todas las diferentes cepas de una especie bacteriana. Esto se ha tratado de resolver al aplicar cocteles, es decir, mezclas de varios fagos para cubrir un rango de hospedero mayor y aumentar la probabilidad de que la mayoría de las bacterias causantes de una enfermedad se mueran.



Entre los retos para su aplicación, los fagos deben someterse a rigurosos controles de calidad para asegurar la ausencia de otros efectos indeseables tales como toxicidad o reacciones alérgicas, manufactura de acuerdo a estándares farmacéuticos y establecer la ruta idónea de administración, lo cual se encuentra principalmente en fase de ensayos clínicos.

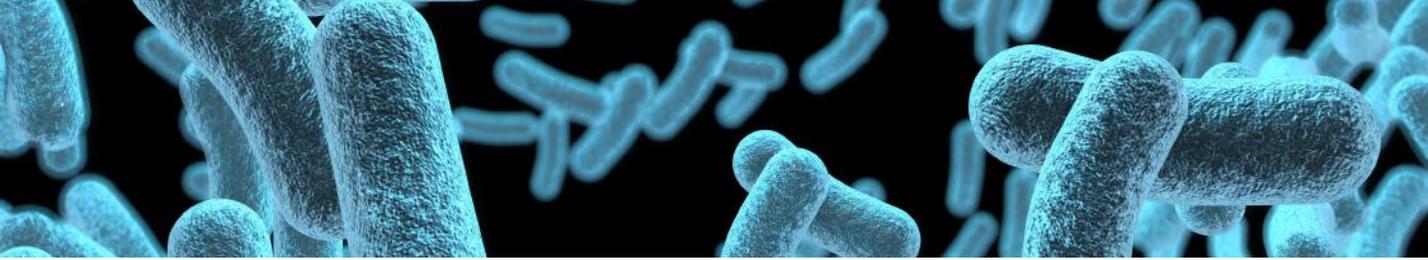
¿Y qué falta para producir medicamentos basados en fagos?

Hasta este punto se ha hablado de los beneficios de los fagos, pero si son tan buenos ¿por qué no vemos en las farmacias medicamentos hechos con ellos? Una de las grandes limitaciones es que la legislación actual todavía no permite la comercialización y aplicación de los fagos en clínica en los países occidentales.

Esto se debe en gran medida al retraso en su investigación y desarrollo que trajo consigo el descubrimiento de los antibióticos. Debido a esto, la gran mayoría de estudios en esta área se han realizado in vitro o en modelos animales, aunque se ha logrado un gran avance en el establecimiento en ensayos clínicos rigurosos.

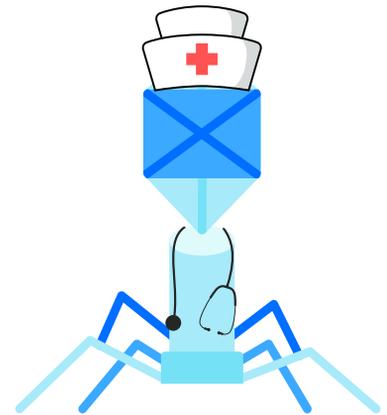


En algunos países occidentales, los fagos se han empleado como tratamiento compasivo, el cual consiste en aprobar que un paciente con una afección grave y potencialmente mortal pueda recibir un tratamiento que está en fase de investigación, ya que no se le puede administrar como una medicina en ensayos clínicos.



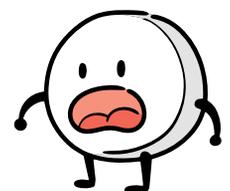
En esta modalidad, se han documentado más de 25 casos exitosos publicados empleando la fagoterapia salvando la vida de pacientes para los que ya no había un tratamiento disponible. También se ha reportado el caso exitoso de la fagoterapia contra *Achromobacter xylosoxidans* en un paciente con fibrosis quística que recibió transplante de pulmones.

Por ahora, son varios los hospitales en países europeos como Bélgica, Finlandia y Francia, y en América, Estados Unidos y Canadá, donde se desarrollan biobancos de fagos, los cuales promueven la investigación y caracterización de fagos, su desarrollo como agentes terapéuticos, la producción de preparaciones farmacéuticas y su aplicación en diversos estudios clínicos, además de que favorece las colaboraciones entre investigadores, la industria y el gobierno, lo cual puede acelerar su implementación y las modificaciones en el marco legal para su regulación.

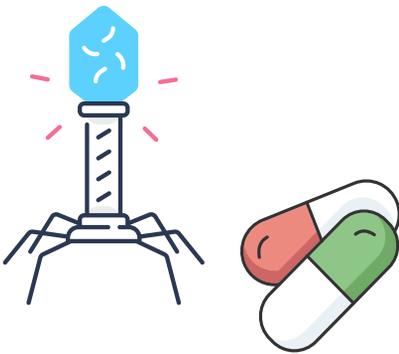


En Europa, el Instituto Eliava, fundado en 1923 en Tbilisi Georgia, es uno de los institutos que continuó con la fagoterapia a pesar del descubrimiento de los antibióticos, lo cual lo ha posicionado como un centro de investigación de clase mundial.

Cuenta con un área especializada en la atención a humanos en el tratamiento de enfermedades infecciosas, así como el uso de fagos en medicina personalizada, formando parte de **preparaciones magistrales** en centros hospitalarios europeos.



Por ejemplo, este Instituto desarrolló un producto farmacéutico llamado PhagoBioDerm, que consiste en una matriz tipo crema formada por un polímero biodegradable impregnado con fagos, ciprofloxacino, un anestésico y enzimas proteolíticas, que se utiliza vía tópica en pacientes con quemaduras para curar infecciones.



En la fagoterapia empleando cócteles también ha demostrado ser eficaz en tratamientos combinados con antibióticos. De manera natural, las bacterias modifican su material genético para escapar del ataque de los fagos, y esto mismo hacen para volverse resistentes a los antibióticos.

Sin embargo, con los tratamientos combinados es más difícil para las bacterias adquirir resistencia a varios fagos y al antibiótico al mismo tiempo, haciendo que estos tratamientos combinados sean más efectivos que los individuales. Incluso, una bacteria que es resistente a un determinado antibiótico puede volverse sensible a éste al exponerla a cócteles de fagos, dando nuevas esperanzas para el tratamiento y la reutilización de antibióticos que por sí solos no son capaces de matar estas bacterias.



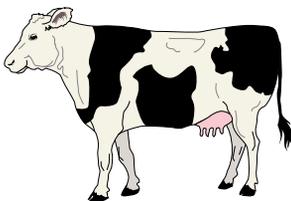


Otros usos de los bacteriófagos

Biocontrol, inocuidad y sanitización

Actualmente, la erradicación de patógenos bacterianos mediante fagos se ha extendido a otras áreas impactando el biocontrol de patógenos en la agricultura, la acuicultura y la ganadería, así como diversas aplicaciones en el área de inocuidad y sanitización.

La palabra biocontrol se refiere al uso de sustancias, microorganismos o virus para controlar enfermedades y plagas que afectan a plantas o animales. Así como se ha realizado para humanos, diversos estudios han demostrado que los fagos pueden controlar enfermedades en cultivos de importancia alimenticia como el tomate, la papa, el pimiento, entre muchos otros, ayudando a disminuir el uso de agroquímicos tóxicos y de antibióticos.



En el caso de peces y animales de granja como vacas, cerdos y gallinas, se ha utilizado con éxito como preventivo para reducir el riesgo de infecciones, pero también como tratamiento de enfermedades animales. Por ejemplo, los fagos se han usado para evitar enfermedades como la mastitis bovina y la enteritis necrótica sin necesidad de recurrir a antibióticos que podrían perjudicar la calidad del producto. Es importante mencionar que se pueden usar cuando el animal ya está infectado y no como tratamiento preventivo de la enfermedad.

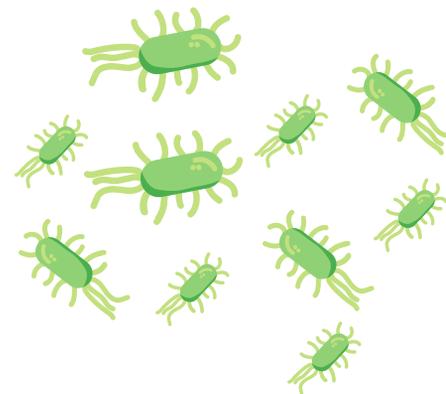


En cuanto al uso de fagos en **inocuidad** de alimentos, concepto que se refiere al correcto manejo de los alimentos que garantiza la seguridad en su consumo, la FDA autorizó desde el año de 2006 su uso en la limpieza de superficies de plantas de procesamiento alimenticio por su eficiencia en la reducción de poblaciones de patógenos, por ejemplo, de *Salmonella* y *E. coli* productoras de toxinas en frutas y vegetales.



En el caso de la **sanitización**, proceso que busca reducir la carga de microorganismos potencialmente dañinos en las superficies u objetos, los fagos pueden aplicarse en el tratamiento de aguas residuales para disminuir la carga de bacterias patógenas comunes como *E. coli*, *Salmonella*, *Legionella* y *Pseudomonas aeruginosa*, que pueden ser causantes de enfermedades como infecciones del tracto urinario, intestinales, neumonía, entre muchas otras.

El uso de los fagos en estas áreas ha mostrado una eficacia comparable a los químicos y bactericidas empleados comúnmente, y además son más seguros. De manera que el desarrollo de tecnologías basadas en fagos podría contribuir de manera significativa en la producción de alimentos de manera sostenible sin dañar el medio ambiente y sin atentar contra el bienestar de los consumidores.

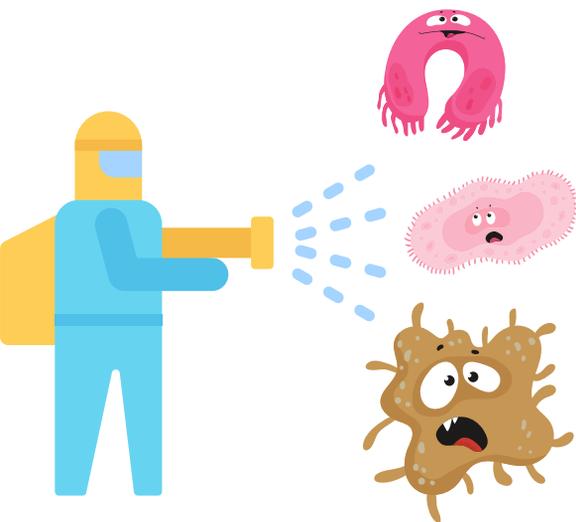


Los bacteriófagos tienen una eficacia comparable y son más seguros que los químicos y bactericidas comúnmente usados para eliminar bacterias patógenas



Dadas las variadas aplicaciones de los fagos, han surgido numerosas empresas dedicadas al desarrollo de productos basados en fagos, enfocándose en diversas áreas:

- Alimentos: Intralytix, EBI Food Safety, New Horizons
- Sanitización ambiental: Intralytix, Novolytics
- Aplicaciones veterinarias: Intralytix, EBI Food Safety, Novolytics
- Aplicaciones en humanos: Intralytix, New Horizons, Exponential Biotherapies, Novolytics, Phage-biotech, Eliava Institute



La compañía Intralytix en Maryland, Estados Unidos, cuenta con patentes de preparaciones veterinarias de fagos como PLSV-1™ para eliminar *Salmonella*, e INT401™ contra *Clostridium perfringens*. Otro producto de fagos es ListShield™, la cual ha sido aceptada por la EPA y FDA para su uso en la descontaminación de plantas procesadoras de alimentos de *Listeria*.

Si bien estos ingeniosos productos basados en fagos no han llegado para reemplazar a los químicos y los desinfectantes utilizados en los métodos tradicionales hasta la fecha, resultan ser un gran apoyo para reducir las cantidades empleadas, generando menos contaminación y retrasando el desarrollo de bacterias resistentes a estos compuestos.





El despliegue de fagos nos ha permitido incursionar de manera más detallada y sencilla en el desarrollo de anticuerpos para tratar enfermedades como el COVID-19, cáncer, enfermedades autoinmunes e infecciosas, reduciendo el uso de animales en favor de la investigación, obteniendo resultados en un tiempo más corto e incluso encontrando anticuerpos más efectivos que posteriormente se pueden purificar.

Además de los anticuerpos, esta herramienta ingeniosa ha sido refinada y muy usada en los últimos 40 años para el descubrimiento de nuevas uniones de péptidos y proteínas a objetivos moleculares de interés básico y clínico.



Este conocimiento nos permite entender cómo funcionan las células, cómo pueden responder a factores ambientales, o cómo se encuentran cuando una persona se enferma, dando la oportunidad para desarrollar métodos de diagnóstico y agentes terapéuticos para el beneficio de la salud humana, vegetal y animal.



En la actualidad, entre los ejemplos de aplicación del despliegue de fagos está la producción de anticuerpos necesarios para transfusiones de sangre, localización de tumores, avances en la investigación de la fisiopatología de trastornos autoinmunes y neurológicos de relevancia como la artritis reumatoide, cirrosis biliar, problemas hematológicos y Parkinson.



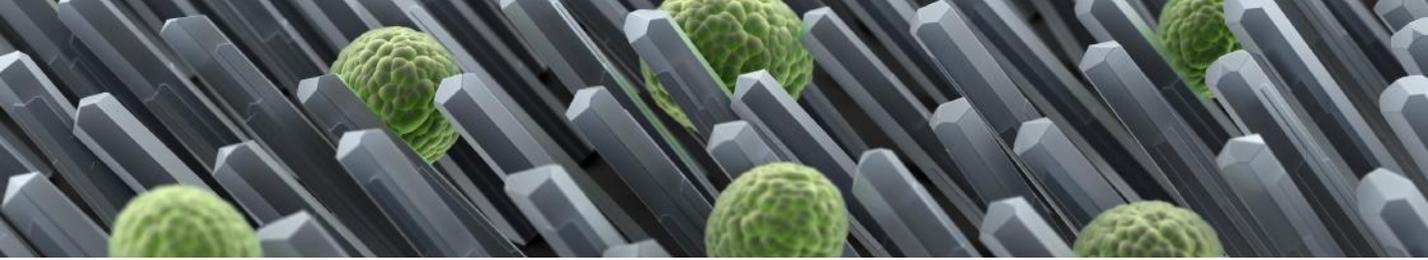
En animales, el despliegue de fagos ha permitido purificar anticuerpos para neutralizar agentes patógenos tales como la rabia, o el diagnóstico de patógenos, por ejemplo, del virus de la influenza aviar H5N1 en aves. En plantas ocurre algo similar ya que esta técnica ha permitido identificar péptidos que se unen proteínas de patógenos como algunos virus y bacterias siendo esto la base para el desarrollo de herramientas de diagnóstico; además, también ha permitido identificar péptidos que detectan compuestos que causan alergias en semillas de interés alimentario.

Biosensores

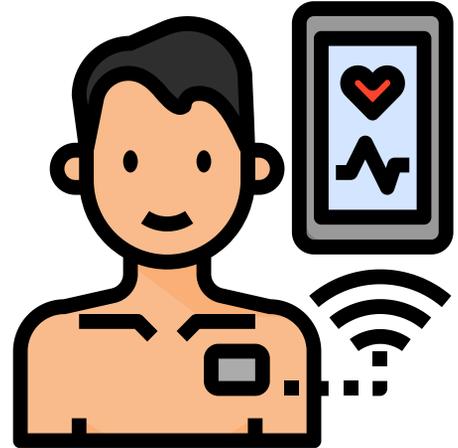
Los biosensores son dispositivos que se basan en fagos que se fijan en superficies sólidas y éstos al detectar su bacteria hospedera activan un mecanismo que emite fluorescencia, una coloración o una señal eléctrica, como indicativo de la presencia del microorganismo.

Este tipo de tecnología se ha utilizado para la detección de bacterias patógenas en alimentos, agua, superficies y muestras ambientales principalmente para patógenos como *Salmonella* y *E. coli*. Desde 1997 hasta hoy en día se ha trabajado en la mejora de esta técnica incluyendo modificaciones genéticas en el fago para producir marcadores de bioluminiscencia como la luciferasa de la luciérnaga o de fluorescencia como la proteína verde fluorescente (GFP), originaria de las medusas.



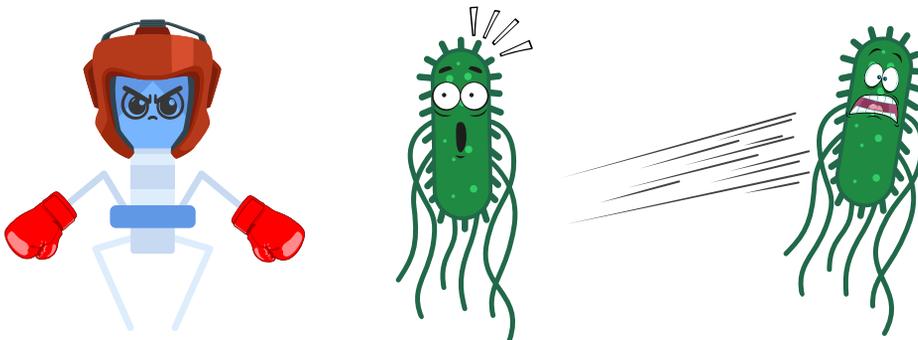


Con estos marcadores se logra un brillo llamativo que permite detectar la bacteria generando una prueba sencilla, de bajo costo y eficaz. Este tipo de método ha mostrado ser igual e incluso superior a otros métodos convencionales para la detección de patógenos, que son más caros, necesitan más tiempo para dar un resultado o requieren de equipos muy sofisticados, por lo que podrían cambiar el diagnóstico microbiológico en un futuro cercano.



Enzibióticos

El termino enzibiótico fue acuñado en el 2001 por Vincent Fischetti y que describe las propiedades antimicrobianas de las endolisinas y las depolimerasas, las cuales son enzimas codificadas en los genomas de los fagos. Las endolisinas ayudan a destruir la pared celular bacteriana para liberar a los nuevos fagos después de una infección produciendo la lisis; las depolimerasas cumplen funciones similares, ya que degradan las cápsulas o la pared celular bacteriana, aunque esto ocurre en los pasos iniciales de la infección cuando el fago reconoce a su hospedero.



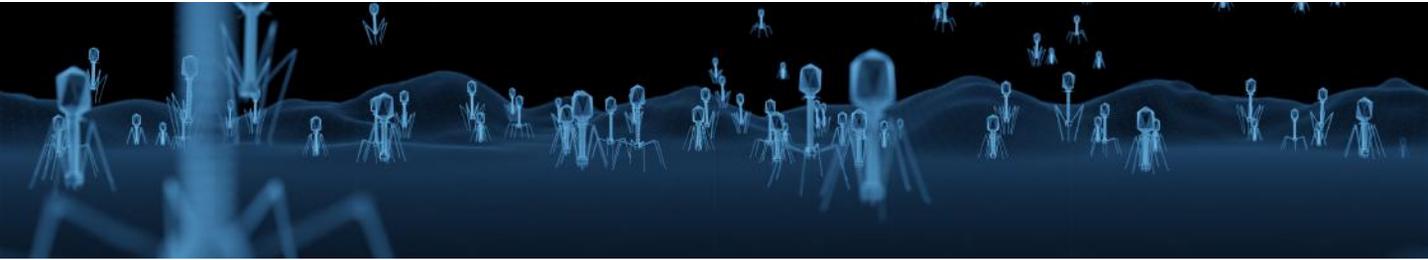
A la fecha, varias enzimas de este tipo se han identificado en fagos y se han caracterizado mostrando resultados prometedores al reducir la cantidad de bacterias y biopelículas en modelos de infecciones en animales. Así, estas enzimas son uno de los muchos secretos contenidos en el genoma de los fagos que se podrían producir en un laboratorio de manera similar a como se produce la insulina para la diabetes y servir como tratamiento para diversas infecciones. 🍀



Figura 3. Esquema resumiendo las diversas aplicaciones de los fagos.

Agradecimientos

Al programa de Investigadores por México (IxM) CONAHCYT proyecto 784. Al Proyecto Interno CIAD P00768014.



Conceptos

Antibióticos: moléculas que matan a los microorganismos, incluidas las bacterias sin importar si son buenas o malas.

Bacterias MDR: bacterias que sobreviven cuando se les trata con diversos antibióticos.

Biopelículas: capas delgadas formadas de sustancias mucilaginosas donde se encuentran embebidas las bacterias.

Cápside: estructura hecha de proteínas que guarda el genoma de un fago.

Cocteles: mezclas de diferentes fagos para aumentar el rango de bacterias que se pueden eliminar en el tratamiento.

Hospedero o huésped: célula específica que es reconocida por un fago, donde a nivel molecular unas proteínas del fago se pegan a un receptor presente en la superficie de la bacteria.

Lisis: ruptura de la célula bacteriana.

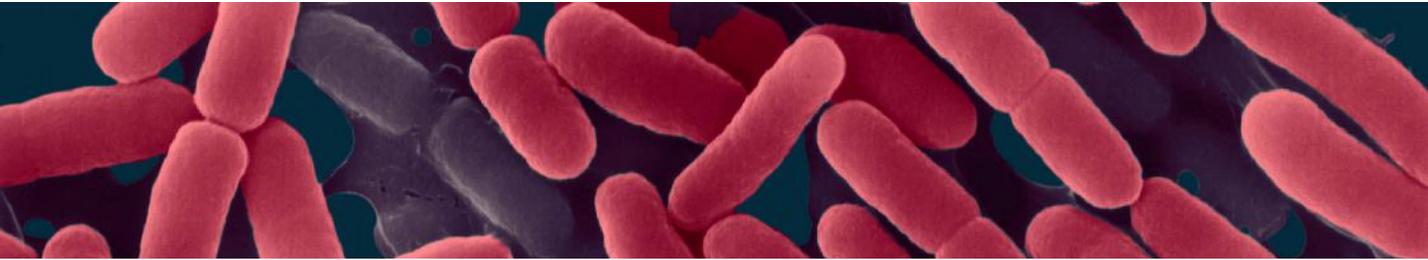
Preparaciones magistrales: se refiere a las preparaciones o formulaciones para medicina personalizada preparada por un farmacéutico bajo las normas de calidad y seguridad para un paciente con necesidades específicas.

Profago: parte del ciclo lisogénico donde el genoma del fago se inserta en el cromosoma de la bacteria permaneciendo inactivo.

Receptores: elementos en la superficie de la bacteria como lipopolisacáridos, proteínas, ácidos teicoicos, fimbrias y flagelos que permiten que el fago reconozca a su hospedero.

Replicación: se refiere a la producción de múltiples copias del genoma de un fago.

Virus: entidades consideradas no vivas que necesitan de un organismo vivo para multiplicarse como un parásito.



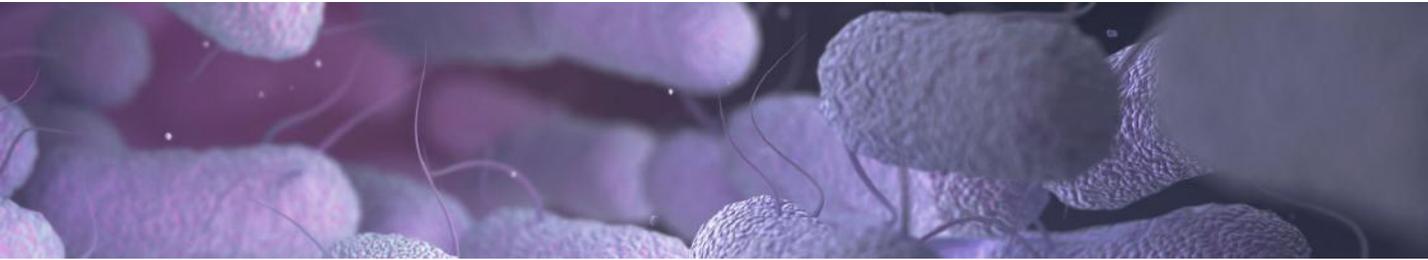
Para llevar

A partir de su descubrimiento a inicios del siglo XX, se ha demostrado que los fagos poseen características biológicas que pueden aprovecharse en múltiples aplicaciones en la medicina, la industria y la biotecnología. En los últimos años, la fagoterapia ha ganado nuevamente interés como una alternativa para el tratamiento de infecciones por microorganismos MDR, el cual es un problema creciente de salud pública.

A la fecha, numerosos casos de éxito de la fagoterapia se han reportado en todo el mundo demostrando el potencial en el tratamiento de infecciones ocasionadas por bacterias MDR. Por otro lado, el estudio de los fagos ha impulsado el desarrollo de diversas aplicaciones en otras áreas, tales como desarrollo de métodos de diagnóstico, proteínas recombinantes terapéuticas, producción de anticuerpos, entre muchas otras. Aunque la fagoterapia aún enfrenta grandes retos para su implementación y regulación, los avances en el conocimiento de la biología de los fagos y los estudios clínicos sin duda acelerarán el camino para su implementación como opción a la medicina personalizada reduciendo el impacto de la resistencia antimicrobiana.

Para Consulta

-  McCallin S, Sacher JC, Zheng J, *et al.* 2019. Current state of compassionate phage therapy. *Viruses* 11(4): 343. [\[Link\]](#)
-  Mendoza-Madrigal AG, Chanona-Pérez JJ, Hernández-Sánchez H, *et al.* 2013. Biosensores mecánicos en el área biológica y alimentaria: una revisión. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 12(2): 205-225.
-  Pirnay JP, Verbeken G, Ceysens PJ, *et al.* 2018. The magistral phage. *Viruses* 10(2): 64. [\[Link\]](#)

-   Cui L, Watanabe S, Miyanaga K, *et al.* 2024. A comprehensive review on phage therapy and phage-based drug development. *Antibiotics* 13(9): 870. [\[Link\]](#)
-  Strathdee SA, Hatfull GF, Mutalik VK, *et al.* 2023. Phage therapy: From biological mechanisms to future directions. *Cell* 186(1): 17-31. [\[Link\]](#)

Crédito de imágenes en orden de aparición: nopparit (Getty Images Signature, GIS), Science Photo Library, Marcin Klapczynski (Getty Images, GI), 3dmania, patriotibn, Ajab Khan (Vector Icons), Eucalyp (amethyststudio), igorkrasnoselkyi, koto_feja (GIS), cdascher (GI), extender01 (GI), arinarici (GI), Nanoclustering (Science Photo Library), GDJ (Pixabay, P), Photocreo, Dhea Pramesti (Visula Co), H (Prosymbols), fatido (GI), Sugiantara, Clker-Free (P), ourlifelooklikeballoon, memed nrh, qimono (P), iconfield, bsd studio, deemakdaksina, amethyststudio, sangidan, frentusha (GI), RanuKumbolo.lab, SCWorkspace, baddesigner, The img, Satria (Satria images), Iconjam, New Wind, Vectorfair D, iLexx (GI), Icons4Science, Aurielaki, Sensvector, Wena Vega (Sketchify Education), YinYang (GIS), Jehsomwang, Tanya LeClair (So Swell Edu), enot-poloskun (GIS), dDara, Design Cells (GI), Owais Khan (Iconise), Deka Saputra (GodHand), Flat Icons. Crédito de figuras 1, 2 y 3: Proporcionada por los autores. Los autores declaran que utilizaron claude.ai y confirman que ningún párrafo ha sido generado completamente o con más del 50% de sus palabras.

Dr. Jorge Rocha
Editor Asociado Revista CyN

Diseño de publicación: Yareli Fiburcio
Irlanda Edith Garcia Corona



José Francisco Muñoz Orozco

Licenciado en Químico Farmacéutico Biólogo egresado de la Universidad de Los Mochis. Sus áreas de interés son en el uso de herramientas bioinformáticas, farmacéutica y biología molecular.

contacto: josefranciscomunozorozco@gmail.com



Valeria Morgan Rodríguez

Licenciada en Química Farmacéutica Biológica egresada de la Universidad de Los Mochis. Con interés en líneas relacionadas con farmacéutica, biología molecular y bioinformática.

contacto: morganvaleria.v2@gmail.com



Jesús Javier López López

Licenciado en Químico Farmacobiólogo. Con intereses en el área de biología molecular, industria farmacéutica y herramientas bioinformáticas.

contacto: javierl12910@gmail.com



María Claudia Villicaña Torres

Investigadora por México adscrita a CIAD Culiacán. Sus áreas de interés son la genómica y transcriptómica de microorganismos con potencial biotecnológico.

contacto: maria.villicana@ciad.mx