

ESCTS-Vol.4. N1. 059

Bioluminiscencia: cómo los seres vivos producen luz

Bioluminescence: How Living Organisms Produce Light

Autores:

Diana Cristina Macera Veintimilla
UECIB Bosco Wisuma
Macas – Ecuador

crismacera93@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-7863-1646>

Jhoni Javier Hoyos Caicedo
Universidad Técnica de Ambato
Ambato – Ecuador

jhonihoys@outlook.com

<https://orcid.org/0009-0002-4425-9869>

Sandra Patricia Arteaga Vaca
U.E. Francisco de Orellana
Macas – Ecuador

patriciaarteagavaca@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-5758-8647>

Katherine Gricelda Coello Taish
U.E.B. Padre José Vicente Rivadeneira
Macas – Ecuador

katgris1994@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-6678-7110>

Sandro Ricardo Rivera Peláez
U.E.F. San Vicente Ferrer
Puyo – Ecuador

sandro.rivera@docentes.educacion.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-1180-348X>

Autor de correspondencia: Diana Cristina Macera Veintimilla, crismacera93@gmail.com

Recepción: 06-abril-2026

Aceptación: 07-mayo-2026

Publicación: 08-junio-2026



Cómo citar este artículo:

Macera Veintimilla, D. C., Hoyos Caicedo, J. J., Arteaga Vaca, S. P., Coello Taish, K. G., & Rivera Peláez, S. R. (2026). Bioluminiscencia: cómo los seres vivos producen luz. *Sage Sphere of Technology, Sciences, Discoveries And Society*, 4(1), 1-25. <https://doi.org/10.63688/vt3k9e44>

© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea correctamente citada.



RESUMEN

La bioluminiscencia es un fenómeno natural mediante el cual distintos organismos producen y emiten luz a partir de reacciones bioquímicas especializadas. El presente estudio tuvo como objetivo analizar los mecanismos de producción de luz, la evolución de los sistemas bioluminiscentes, sus funciones ecológicas y sus principales aplicaciones científicas. La investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura, con enfoque cualitativo, documental y descriptivo-analítico, siguiendo las orientaciones del modelo PRISMA 2020. Se analizaron 15 artículos científicos publicados entre 2020 y 2025. Los resultados evidencian que la bioluminiscencia surgió de manera independiente en diferentes grupos biológicos y cumple funciones relacionadas con la comunicación, la reproducción, la defensa, la alimentación y la adaptación. También se identificaron aplicaciones relevantes en biotecnología, medicina, investigación celular y monitoreo ambiental. Se concluye que la bioluminiscencia constituye un fenómeno diverso con amplio potencial científico, aunque todavía existen vacíos relacionados con especies poco estudiadas, nuevos mecanismos químicos y la optimización de sus aplicaciones tecnológicas.

Palabras clave: bioluminiscencia, luciferasa, evolución, ecología, biotecnología.

ABSTRACT

Bioluminescence is a natural phenomenon through which different organisms produce and emit light by means of specialized biochemical reactions. This study aimed to analyze light-production mechanisms, the evolution of bioluminescent systems, their ecological functions, and their main scientific applications. The research was conducted through a systematic literature review using a qualitative, documentary, and descriptive-analytical approach, following the PRISMA 2020 guidelines. Fifteen scientific articles published between 2020 and 2025 were analyzed. The findings show that bioluminescence emerged independently in different biological groups and performs functions related to communication, reproduction, defense, feeding, and adaptation. Relevant applications were also identified in biotechnology, medicine, cellular research, and environmental monitoring. It is concluded that bioluminescence is a diverse phenomenon with broad scientific potential, although gaps remain regarding understudied species, new chemical mechanisms, and the optimization of its technological applications.

Keywords: bioluminescence, luciferase, evolution, ecology, biotechnology.



1. INTRODUCCIÓN

La bioluminiscencia constituye un fenómeno natural mediante el cual determinados seres vivos producen y emiten luz visible a través de reacciones químicas desarrolladas en sus organismos. Esta capacidad se encuentra presente en diversos grupos biológicos, entre ellos bacterias, hongos, insectos, dinoflagelados, cnidarios, moluscos, crustáceos y peces. Aunque suele asociarse principalmente con las luciérnagas y los organismos de las profundidades marinas, su amplia distribución demuestra que la producción de luz representa una adaptación relevante para la supervivencia y evolución de numerosas especies. En este contexto, el estudio de la bioluminiscencia permite comprender cómo los organismos transforman energía química en señales luminosas con una mínima generación de calor (Dunuweera et al., 2024; Schramm & Weiß, 2024).

La producción de luz ocurre, en numerosos sistemas bioluminiscentes, mediante la oxidación de una molécula denominada luciferina, reacción que es acelerada por una enzima conocida como luciferasa. Durante este proceso se forma una molécula en estado energético excitado que, al regresar a su estado inicial, libera energía en forma de fotones. Sin embargo, no todos los organismos utilizan las mismas luciferinas, luciferasas o mecanismos bioquímicos, lo que explica las diferencias observadas en la intensidad, duración y color de la luz emitida. Esta diversidad molecular evidencia que la bioluminiscencia ha surgido de manera independiente en distintos grupos de seres vivos y mediante rutas evolutivas diferentes (Dunuweera et al., 2024; Duchatelet & Dupont, 2025).

En los ecosistemas naturales, la bioluminiscencia cumple diversas funciones relacionadas con la comunicación, la defensa y la alimentación. Algunos organismos utilizan señales luminosas para atraer parejas, reconocer individuos de su misma especie o localizar presas. Otros producen destellos para confundir o ahuyentar depredadores, mientras que ciertas especies marinas emplean la contrailuminación para ocultar su silueta y evitar ser detectadas. En el caso del plancton marino, los estímulos mecánicos generados por las olas, las corrientes o el movimiento de otros organismos pueden activar la emisión de luz. Estas funciones demuestran que la bioluminiscencia no constituye únicamente un fenómeno visual, sino una estrategia ecológica vinculada con la supervivencia y las interacciones entre especies (Letendre et al., 2024; Duchatelet & Dupont, 2025).



El conocimiento de los mecanismos bioluminiscentes también ha permitido desarrollar importantes aplicaciones científicas y tecnológicas. Los sistemas basados en luciferasas se utilizan como herramientas para observar procesos celulares, identificar microorganismos, evaluar la expresión genética y monitorear enfermedades sin intervenir directamente en los tejidos analizados. Los avances recientes en ingeniería genética han posibilitado el desarrollo de organismos y células capaces de producir luz de manera autónoma, ampliando las posibilidades de investigación en medicina, biotecnología y biología sintética. No obstante, todavía existen limitaciones relacionadas con la intensidad de la luz, su detección en tejidos profundos y el conocimiento incompleto de numerosos sistemas bioluminiscentes presentes en la naturaleza (Liu et al., 2021; Kim & Furuta, 2024; Shakhova et al., 2024).

En este escenario, resulta necesario analizar los mecanismos mediante los cuales los seres vivos producen luz, así como la diversidad de organismos bioluminiscentes, las funciones ecológicas de este fenómeno y sus principales aplicaciones científicas. La revisión sistemática de la literatura permite integrar los avances bioquímicos, biológicos y tecnológicos existentes, además de reconocer las limitaciones y los vacíos que permanecen en este campo de investigación. En consecuencia, el presente estudio tiene como objetivo analizar, mediante una revisión sistemática, los mecanismos de producción de la bioluminiscencia en los seres vivos, identificando sus características bioquímicas, funciones ecológicas y aportes potenciales para el desarrollo científico y tecnológico.

2. MARCO TEÓRICO

Fundamentos bioquímicos de la bioluminiscencia

La bioluminiscencia es un proceso bioquímico mediante el cual determinados organismos transforman energía química en luz visible. Generalmente, esta reacción ocurre cuando una enzima denominada luciferasa cataliza la oxidación de una molécula conocida como luciferina. Como resultado, se forma un compuesto en estado energético excitado que, al regresar a su estado inicial, libera energía en forma de fotones. A diferencia de otras fuentes luminosas, este proceso produce cantidades mínimas de calor, por lo que suele denominarse luz fría.

Lomakina y Ugarova (2022) explican que el sistema bioluminiscente de las luciérnagas depende de la oxidación de la D-luciferina en presencia de oxígeno, ATP e iones de



magnesio. Esta reacción evidencia que la producción de luz requiere condiciones químicas específicas y puede modificarse cuando las células son expuestas a cambios físicos o químicos. Por esta razón, la intensidad luminosa también puede utilizarse como indicador del estado funcional de los organismos.

Sin embargo, la bioluminiscencia no depende de un único mecanismo universal. Existen diferentes clases de luciferinas y luciferasas que han adquirido la capacidad de producir luz mediante procesos bioquímicos particulares. La diversidad de estos sistemas demuestra que distintas estructuras enzimáticas pueden generar resultados luminosos semejantes, aunque empleen rutas químicas diferentes (Adams & Miller, 2020). En consecuencia, comprender la bioluminiscencia exige analizar tanto la reacción química general como las características específicas de cada organismo.

Evolución y diversidad de los sistemas bioluminiscentes

La presencia de bioluminiscencia en grupos biológicos muy diferentes plantea interrogantes sobre su origen evolutivo. Esta capacidad se encuentra distribuida entre bacterias, hongos, insectos, moluscos, crustáceos, peces y otros organismos marinos. Debido a esta amplia distribución, no se considera que todos los sistemas luminosos provengan de un único antepasado bioluminiscente, sino que la capacidad de producir luz habría aparecido de manera independiente en distintas líneas evolutivas.

Lau y Oakley (2021) sostienen que la bioluminiscencia representa un ejemplo relevante de evolución convergente, debido a que diferentes organismos desarrollaron mecanismos similares de emisión luminosa mediante estructuras, enzimas y compuestos distintos. Esta convergencia sugiere que producir luz ofrece ventajas importantes para la supervivencia, lo que habría favorecido su aparición repetida a lo largo de la historia evolutiva.

Los estudios filogenéticos recientes también han permitido ampliar el conocimiento sobre la antigüedad de este fenómeno. El análisis de los antozoos indica que la bioluminiscencia pudo surgir en animales marinos hace aproximadamente 540 millones de años, mucho antes de lo estimado previamente. Este hallazgo demuestra que la producción de luz constituye una adaptación antigua y profundamente relacionada con la evolución de los ecosistemas marinos (DeLeo et al., 2024). No obstante, aún existen numerosos organismos luminosos cuyos mecanismos y relaciones evolutivas no han sido estudiados completamente.

Funciones ecológicas y comunicación biológica



La bioluminiscencia cumple funciones ecológicas que permiten a los organismos responder a las condiciones de su entorno. La luz puede utilizarse para comunicarse, atraer parejas, capturar presas, confundir depredadores o disminuir la posibilidad de ser detectado. La función desempeñada depende de factores como el hábitat, la especie, la intensidad de la luz y la ubicación de los órganos luminosos.

Otjacques et al. (2023) identificaron una amplia diversidad de estructuras y estrategias bioluminiscentes en los cefalópodos. Algunas especies producen luz mediante tejidos propios, mientras que otras mantienen relaciones simbióticas con bacterias luminosas. Además, la ubicación de los fotóforos en la cabeza, los brazos, los ojos o el manto permite que la luz sea utilizada de distintas maneras, como atraer organismos, comunicarse o generar mecanismos defensivos.

En ambientes terrestres, la emisión luminosa también cumple una función central en la comunicación reproductiva. Las luciérnagas emplean patrones específicos de destellos para localizar y seleccionar parejas; sin embargo, estas señales pueden ser ocultadas por la iluminación artificial nocturna. La contaminación lumínica altera la comunicación, el apareamiento y otros comportamientos necesarios para la supervivencia de estos insectos (Owens et al., 2022). Esto demuestra que la bioluminiscencia no debe estudiarse únicamente como una capacidad individual, sino como un proceso vinculado con las relaciones ecológicas y las condiciones ambientales.

Aplicaciones científicas, biomédicas y ambientales

El conocimiento de los sistemas bioluminiscentes ha permitido desarrollar herramientas utilizadas en biología, medicina, biotecnología y monitoreo ambiental. Love y Prescher (2020) destacan que los avances recientes en tecnologías bioluminiscentes han ampliado significativamente las aplicaciones experimentales y biomédicas de estos sistemas. Una de sus principales ventajas es que la emisión de luz puede detectarse con gran sensibilidad y sin necesidad de aplicar fuentes externas de iluminación. Esto facilita la observación de procesos biológicos en células, tejidos y organismos vivos.

Syed y Anderson (2021) señalan que las reacciones bioluminiscentes se emplean en el análisis de genes, la detección de interacciones entre proteínas, el descubrimiento de medicamentos, el control higiénico y la obtención de imágenes en organismos vivos. Estas aplicaciones evidencian que la bioluminiscencia ha pasado de ser estudiada como



una curiosidad natural a convertirse en una herramienta científica capaz de mostrar procesos que no pueden observarse directamente.

La bioluminiscencia también permite evaluar la presencia de contaminantes y los efectos de determinadas sustancias sobre los organismos. Los dinoflagelados luminosos pueden utilizarse como bioindicadores, debido a que su intensidad luminosa cambia cuando son expuestos a metales, compuestos orgánicos u otras sustancias tóxicas (Perin et al., 2022). Esta aplicación resulta relevante porque permite detectar alteraciones ambientales de manera rápida y sensible.

En síntesis, la bioluminiscencia constituye un fenómeno complejo que integra procesos bioquímicos, evolutivos, ecológicos y tecnológicos. Su estudio permite comprender cómo los seres vivos producen luz, por qué esta capacidad apareció en grupos diferentes y de qué manera puede utilizarse para la investigación científica y la protección ambiental.

Diversas investigaciones han optimizado los sistemas de luciferina-luciferasa para mejorar la intensidad y sensibilidad de las imágenes bioluminiscentes en organismos vivos (Endo & Ozawa, 2020; Li et al., 2021).

3. METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura científica orientada al análisis de la bioluminiscencia como fenómeno mediante el cual determinados seres vivos producen y emiten luz. Este tipo de investigación permitió identificar, comparar y sintetizar la evidencia disponible sobre los mecanismos bioquímicos de producción luminosa, la evolución de los sistemas bioluminiscentes, sus funciones ecológicas y sus principales aplicaciones científicas, biomédicas, biotecnológicas y ambientales. La revisión se planteó desde un enfoque cualitativo de carácter documental, descriptivo y analítico. Este enfoque coincide con las orientaciones metodológicas para revisiones de literatura y análisis documental propuestas por Kraus et al. (2022), Lim (2025) y Moilanen et al. (2022).

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos y plataformas académicas reconocidas por su cobertura científica y multidisciplinaria, entre ellas Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, Wiley Online Library, Frontiers y MDPI. Estas fuentes fueron seleccionadas debido a la disponibilidad de investigaciones relacionadas con bioquímica, biología marina, evolución, ecología, biotecnología y aplicaciones de la



bioluminiscencia. Las revisiones recientes evidencian que este fenómeno comprende una amplia diversidad de organismos, mecanismos y funciones biológicas (Duchatelet & Dupont, 2025; Dunuweera et al., 2024).

La estrategia de búsqueda se estructuró mediante palabras clave en español e inglés, combinadas con los operadores booleanos AND y OR para mejorar la recuperación de documentos relevantes. Entre los términos utilizados se incluyeron: “bioluminiscencia”, “organismos bioluminiscentes”, “luciferina”, “luciferasa”, “funciones ecológicas de la bioluminiscencia”, “bioluminescence”, “bioluminescent organisms”, “luciferin”, “luciferase”, “marine bioluminescence”, “evolution of bioluminescence” y “bioluminescence applications”. La búsqueda se delimitó a publicaciones comprendidas entre 2020 y 2025, con el propósito de analizar evidencia científica reciente sobre el tema.

Ecuaciones de búsqueda y filtros aplicados

La búsqueda bibliográfica se realizó entre el 15 y el 20 de marzo de 2026. Para garantizar la recuperación sistemática de la evidencia científica se diseñaron ecuaciones de búsqueda específicas para cada base de datos.

Tabla 1

Registros recuperados por base de datos

Base de datos	Registros recuperados
Scopus	12
Web of Science	8
PubMed	7
ScienceDirect	6
SpringerLink	5
Google Scholar	8
Wiley Online Library	3
Frontiers	4
MDPI	1
Referencias bibliográficas	3



Base de datos	Registros recuperados
Total	57

Nota. Registros recuperados de bases académicas y referencias bibliográficas. Elaboración propia.

Los filtros aplicados en todas las bases de datos fueron: artículos científicos revisados por pares, publicaciones en inglés o español, periodo 2020–2025, disponibilidad de texto completo y relación directa con los mecanismos, funciones ecológicas o aplicaciones de la bioluminiscencia. Se excluyeron capítulos de libro, tesis, actas de congresos, editoriales, notas técnicas y documentos duplicados.

Los criterios de inclusión consideraron artículos científicos revisados por pares; publicaciones en español o inglés; estudios relacionados directamente con los mecanismos, evolución, funciones ecológicas o aplicaciones de la bioluminiscencia; investigaciones disponibles a texto completo o con información metodológica suficiente; y documentos con DOI o enlace bibliográfico verificable. Por otro lado, se excluyeron registros duplicados, publicaciones no arbitradas, investigaciones fuera del periodo establecido, documentos sin relación directa con la producción de luz en organismos vivos y estudios centrados exclusivamente en sistemas luminosos artificiales sin conexión con procesos biológicos.

El proceso de selección de los estudios se desarrolló siguiendo las orientaciones del modelo PRISMA 2020, el cual permite presentar de forma transparente las fases de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de los documentos analizados (Page et al., 2021). Durante la fase de identificación se localizaron 54 registros en las bases de datos académicas consultadas y 3 documentos adicionales mediante la revisión de referencias bibliográficas, obteniéndose un total inicial de 57 registros.

Antes de iniciar el cribado se eliminaron 9 registros duplicados, por lo que quedaron 48 documentos para la revisión de títulos, resúmenes y palabras clave. Durante esta etapa se excluyeron 21 publicaciones porque no abordaban directamente la bioluminiscencia en organismos vivos, se centraban únicamente en sistemas artificiales de emisión luminosa o no respondían al objetivo de la investigación.

Posteriormente, se evaluaron 27 artículos a texto completo para determinar su elegibilidad. De estos, se excluyeron 12 documentos: 5 por encontrarse fuera del periodo establecido, 3



por no presentar relación directa con los mecanismos, funciones o aplicaciones de la bioluminiscencia, 2 por contener información metodológica insuficiente y 2 por no corresponder a publicaciones científicas revisadas por pares. Finalmente, se seleccionaron 15 artículos científicos publicados entre 2020 y 2025, los cuales conformaron la muestra final de la revisión sistemática y fueron incluidos en la síntesis cualitativa. No se realizó metaanálisis debido a la diversidad de organismos, objetivos, metodologías y variables estudiadas.

Los estudios incluidos en la muestra final fueron Adams y Miller (2020), Duchatelet y Dupont (2025), Dunuweera et al. (2024), Kim y Furuta (2024), Letendre et al. (2024), Liu et al. (2021), Schramm y Weiß (2024), Shakhova et al. (2024), DeLeo et al. (2024), Lau y Oakley (2021), Lomakina y Ugarova (2022), Otjacques et al. (2023), Owens et al. (2022), Perin et al. (2022) y Syed y Anderson (2021). Page et al. (2021) se empleó exclusivamente como referencia metodológica para sustentar la aplicación del modelo PRISMA 2020 y no formó parte de la muestra temática.

Una vez seleccionados los artículos, la información fue organizada en una matriz de sistematización que incluyó autor, año, título, objetivo, metodología, organismo o contexto estudiado, mecanismo bioluminiscente, función ecológica o aplicación, principales resultados, aportes al estudio y DOI. Esta matriz permitió comparar los documentos, identificar coincidencias y diferencias, y reconocer tendencias y vacíos presentes en la literatura científica revisada.

El análisis cualitativo se desarrolló mediante una categorización temática organizada en cuatro ejes principales. Este procedimiento es consistente con los principios de análisis temático descritos por Braun y Clarke (2021). El primer eje correspondió a los fundamentos bioquímicos y mecanismos de producción de luz. En esta categoría se analizaron los sistemas de luciferina y luciferasa, las reacciones químicas responsables de la emisión luminosa y las diferencias entre organismos. Schramm y Weiß (2024) explican los procesos químicos que permiten transformar energía en luz visible, mientras que las investigaciones sobre luciferasa evidencian su utilidad para analizar respuestas celulares y efectos del estrés en organismos vivos (Lomakina & Ugarova, 2022).

El segundo eje abordó la evolución y diversidad de los sistemas bioluminiscentes. Adams y Miller (2020) señalan que la flexibilidad enzimática ha favorecido la aparición de



diferentes mecanismos de emisión luminosa. Desde una perspectiva evolutiva, la bioluminiscencia se ha desarrollado de forma independiente en numerosos linajes, constituyendo un ejemplo de evolución convergente (Lau & Oakley, 2021). Los análisis filogenéticos también muestran que este fenómeno posee orígenes antiguos en algunos grupos marinos, particularmente en los antozoos (DeLeo et al., 2024).

El tercer eje se relacionó con las funciones ecológicas de la bioluminiscencia, entre ellas la comunicación, reproducción, defensa, atracción de presas, camuflaje y respuesta a estímulos ambientales. Otjacques et al. (2023) identifican una amplia diversidad de estructuras y estrategias luminosas en cefalópodos. En el caso del plancton marino, la producción de luz puede activarse mediante estímulos mecánicos relacionados con el movimiento del agua o de otros organismos (Letendre et al., 2024). En ambientes terrestres, la iluminación artificial puede alterar las señales luminosas utilizadas por las luciérnagas para comunicarse y reproducirse (Owens et al., 2022).

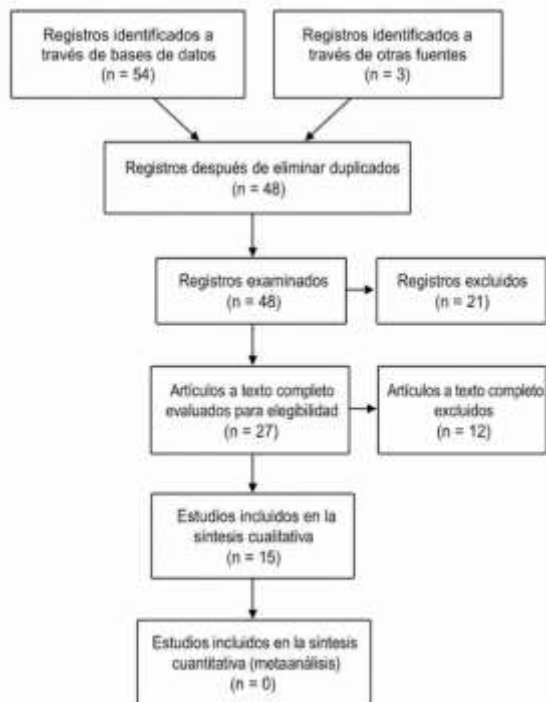
El cuarto eje comprendió las aplicaciones científicas, biomédicas, biotecnológicas y ambientales de la bioluminiscencia. Syed y Anderson (2021) destacan el uso de los sistemas luminosos en investigación molecular, detección biológica y desarrollo tecnológico. Las luciferasas también se emplean para observar procesos que ocurren dentro de organismos vivos sin recurrir a procedimientos altamente invasivos (Liu et al., 2021). Los avances en ingeniería genética han permitido mejorar los sistemas autónomos de emisión luminosa en células eucariotas (Shakhova et al., 2024). En el ámbito ambiental, los dinoflagelados bioluminiscentes pueden funcionar como bioindicadores para evaluar toxicidad y contaminación (Perin et al., 2022). Kim y Furuta (2024) señalan que estas aplicaciones poseen un importante potencial científico, aunque todavía presentan limitaciones relacionadas con la intensidad, duración y detección de la luz.

Finalmente, los hallazgos fueron integrados mediante una síntesis narrativa y comparativa, debido a que los estudios seleccionados presentan diferencias significativas en sus objetivos, diseños metodológicos, organismos analizados y campos de aplicación. Este procedimiento permitió construir una interpretación general sobre la diversidad de mecanismos bioluminiscentes, sus funciones ecológicas y su potencial científico y tecnológico.

Figura 1

Diagrama del proceso de selección de estudios según el método PRISMA





Nota. El diagrama presenta el proceso de identificación, depuración, cribado, elegibilidad e inclusión de los estudios. Elaboración propia.

4. RESULTADOS

El análisis de los 15 artículos científicos seleccionados permitió identificar patrones, enfoques y tendencias relacionados con los mecanismos mediante los cuales los seres vivos producen luz, la evolución de los sistemas bioluminiscentes, sus funciones ecológicas y sus aplicaciones científicas y tecnológicas. A partir de la revisión sistemática, los estudios fueron organizados en cuatro categorías temáticas: fundamentos bioquímicos y mecanismos de producción de luz, evolución y diversidad de los sistemas bioluminiscentes, funciones ecológicas y comunicación biológica, y aplicaciones científicas, biomédicas y ambientales. Esta categorización facilitó la comparación de los principales aportes de la literatura científica. Los hallazgos muestran que la bioluminiscencia no corresponde a un mecanismo químico único, sino a un fenómeno diverso que surgió de manera independiente en distintos organismos. Además, cumple funciones vinculadas con la comunicación, la reproducción, la defensa, la alimentación y la adaptación al entorno. En el ámbito aplicado, los sistemas bioluminiscentes presentan utilidad para la investigación celular, el diagnóstico, la biotecnología y la evaluación ambiental.



Tabla 2

Fundamentos bioquímicos y mecanismos de producción de luz

Autor(es)	Enfoque	Aporte a la investigación
Schramm y Weiß (2024)	Mecanismos químicos de la bioluminiscencia	Explican las reacciones químicas mediante las cuales diferentes organismos transforman energía en luz visible, destacando la participación de luciferinas y luciferasas.
Dunuweera et al. (2024)	Sistemas y ensayos bioluminiscentes	Presentan una revisión integral de los principales sistemas bioluminiscentes, sus mecanismos de funcionamiento y sus aplicaciones.
Lomakina y Ugarova (2022)	Sistemas basados en luciferasa de luciérnaga	Evidencian que la emisión luminosa puede utilizarse para analizar el estado funcional de células vivas y sus respuestas frente a situaciones de estrés.
Adams y Miller (2020)	Evolución y flexibilidad enzimática	Señalan que la capacidad de determinadas enzimas para reaccionar con diferentes compuestos favoreció el surgimiento de distintos mecanismos bioluminiscentes.

Nota. Aportes relacionados con los fundamentos químicos, las reacciones enzimáticas y los mecanismos responsables de la producción de luz en organismos vivos. Elaboración propia. Los estudios incluidos en esta categoría evidencian que la producción de luz depende de reacciones bioquímicas especializadas, generalmente asociadas con la interacción entre una luciferina y una luciferasa. Schramm y Weiß (2024) explican que estas reacciones permiten transformar energía química en fotones con una generación mínima de calor. Sin embargo, los componentes y mecanismos empleados varían considerablemente entre organismos, lo que origina diferencias en el color, la intensidad y la duración de la luz emitida (Dunuweera et al., 2024).

La diversidad de los mecanismos bioluminiscentes también se relaciona con la flexibilidad evolutiva de las enzimas involucradas. Adams y Miller (2020) sostienen que algunas enzimas adquirieron la capacidad de producir luz a partir de funciones químicas previas, lo



cual explica la aparición independiente de diferentes sistemas. En el campo experimental, la sensibilidad de las reacciones basadas en luciferasa permite identificar alteraciones funcionales y respuestas celulares frente al estrés (Lomakina & Ugarova, 2022).

Tabla 3

Evolución y diversidad de los sistemas bioluminiscentes

Autor(es)	Enfoque	Aporte a la investigación
Lau y Oakley (2021)	Evolución convergente	Explican que la bioluminiscencia apareció de manera independiente en diferentes linajes, constituyéndose en un ejemplo de evolución convergente.
DeLeo et al. (2024)	Evolución de la bioluminiscencia en antozoos	Aportan evidencia sobre el origen antiguo de la bioluminiscencia en organismos marinos y su evolución en diferentes grupos de antozoos.
Duchatelet y Dupont (2025)	Diversidad de eucariotas marinos bioluminiscentes	Analizan la diversidad de especies marinas capaces de producir luz y las distintas funciones biológicas asociadas con este fenómeno.
Otjacques et al. (2023)	Bioluminiscencia en cefalópodos	Identifican una amplia diversidad de órganos luminosos, mecanismos y estrategias bioluminiscentes presentes en los cefalópodos.

Nota. Aportes relacionados con el origen evolutivo, la diversidad biológica y la distribución de los sistemas bioluminiscentes. Elaboración propia.

Los resultados muestran que la bioluminiscencia no posee un único origen evolutivo, sino que apareció de forma independiente en diferentes grupos biológicos. Lau y Oakley (2021) interpretan este fenómeno como un caso de evolución convergente, debido a que distintos linajes desarrollaron la capacidad de producir luz mediante estructuras y procesos químicos diferentes. Esta diversidad evidencia que la bioluminiscencia ha representado una ventaja adaptativa importante en numerosos ambientes.

Los análisis filogenéticos aportan evidencia de que la producción de luz posee orígenes antiguos en determinados organismos marinos (DeLeo et al., 2024). De forma complementaria, la diversidad identificada en eucariotas marinos y cefalópodos



demuestra que los sistemas bioluminiscentes pueden variar tanto en sus estructuras como en sus funciones ecológicas (Duchatelet & Dupont, 2025; Otjacques et al., 2023). A pesar de estos avances, todavía existen especies cuyos mecanismos luminosos y relaciones evolutivas no han sido descritos completamente.

Tabla 3

Funciones ecológicas y comunicación biológica

Autor(es)	Enfoque	Aporte a la investigación
Owens et al. (2022)	Comunicación luminosa en luciérnagas	Demuestran que la luz artificial nocturna puede alterar las señales bioluminiscentes utilizadas por las luciérnagas para comunicarse y reproducirse.
Letendre et al. (2024)	Bioluminiscencia del plancton marino	Evidencian que determinados organismos planctónicos producen luz como respuesta a estímulos mecánicos generados por movimientos del agua o de otros organismos.
Kim y Furuta (2024)	Funciones, posibilidades y limitaciones de la bioluminiscencia	Analizan las funciones naturales de la producción luminosa y las principales limitaciones asociadas con su estudio y aplicación.

Nota. Aportes relacionados con las funciones ecológicas, la comunicación entre organismos y la respuesta frente a estímulos ambientales. Elaboración propia.

La evidencia revisada permite afirmar que la bioluminiscencia desempeña funciones esenciales para la supervivencia, la comunicación y la adaptación de los organismos. En el plancton marino, la producción de luz puede activarse como respuesta a estímulos mecánicos generados por el movimiento del agua, las corrientes o la presencia de otros organismos (Letendre et al., 2024). Esta respuesta puede funcionar como un mecanismo defensivo o como una señal dentro del ecosistema marino.

En ambientes terrestres, la emisión luminosa cumple una función destacada en la comunicación reproductiva. Owens et al. (2022) evidencian que la contaminación lumínica artificial puede dificultar la percepción de los destellos utilizados por las luciérnagas para localizar parejas, afectando sus comportamientos naturales. Estas diferencias muestran que



la utilidad ecológica de la bioluminiscencia depende de la especie, el hábitat y las condiciones ambientales en las que se produce (Kim & Furuta, 2024).

Tabla 4

Aplicaciones científicas, biomédicas y ambientales

Autor(es)	Enfoque	Aporte a la investigación
Syed y Anderson (2021)	Aplicaciones biotecnológicas	Identifican aplicaciones de la bioluminiscencia en investigación molecular, detección biológica, análisis de genes y desarrollo tecnológico.
Liu et al. (2021)	Imágenes bioluminiscentes en organismos vivos	Evidencian que los sistemas de luciferasa permiten observar procesos celulares y biológicos dentro de organismos vivos con una intervención mínima.
Shakhova et al. (2024)	Bioluminiscencia autónoma en eucariotas	Desarrollan una ruta mejorada para producir bioluminiscencia autónoma en células eucariotas, ampliando sus posibilidades de aplicación científica.
Perin et al. (2022)	Bioindicadores ambientales	Demuestran que los dinoflagelados bioluminiscentes pueden emplearse para evaluar toxicidad y detectar contaminantes ambientales.

Nota. Aportes relacionados con las aplicaciones biotecnológicas, biomédicas, científicas y ambientales de los sistemas bioluminiscentes. Elaboración propia.

Los estudios analizados evidencian que los sistemas bioluminiscentes poseen un amplio potencial científico y tecnológico. Syed y Anderson (2021) destacan su utilidad en investigación molecular, análisis de genes, identificación de interacciones biológicas y detección de sustancias. Estas aplicaciones se benefician de la elevada sensibilidad de la emisión luminosa y de la posibilidad de observar procesos sin recurrir a procedimientos altamente invasivos.

En el campo biomédico, las luciferasas permiten obtener imágenes de procesos celulares dentro de organismos vivos, facilitando el seguimiento de enfermedades y respuestas biológicas (Liu et al., 2021). Los avances recientes también han permitido mejorar



las rutas responsables de producir luz autónoma en células eucariotas, ampliando sus posibilidades para la investigación experimental (Shakhova et al., 2024). En el ámbito ambiental, los cambios en la intensidad luminosa de ciertos dinoflagelados permiten evaluar la presencia y los efectos de sustancias tóxicas (Perin et al., 2022).

En conjunto, los resultados muestran que la bioluminiscencia constituye un fenómeno complejo en el que convergen mecanismos químicos, procesos evolutivos, funciones ecológicas y aplicaciones tecnológicas. Los estudios revisados coinciden en que la diversidad de los sistemas luminosos representa una oportunidad relevante para comprender la adaptación de los organismos y desarrollar nuevas herramientas científicas. No obstante, difieren en los organismos estudiados, los mecanismos analizados y los campos de aplicación abordados.

Finalmente, la revisión permitió identificar que los principales avances científicos se concentran en el estudio de las luciferasas, la evolución de organismos marinos, la comunicación luminosa y el desarrollo de aplicaciones biomédicas y ambientales. Sin embargo, persisten vacíos relacionados con especies poco investigadas, la identificación de nuevos compuestos bioluminiscentes, la comprensión completa de sus funciones ecológicas y la optimización de estos sistemas para aplicaciones tecnológicas.

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la bioluminiscencia no corresponde a un mecanismo único, sino a un fenómeno diverso que integra procesos bioquímicos, adaptaciones evolutivas, funciones ecológicas y aplicaciones tecnológicas. Los estudios revisados coinciden en que la producción de luz se origina mediante reacciones químicas especializadas; sin embargo, difieren en los compuestos, enzimas y organismos analizados. Schramm y Weiß (2024) describen los mecanismos químicos generales responsables de la emisión luminosa, mientras que Dunuweera et al. (2024) presentan una visión más amplia de los diferentes sistemas bioluminiscentes y sus posibles aplicaciones. Esta comparación permite reconocer que, aunque la interacción entre luciferinas y luciferasas constituye uno de los mecanismos más conocidos, existen variaciones bioquímicas importantes entre especies. Estas diferencias sugieren que aún no existe un modelo unificado capaz de explicar



todos los mecanismos bioluminiscentes observados en la naturaleza, lo que constituye un desafío para futuras investigaciones.

Desde una perspectiva enzimática, Adams y Miller (2020) sostienen que la capacidad de producir luz pudo desarrollarse a partir de enzimas que originalmente cumplían otras funciones químicas. Este planteamiento complementa los hallazgos de Lomakina y Ugarova (2022), quienes demuestran que los sistemas basados en luciferasa pueden utilizarse para evaluar respuestas celulares frente al estrés. La diferencia entre ambos estudios radica en su orientación: el primero explica el origen evolutivo de las enzimas luminosas, mientras que el segundo analiza su utilidad como herramienta experimental. Esto evidencia que el estudio de la bioluminiscencia permite comprender procesos naturales y, al mismo tiempo, desarrollar aplicaciones científicas.

En relación con la evolución y diversidad biológica, Lau y Oakley (2021), DeLeo et al. (2024), Duchatelet y Dupont (2025) y Otjacques et al. (2023) coinciden en que la capacidad de emitir luz apareció de manera independiente en diferentes grupos de organismos. Lau y Oakley (2021) interpretan este fenómeno como un caso de evolución convergente, mientras que DeLeo et al. (2024) aportan evidencia sobre el origen antiguo de la bioluminiscencia en determinados organismos marinos. Por otro lado, Duchatelet y Dupont (2025) ofrecen una revisión amplia de los eucariotas marinos luminosos, mientras que Otjacques et al. (2023) concentran su análisis en la diversidad de estructuras bioluminiscentes presentes en los cefalópodos. Estas diferencias muestran que la evolución de la bioluminiscencia debe estudiarse considerando tanto su origen histórico como su diversidad funcional y morfológica. Aunque los autores coinciden en el origen múltiple de la bioluminiscencia, persisten interrogantes sobre los factores genéticos y ambientales que favorecieron su aparición independiente en distintos linajes evolutivos.

Las funciones ecológicas identificadas también presentan variaciones según el organismo y el entorno. Letendre et al. (2024) explican que la bioluminiscencia del plancton marino puede activarse mediante estímulos mecánicos, lo que sugiere una función defensiva o de respuesta ambiental. En contraste, Owens et al. (2022) muestran que las luciérnagas emplean señales luminosas principalmente para la comunicación reproductiva y que dichas señales pueden verse alteradas por la contaminación lumínica. Kim y Furuta (2024) amplían esta interpretación al señalar que la producción de luz puede relacionarse con



comunicación, defensa, alimentación y adaptación. Por tanto, la función de la bioluminiscencia no puede generalizarse, ya que depende de las características biológicas de cada especie y de las condiciones de su hábitat. Esta diversidad funcional evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones comparativas que permitan comprender con mayor precisión la relación entre bioluminiscencia, comportamiento y adaptación ecológica. Además, algunas especies utilizan la bioluminiscencia como mecanismo de protección frente a depredadores y carroñeros, evidenciando funciones ecológicas adicionales poco estudiadas (Cassells et al., 2024).

Desde una perspectiva aplicada, Syed y Anderson (2021), Liu et al. (2021), Shakhova et al. (2024) y Perin et al. (2022) coinciden en que los sistemas bioluminiscentes poseen un elevado potencial científico y tecnológico. Syed y Anderson (2021) destacan su uso en biotecnología, análisis molecular y detección biológica. Liu et al. (2021) se centran en las imágenes bioluminiscentes para observar procesos dentro de organismos vivos, mientras que Shakhova et al. (2024) desarrollan sistemas mejorados de bioluminiscencia autónoma en células eucariotas. En el ámbito ambiental, Perin et al. (2022) demuestran que determinados dinoflagelados pueden utilizarse como bioindicadores de toxicidad. Esta diversidad de aplicaciones evidencia que la bioluminiscencia puede emplearse en campos distintos, aunque cada uso presenta requerimientos técnicos y limitaciones específicas. Sin embargo, varios estudios coinciden en que todavía existen limitaciones relacionadas con la intensidad luminosa, la estabilidad de los sistemas bioluminiscentes y su aplicación en condiciones biológicas complejas.

Una limitación identificada en los estudios revisados es la diversidad de metodologías, organismos y objetivos de investigación. Algunos trabajos corresponden a revisiones amplias, otros desarrollan análisis evolutivos y otros se concentran en experimentos celulares, aplicaciones biomédicas o evaluación ambiental. Esta variedad enriquece la comprensión del fenómeno, pero dificulta la comparación directa de los resultados y limita la posibilidad de establecer conclusiones generales sobre todos los sistemas bioluminiscentes.

En conjunto, la evidencia analizada permite afirmar que la bioluminiscencia representa un fenómeno biológico complejo y diverso, cuya comprensión requiere integrar conocimientos de química, evolución, ecología y tecnología. Los estudios revisados muestran



coincidencias sobre su importancia adaptativa y científica, aunque difieren en los mecanismos, especies y aplicaciones estudiadas. Su potencial de investigación continúa siendo amplio, Los avances recientes en inteligencia artificial y diseño computacional también han permitido desarrollar nuevas luciferasas mediante aprendizaje profundo, ampliando las posibilidades futuras de la bioluminiscencia aplicada (Yeh et al., 2023). especialmente en la identificación de nuevos sistemas luminosos y en el desarrollo de herramientas científicas más eficientes.

6. CONCLUSIÓN

La revisión sistemática de los 15 artículos científicos permitió concluir que la bioluminiscencia constituye un fenómeno natural diverso mediante el cual diferentes organismos transforman energía química en luz visible. Los hallazgos muestran que la producción luminosa depende de mecanismos bioquímicos especializados, principalmente asociados con luciferinas y luciferasas, aunque las características de estas reacciones varían considerablemente entre especies.

En cuanto a su origen evolutivo, los estudios analizados evidencian que la bioluminiscencia apareció de manera independiente en diferentes grupos biológicos. Esta diversidad confirma que producir luz representa una adaptación relevante, capaz de ofrecer ventajas relacionadas con la supervivencia, la reproducción y la interacción con el entorno. Los organismos marinos presentan la mayor variedad de sistemas estudiados, pero todavía existen numerosas especies cuyos mecanismos luminosos permanecen desconocidos.

Respecto a las funciones ecológicas, la revisión permitió identificar que la bioluminiscencia puede utilizarse para la comunicación, la atracción de parejas o presas, la defensa, el camuflaje y la respuesta ante estímulos ambientales. Los resultados también muestran que factores externos, como la contaminación lumínica, pueden alterar estas funciones y afectar el comportamiento natural de determinadas especies.

En el ámbito científico y tecnológico, los sistemas bioluminiscentes ofrecen aplicaciones relevantes para observar procesos celulares, detectar alteraciones biológicas, evaluar sustancias tóxicas y desarrollar herramientas biomédicas y biotecnológicas. Su elevada sensibilidad y la posibilidad de obtener información con una intervención mínima convierten a la bioluminiscencia en un recurso valioso para diferentes áreas de investigación.



A partir de los hallazgos revisados, se reconoce la necesidad de ampliar las investigaciones sobre organismos poco estudiados, descubrir nuevos compuestos bioluminiscentes y optimizar los sistemas utilizados en aplicaciones científicas. También resulta necesario profundizar en los efectos de los cambios ambientales sobre las especies luminosas. De esta manera, el estudio de la bioluminiscencia puede contribuir tanto a comprender la diversidad de la vida como a desarrollar soluciones innovadoras en medicina, biotecnología y protección ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, S. T., Jr., & Miller, S. C. (2020). Enzymatic promiscuity and the evolution of bioluminescence. *The FEBS Journal*, 287(7), 1369–1380. <https://doi.org/10.1111/febs.15176>
- Braun, V., & Clarke, V. (2021). One size fits all? What counts as quality practice in (reflexive) thematic analysis? *Qualitative Research in Psychology*, 18(3), 328–352. <https://doi.org/10.1080/14780887.2020.1769238>
- Cassells, M. D., Labaude, S., & Griffin, C. T. (2024). Beware glowing cadavers: Bioluminescence of nematode symbiont *Photorhabdus* protects nematode-infected host cadavers from nocturnal scavengers. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, Article 1264251. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1264251>
- DeLeo, D. M., Bessho-Uehara, M., Haddock, S. H. D., McFadden, C. S., & Quattrini, A. M. (2024). Evolution of bioluminescence in Anthozoa with emphasis on Octocorallia. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 291(2021), Article 20232626. <https://doi.org/10.1098/rspb.2023.2626>
- Duchatelet, L., & Dupont, S. (2025). Marine eukaryote bioluminescence: A review of species and their functional biology. *Marine Life Science & Technology*, 7, 366–381. <https://doi.org/10.1007/s42995-024-00250-0>
- Dunuweera, A. N., Dunuweera, S. P., & Ranganathan, K. (2024). A comprehensive exploration of bioluminescence systems, mechanisms, and advanced assays for versatile applications. *Biochemistry Research International*, 2024, Article 8273237. <https://doi.org/10.1155/2024/8273237>



- Endo, M., & Ozawa, T. (2020). Advanced bioluminescence system for in vivo imaging with brighter and red-shifted light emission. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(18), Article 6538. <https://doi.org/10.3390/ijms21186538>
- Kim, S.-B., & Furuta, T. (2024). Bioluminescence from the bright and dark sides. *Frontiers in Chemical Biology*, 3, Article 1459397. <https://doi.org/10.3389/fchbi.2024.1459397>
- Kraus, S., Breier, M., Lim, W. M., Dabić, M., Kumar, S., Kanbach, D., Corvello, V., Piñeiro-Chousa, J., Liguori, E., Palacios-Marqués, D., Schiavone, F., Ferraris, A., Fernandes, C., & Ferreira, J. J. (2022). Literature reviews as independent studies: Guidelines for academic practice. *Review of Managerial Science*, 16(8), 2577–2595. <https://doi.org/10.1007/s11846-022-00588-8>
- Lau, E. S., & Oakley, T. H. (2021). Multi-level convergence of complex traits and the evolution of bioluminescence. *Biological Reviews*, 96(2), 673–691. <https://doi.org/10.1111/brv.12672>
- Letendre, F., Twardowski, M., Blackburn, A., Poulin, C., & Latz, M. I. (2024). A review of mechanically stimulated bioluminescence of marine plankton and its applications. *Frontiers in Marine Science*, 10, Article 1299602. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1299602>
- Li, S., Ruan, Z., Zhang, H., & Xu, H. (2021). Recent achievements of bioluminescence imaging based on firefly luciferin-luciferase system. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 211, Article 113111. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2020.113111>
- Lim, W. M. (2025). What is qualitative research? An overview and guidelines. *Australasian Marketing Journal*, 33(2), 199–229. <https://doi.org/10.1177/14413582241264619>
- Liu, S., Su, Y., Lin, M. Z., & Ronald, J. A. (2021). Brightening up biology: Advances in luciferase systems for in vivo imaging. *ACS Chemical Biology*, 16(12), 2707–2718. <https://doi.org/10.1021/acscchembio.1c00549>
- Lomakina, G. Y., & Ugarova, N. N. (2022). Bioluminescent test systems based on firefly luciferase for studying stress effects on living cells. *Biophysical Reviews*, 14(4), 887–892. <https://doi.org/10.1007/s12551-022-00978-y>



- Love, A. C., & Prescher, J. A. (2020). Seeing (and using) the light: Recent developments in bioluminescence technology. *Cell Chemical Biology*, 27(8), 904–920. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2020.07.022>
- Moilanen, T., Sivonen, M., Hipp, K., Kallio, H., Papinaho, O., Stolt, M., Turjamaa, R., Häggman-Laitila, A., & Kangasniemi, M. (2022). Developing a feasible and credible method for analyzing healthcare documents as written data. *Global Qualitative Nursing Research*, 9, Article 23333936221108706. <https://doi.org/10.1177/23333936221108706>
- Otjacques, E., Pissarra, V., Bolstad, K., Xavier, J. C., McFall-Ngai, M., & Rosa, R. (2023). Bioluminescence in cephalopods: Biodiversity, biogeography and research trends. *Frontiers in Marine Science*, 10, Article 1161049. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1161049>
- Owens, A. C. S., Van den Broeck, M., De Cock, R., & Lewis, S. M. (2022). Behavioral responses of bioluminescent fireflies to artificial light at night. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, Article 946640. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.946640>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Perin, L. S., Moraes, G. V. de, Galeazzo, G. A., & Oliveira, A. G. de. (2022). Bioluminescent dinoflagellates as a bioassay for toxicity assessment. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(21), Article 13012. <https://doi.org/10.3390/ijms232113012>
- Schramm, S., & Weiß, D. (2024). Bioluminescence—The vibrant glow of nature and its chemical mechanisms. *ChemBioChem*, 25(9), Article e202400106. <https://doi.org/10.1002/cbic.202400106>
- Shakhova, E. S., Karataeva, T. A., Markina, N. M., et al. (2024). An improved pathway for autonomous bioluminescence imaging in eukaryotes. *Nature Methods*, 21, 406–410. <https://doi.org/10.1038/s41592-023-02152-y>



Syed, A. J., & Anderson, J. C. (2021). Applications of bioluminescence in biotechnology and beyond. *Chemical Society Reviews*, 50, 5668–5705.
<https://doi.org/10.1039/D0CS01492C>

Yeh, A. H.-W., Norn, C., Kipnis, Y., Tischer, D., Pellock, S. J., Evans, D., Ma, P., Lee, G. R., Zhang, J. Z., Anishchenko, I., Coventry, B., Cao, L., Dauparas, J., Halabiya, S., DeWitt, M., Carter, L., Houk, K. N., & Baker, D. (2023). De novo design of luciferases using deep learning. *Nature*, 614, 774–780.
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05696-3>

Conflicto de Intereses: Los autores afirman que no existen conflictos de intereses en este estudio y que se han seguido éticamente los procesos establecidos por esta revista. Además, aseguran que este trabajo no ha sido publicado parcial ni totalmente en ninguna otra revista.

FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron financiamiento para el desarrollo de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA:

Nombres de autores e iniciales: Diana Cristina Macera Veintimilla (DCMV), Jhoni Javier Hoyos Caicedo (JJHC), Sandra Patricia Arteaga Vaca (SPAV), Katherine Gricelda Coello Taish (KGCT), Sandro Ricardo Rivera Peláez (SRRP).

1. Conceptualización: (DCMV)
2. Curación de datos: (DCMV)
3. Análisis formal: (JJHC)
4. Adquisición de fondos: (DCMV)
5. Investigación: (JJHC)
6. Metodología: (SPAV)
7. Administración del proyecto: (DCMV)
8. Recursos: (KGCT)
9. Software: (SRRP)
10. Supervisión: (SPAV)
11. Validación: (KGCT)
12. Visualización: (SRRP)
13. Redacción – Borrador original: (JJHC)
14. Redacción – Revisión y edición: (DCMV)

