



*Biología Celular Evolutiva: Integrando Células y Evolución*

*Evolutionary Cell Biology: Integrating Cells and Evolution*

*Biologia Celular Evolutiva: Integrar Células e Evolução*

Kimberly Zamira León Fiallos <sup>I</sup>

[kz.leonf@uea.edu.ec](mailto:kz.leonf@uea.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0005-5734-4482>

Gabriela Salomé Morales Ramos <sup>II</sup>

[gabriela.morales.pro@gmail.com](mailto:gabriela.morales.pro@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0005-4608-2202>

**Correspondencia:** [kz.leonf@uea.edu.ec](mailto:kz.leonf@uea.edu.ec)

Ciencias de la Salud

Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 20 de julio de 2024 \* **Aceptado:** 02 de agosto de 2024 \* **Publicado:** 25 de septiembre de 2024

- I. Máster Universitario en Aproximaciones Moleculares en Ciencias de la Salud. Docente en la Universidad Estatal Amazónica. Puyo-Ecuador.
- II. Máster Universitario en Aproximaciones Moleculares en Ciencias de la Salud. Investigadora Independiente. Ambato-Ecuador.

## Resumen

La biología celular abarca la estructura y fisiología a nivel celular, así como la biología molecular. Los nuevos descubrimientos en biología celular son el resultado del desarrollo de técnicas de investigación innovadoras, como la microscopía láser, la biotecnología de ácidos nucleicos (ADN y ARN) y la inmunohistoquímica, entre otras. Mientras tanto, la biología celular evolutiva se centra en explorar los orígenes, principios y funciones centrales de las características celulares y las redes regulatorias en el contexto de la evolución. Comprender el estado del arte en este campo es crucial para entender la teoría evolutiva desde una perspectiva integradora de la biología celular, lo que permitirá formular preguntas y experimentos que aborden adecuadamente la evolución y diversidad de los sistemas celulares. Los estudios sugieren que, en los últimos años, el campo emergente de la biología celular evolutiva ha ganado atención creciente y ha contribuido significativamente a mejorar nuestra comprensión de los orígenes y la diversidad de la complejidad celular. La biología celular evolutiva tiene el potencial de cerrar la brecha entre los enfoques evolutivos y los programas de investigación a nivel celular, tisular y de organismos desde las perspectivas funcionales de la biología celular, la biología del desarrollo y la ecología. Sin embargo, el vínculo entre la biología celular y la biología evolutiva sigue siendo un territorio relativamente inexplorado.

**Palabras Clave:** biología celular; biología celular evolutiva; teoría de la evolución.

## Abstract

Cell biology encompasses cellular level structure and physiology as well as molecular biology. New discoveries in cell biology are the result of the development of innovative research techniques, such as laser microscopy, nucleic acid (DNA and RNA) biotechnology, and immunohistochemistry, among others. Meanwhile, evolutionary cell biology focuses on exploring the origins, principles, and core functions of cellular features and regulatory networks in the context of evolution. Understanding the state of the art in this field is crucial to understanding evolutionary theory from an integrative cell biology perspective, which will allow formulating questions and experiments that adequately address the evolution and diversity of cellular systems. Studies suggest that, in recent years, the emerging field of evolutionary cell biology has gained increasing attention and has significantly contributed to improving our understanding of the origins and diversity of cellular complexity. Evolutionary cell biology has the potential to bridge the gap between evolutionary approaches and research programs at the cellular, tissue and organismal levels from

the functional perspectives of cell biology, developmental biology and ecology. However, the link between cell biology and evolutionary biology remains relatively unexplored territory.

**Keywords:** cell biology; evolutionary cell biology; theory of evolution.

### **Resumo**

A biologia celular abrange a estrutura e a fisiologia a nível celular, bem como a biologia molecular. As novas descobertas em biologia celular são o resultado do desenvolvimento de técnicas de investigação inovadoras, como a microscopia laser, a biotecnologia de ácidos nucleicos (DNA e RNA) e a imunohistoquímica, entre outras. Enquanto isso, a biologia celular evolutiva centra-se na exploração das origens, princípios e funções centrais das características celulares e das redes reguladoras no contexto da evolução. Compreender o estado da arte neste campo é crucial para compreender a teoria evolutiva numa perspetiva integrativa da biologia celular, o que nos permitirá formular questões e experiências que abordem adequadamente a evolução e a diversidade dos sistemas celulares. Estudos sugerem que, nos últimos anos, o campo emergente da biologia celular evolutiva tem vindo a ganhar cada vez mais atenção e tem contribuído significativamente para melhorar a nossa compreensão das origens e da diversidade da complexidade celular. A biologia celular evolutiva tem o potencial de preencher a lacuna entre as abordagens evolutivas e os programas de investigação a nível celular, tecidual e do organismo, a partir das perspetivas funcionais da biologia celular, da biologia do desenvolvimento e da ecologia. No entanto, a ligação entre a biologia celular e a biologia evolutiva continua a ser um território relativamente inexplorado.

**Palavras-chave:** biologia celular; biologia celular evolutiva; teoria da evolução.

### **Introducción**

La biología celular evolutiva es una ciencia emergente que busca integrar dos campos fundamentales de la biología: la biología celular y la biología evolutiva. En las últimas décadas, estas dos disciplinas han avanzado en paralelo, ofreciendo por un lado perspectivas fundamentales sobre la estructura y fisiología celular, y por otro, sobre los mecanismos evolutivos. Sin embargo, la convergencia de estos campos ofrece un marco de referencia crucial para abordar preguntas esenciales sobre la diversificación y adaptación de células y organismos.

La biología celular tradicional se ha centrado en comprender la organización y los procesos celulares utilizando técnicas avanzadas como la microscopía láser, la biotecnología de ácidos nucleicos (ADN y ARN) y la inmunohistoquímica (Alberts et al., 2014). Estos avances han desentrañado la complejidad de los sistemas celulares en diversos organismos, proporcionando una comprensión detallada de las estructuras subcelulares y sus redes regulatorias.

Paralelamente, la biología evolutiva ha profundizado en el estudio de los procesos de variación y selección natural, basándose en los conceptos de la teoría de la evolución de Darwin (Darwin, 1859; Mayr, 2001). Sin embargo, la integración de estos conceptos con la biología celular ha sido limitada.

La biología celular evolutiva ha ganado protagonismo en las últimas décadas, y los estudios que la definen son relativamente recientes. Esta nueva disciplina se describe a sí misma como "el estudio de los patrones de variación en las características celulares dentro y entre especies, y de los mecanismos (bloques de construcción moleculares y fundamentos genéticos poblacionales) responsables de su establecimiento y mantenimiento" (Lynch, 2012).

En consecuencia, busca fusionar estas dos disciplinas biológicas principales, fomentando el desarrollo de una metodología integral que incorpore a diversos autores, conceptos, teorías, técnicas y perspectivas filosóficas en biología. Su objetivo principal es facilitar el estudio de las células, incluyendo su estructura, funciones y cambios evolutivos (Islas-Morales et al., 2021).

Esta revisión tiene como objetivo recapitular, desde una perspectiva histórica, los orígenes de la biología celular y su integración en la teoría evolutiva a lo largo de los años, teniendo en cuenta los avances recientes en la biología celular evolutiva y los desafíos persistentes en su plena integración, con el fin de proporcionar una visión integral que enriquezca la comprensión de la evolución y diversidad de los sistemas celulares.

## **Visión general de la biología celular**

### **Los orígenes de la biología celular**

La célula ha sido reconocida desde el siglo XIX como la unidad estructural y fisiológica fundamental de todos los seres vivos (González, 1990). Fue descrita por primera vez en 1665 por Robert Hooke, quien reveló un mundo microscópico de supuesta variación ilimitada dentro y entre plantas, animales, hongos, eucariotas unicelulares, arqueobacterias y eubacterias. Con el tiempo, la teoría celular, que definió la célula como la unidad anatómica, funcional y ontogenética de

plantas y animales, se convirtió en el axioma principal de las ciencias experimentales agrupadas bajo el término fisiología. Paralelamente al desarrollo de la teoría darwiniana, cuando ambas teorías fueron aceptadas, la biología emergió como una disciplina (Islas-Morales et al., 2021).

El nacimiento de la biología celular como una ciencia independiente se atribuye a los trabajos de Schleiden (1838) y Schwann (1839), citados en López (2022), quienes demostraron a través de sus publicaciones que las células eran la unidad estructural de todos los tejidos vivos. Sin embargo, su desarrollo como disciplina científica fue un proceso gradual que dependió en gran medida de la invención del microscopio óptico, lo que llevó al descubrimiento de la célula. Comprender la estructura, función, comportamiento y evolución de las células nos permite abordar los problemas históricos de la vida en la Tierra, sus orígenes misteriosos, su asombrosa diversidad y la invasión de cada hábitat imaginable.

Desde esta perspectiva, la biología celular puede ofrecer respuestas a preguntas sobre qué es la vida y cómo funciona (Alberts et al., 2004). Sin embargo, los desafíos son numerosos. La clasificación de los tipos celulares sigue siendo un objetivo principal para los biólogos celulares. Debido a los nuevos avances, la categorización tradicional basada en la morfología, ubicación o fisiología se ha visto complementada por el detalle sin precedentes de los datos ómicos de célula única, en particular la secuenciación de ARN de célula única (Doyle, 2022).

### **Diversidad celular y modelos de investigación**

Un elemento importante que benefició el estudio de la biología celular fue el descubrimiento de que las células descienden de un ancestro común y que sus propiedades fundamentales se han mantenido a lo largo de la evolución. Los biólogos celulares, utilizando este conocimiento, han examinado y seleccionado organismos modelo representativos de varias especies, contribuyendo así a la comprensión de la función celular.

En este contexto, y como ejemplos de áreas de investigación en biología celular, es relevante destacar la selección del eubacteria en forma de bastón *Escherichia coli* como organismo modelo representativo de las bacterias. Este organismo ha proporcionado la mayor parte de nuestro conocimiento sobre los procesos de replicación del ADN celular y la decodificación de estas instrucciones genéticas para producir proteínas, un proceso que luego se confirmó que funciona esencialmente de la misma manera en los humanos (Hemm et al., 2020).

En esta misma línea de investigación, para el estudio de organismos eucariotas, se eligió a la levadura unicelular *Saccharomyces cerevisiae* como organismo modelo representativo. Se

considera un modelo mínimo, simple y robusto que se reproduce rápidamente, comparte características tanto con animales como con plantas, y representa el grupo de organismos eucariotas al que pertenecemos. Su estudio ha sido fundamental para entender el ciclo de división celular (Natalino & Fumasoni, 2023).

Por otro lado, *Arabidopsis thaliana* fue elegida como planta modelo representativa. Su estudio ha ampliado el conocimiento sobre la genética, biología molecular y evolución de las plantas con flores. Dado que posee genes equivalentes en especies agrícolas, estas investigaciones son clave para entender el desarrollo y la fisiología de cultivos esenciales para la vida (Lan et al., 2021; Takou et al., 2019).

Para el estudio del reino animal, los organismos modelo multicelulares están representados por una mosca, un gusano, un ratón y *Homo sapiens*. La selección de estos organismos modelo se basa en el hecho de que los insectos comprenden la mayoría de las especies animales. Los estudios sobre la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster* revelaron que su genoma contiene equivalentes para la mayoría de los genes que son esenciales en las enfermedades humanas (Duhart & Mosca, 2022). Del mismo modo, el 70% de las proteínas humanas tienen un equivalente en el gusano nematodo *Caenorhabditis elegans*. Los estudios sobre esta especie han ayudado a aclarar el proceso de apoptosis, que es de interés significativo en la investigación del cáncer (Greiss et al., 2008; Hoffman et al., 2014; Sang et al., 2022).

De manera similar, los ratones se han utilizado como modelos en investigaciones sobre genética, desarrollo, inmunología y biología celular de mamíferos. Los estudios con este modelo han revelado que casi todos los genes humanos tienen un homólogo en los ratones, lo que significa que tienen secuencias y funciones similares de ADN. Esto resalta su importancia como modelo en diversas investigaciones (Chuprin et al., 2023; Kim & Zack, 2022; Laporte et al., 2022; Wang & Dunlop, 2019).

A excepción de los humanos, ninguna otra especie ha sido tan ampliamente examinada, descrita e investigada. Esto se debe en gran parte a que la investigación en varias áreas de la biología celular ha sido influenciada por el interés médico, resultando en que una parte significativa de nuestro conocimiento en este campo provenga de estudios sobre células humanas (Panicker et al., 2021; Perera, 2021). En este contexto, el desarrollo de la ingeniería genética ha permitido entender las consecuencias de las mutaciones en miles de genes diferentes, que están registradas en una vasta base de datos médica de células humanas (Lanigan et al., 2020).

Por practicidad, la biología celular se ha centrado históricamente en las características promedio de células genéticamente uniformes de miembros de grandes poblaciones. Sin embargo, la selección natural no opera directamente sobre los promedios de población, sino sobre la variación entre individuos. Además, la respuesta evolutiva a la selección de un rasgo no es simplemente una cuestión de variación, sino una función de la fracción de variación que tiene una base genética (Lynch et al., 2014).

Las nuevas tecnologías han facilitado la estimación de estos parámetros clave al permitir ensayos de alto rendimiento en células individuales. Varios autores afirman que aplicar estos métodos a poblaciones genéticamente uniformes revela una variación sustancial entre células en el número de transcritos y proteínas de genes específicos en todos los dominios de la vida (Buccitelli & Selbach, 2020; Newman et al., 2006; Potapenko et al., 2023; Taniguchi et al., 2010; Wang & Dunlop, 2019). Esta variación (ruido celular intrínseco) (Zhou et al., 2021) parece ser una consecuencia natural de las características biofísicas de las interacciones entre factores de transcripción y sus sitios de unión, que pueden cuantificarse de manera mecánica (Cao y Grima, 2020; Thattai & Oudenaarden, 2001). Estas observaciones, que se pueden extender a otros rasgos intracelulares (Farhadifar y Needleman, 2014), son esenciales para comprender los límites de la capacidad evolutiva de las características celulares.

## **La biología celular evolutiva como disciplina**

### **Definición y contexto histórico**

Según Lynch et al. (2014), la biología celular evolutiva se centra en explorar los orígenes, principios y funciones centrales de las características celulares y redes regulatorias a la luz de la evolución. Por lo tanto, busca implícitamente integrar dos entidades epistémicas históricamente contrastantes, la teoría celular y la teoría evolutiva, en una sola disciplina capaz de estudiar las células, su forma, función y cambios. Es relevante destacar que ambas teorías tienen una gran relevancia en biología, pero surgen de marcos conceptuales diferentes: el empirismo de la teoría celular y el historicismo de la teoría evolutiva (Mazzarello, 1999).

La teoría de la evolución de Darwin, articulada en su publicación de 1859, proporcionó la clave para entender el comportamiento de las células y los organismos al demostrar cómo la variación aleatoria y la selección natural conducen a la producción de organismos con nuevas características adaptadas a nuevas formas de vida. Esto explicó cómo surgió la diversidad entre los organismos que comparten un ancestro común.

Esto llevó a la combinación de la teoría evolutiva con la teoría celular para obtener una visión integral de la vida desde sus orígenes hasta el presente, en forma de un árbol de la vida de células individuales (Alberts et al., 2004). Sin embargo, el origen de la vida en el planeta Tierra sigue siendo uno de los mayores enigmas de la ciencia debido al inmenso salto en la complejidad molecular entre los pasos iniciales en el surgimiento de la vida y el Último Ancestro Común Universal (Weiss et al., 2016), lo que desafía históricamente los enfoques de "química hacia adelante" y "biología hacia atrás" (Kalambokidis & Travisano, 2024).

Entre los antecedentes directos que revolucionaron la biología celular evolutiva destaca el desarrollo de la biología molecular, ya que permitió la expansión de las taxonomías bioquímicas y morfológicas a través del uso de características moleculares (Islas-Morales et al., 2021). El descubrimiento de la estructura de doble hélice del ADN en 1953 abrió el camino para estudiar las secuencias de aminoácidos de las proteínas en organismos y compararlas entre especies (Cobb, 2017). Describir los cambios en las secuencias de aminoácidos y nucleótidos permitió la construcción de filogenias y la elucidación de las relaciones evolutivas entre especies, demostrando que las moléculas informan la historia evolutiva (Zuckerandl y Pauling, 1965). Los avances en la secuenciación de ADN llevaron al desarrollo de la evolución molecular, que condensa los caracteres moleculares en cuatro letras (A-C-G-T) basadas en la uniformidad del dogma central (ADN-ARN-Proteína) (Stent, 1968) y permite inferir filogenias a través de métodos estadísticos (Grahame & Avise, 1995).

El árbol de la vida propuesto por Woese et al. (1990) despegó las filogenias moleculares de las características celulares complejas y sugirió una revolución en el concepto de bacterias formulado por Steiner y Niel. El énfasis de Woese en la naturaleza molecular del gen ribosómico sobre la morfología y el metabolismo dividió la vida en tres dominios: Eukarya, Bacteria y Archaea. Investigaciones posteriores sobre la estructura de las células arqueas confirmaron su alineación con la filogenia del gen ribosómico de Woese y apoyaron la visión de un árbol de la vida formado por estos tres dominios (Zillig, 1991).

Sin embargo, la formulación de la teoría de la endosimbiosis por Lynn Margulis, basada en la morfología comparativa, fue necesaria para explicar los cambios graduales en la complejidad que la filogenia reductiva de un solo gen de Woese no podía revelar (Sagan, 1967). La teoría de la endosimbiosis fue posteriormente validada por datos moleculares, lo que llevó a la conclusión de que los genes por sí solos no son suficientes para explicar la evolución. Para explicar la evolución



de diferentes grados de complejidad celular, es necesario integrar la morfología y la biología celular con la filogenómica (Dyall y Johnson, 2000; Margulis y Fester, 1991).

El árbol de la vida está en un estado constante de cambio debido a la integración de nuevos datos (big data), principalmente provenientes de enfoques ómicos. Más recientemente, el uso de metagenómica y filogenómica ha llevado al descubrimiento y clasificación de cinco nuevos filos de arqueas. Esta nueva diversidad ha sido analizada a través de enfoques que combinan características moleculares y morfológicas. Estos enfoques son precursores directos de la biología celular evolutiva moderna porque permiten la integración de datos moleculares, funcionales y morfológicos, los cuales pueden adquirir relevancia biológica para abordar preguntas desde una perspectiva de biología celular que avanza en la comprensión de la evolución celular (Islas-Morales et al., 2021).

Sin embargo, debido a contingencias históricas y limitaciones técnicas, el pensamiento evolutivo se ha centrado más en la zoología y la botánica y se ha aplicado menos a la biología celular (Brodsky et al., 2012; Lynch et al., 2014; Lynch y Trickovic, 2020). No obstante, el siglo pasado ha sido testigo de enormes avances en la comprensión del funcionamiento celular, aunque la evolución de los procesos celulares aún no se comprende bien. A pesar de estos desafíos, el campo emergente de la biología celular evolutiva ha ganado una atención creciente y ha contribuido significativamente a la comprensión de los orígenes y la diversidad de la complejidad celular.

Muchos estudios han destacado una sorprendente diversidad molecular en la forma en que las células de diversas especies ejecutan los mismos procesos, y se espera que los avances en genómica comparativa revelen mucha más diversidad molecular de lo que se pensaba anteriormente. Según Natalino y Fumasoni (2023), las células existentes siguen siendo el producto de una historia evolutiva que en gran medida ignoramos, y la biología celular evolutiva ha surgido como una disciplina centrada en cerrar esta brecha de conocimiento al combinar las perspectivas de la biología evolutiva, molecular y celular.

### **El papel de la biología celular en la biología evolutiva**

Anteriormente, Lynch et al. (2014) mencionaron que la incorporación de la biología celular al ámbito principal de la ciencia evolutiva debería haber ocurrido hace mucho tiempo, afirmando que todas las características de un organismo son funciones de estructuras y procesos que se desarrollan a nivel celular. Señalaron que la mayoría de los avances significativos en biología en los últimos cinco años provienen del campo de la biología celular. En este contexto, sugirieron que establecer

un campo formal de biología celular evolutiva requeriría integrar el catalogado de la diversidad a través de estudios comparativos dentro de un marco teórico explicativo. El objetivo principal no sería simplemente documentar lo que ha evolucionado, sino entender los mecanismos por los cuales han ocurrido los cambios y determinar cómo podrían ser fomentados (o desalentados) para avanzar en ciertas situaciones prácticas.

Según Lynch y Trickovic (2020), la conexión entre la Biología Celular y la Biología Evolutiva es una de las últimas áreas inexploradas en la biología evolutiva. Argumentan que todos los fenotipos eventualmente surgen de eventos a nivel celular, proporcionando así un vínculo esencial para construir una teoría de la evolución basada en mecanismos, respaldada por impresionantes avances en metodologías biológicas celulares a nivel estructural y funcional.

Subrayan que el principal desafío para el desarrollo de la teoría evolutiva es establecer un marco cuantitativo que trascienda las fronteras de las especies. Proponen dos enfoques para este problema: establecer la distribución de estados estacionarios de fenotipos medios a largo plazo bajo regímenes específicos de mutación, selección y deriva genética; y evaluar los costos energéticos asociados con las estructuras y funciones celulares. En su opinión, estas plataformas teóricas podrían ofrecer valiosos conocimientos sobre una amplia gama de problemas no resueltos, desde la estructura del genoma hasta la arquitectura celular y la motilidad en diversos organismos en el Árbol de la Vida. Un aspecto relevante para estos autores es que la existencia de pruebas empíricas contundentes a nivel molecular y celular sugiere que no todos los aspectos de la biodiversidad han sido optimizados mediante procesos de selección natural. Adherirse a esta creencia es una postura común pero incorrecta. Esta visión limitada, según Lynch et al. (2014), propone que los únicos desconocidos en biología evolutiva están relacionados con las identidades de los agentes selectivos que actúan sobre rasgos específicos.

Sin embargo, los modelos genéticos de población aclaran que el poder de la selección natural para promover mutaciones beneficiosas y eliminar las perjudiciales está fuertemente influenciado por otros factores, como la deriva genética aleatoria, que impone ruido en el proceso evolutivo debido al número finito de individuos, y la arquitectura cromosómica. Por lo tanto, en lugar de que la complejidad del genoma sea impulsada por la selección natural, muchos aspectos de ella surgen en realidad como consecuencia de una selección ineficiente.

Tal estocasticidad lleva a la hipótesis de la barrera de deriva a los límites evolutivos del refinamiento molecular (Lynch, 2011; Lynch 2012). Esta hipótesis propone que la medida en que

la selección natural puede refinar cualquier adaptación está determinada por el tamaño efectivo de la población. Sin embargo, Lynch y Trickovic (2020) afirman que la selección natural está presente en todas partes, sin implicar que la evolución abiertamente maladaptativa esté en auge. En su lugar, existe un amplio espacio dentro del dominio de la neutralidad efectiva en la mayoría de las especies, especialmente en los eucariotas, lo que hace probable que cambios significativos se acumulen a nivel molecular y celular durante largos períodos evolutivos en ausencia de una selección diversificada. Una vez establecidos, los cambios acumulativos en la estructura genética y la arquitectura del genoma, dictados por la deriva y la mutación sesgada, resultan en un cambio fundamental en los tipos de "inmuebles" sobre los que la selección natural opera a través de la descendencia con modificación. En este sentido, Doyle (2022) también afirma que la evolución ocurre a través de una combinación de mutación, recombinación, selección natural y derivación genética.

### **Desafíos persistentes en la integración de la biología celular y la teoría evolutiva**

En la revisión de Islas-Morales et al. (2021), la exploración de si la biología celular evolutiva es realmente interdisciplinaria a través de la combinación de la biología celular y la biología evolutiva ofrece perspectivas basadas en evidencia sobre las principales preguntas de la evolución celular. Este estudio afirma que la teoría celular y la teoría evolutiva son probablemente los corolarios más importantes en biología, y que la biología celular evolutiva ha ganado una creciente atención en las últimas décadas. Sin embargo, mencionan que persisten desafíos para una integración completa. Entre las limitaciones para un vínculo total entre las dos disciplinas, mencionan el número limitado de organismos modelo y técnicas de cultivo disponibles, que excluyen la mayor parte de la diversidad celular existente del alcance de la investigación experimental.

Conceptualmente, la simplificación de los procesos evolutivos influenciada por visiones culturales de la evolución, como el adaptacionismo o la Scala Naturae, desafía el trabajo interdisciplinario efectivo. Afirman que, sin una comprensión profunda de la teoría evolutiva y sus diferencias epistemológicas y metodológicas con respecto a la biología celular, y desde una perspectiva integradora de la biología celular, formular preguntas y experimentos que aborden adecuadamente la evolución y diversificación de las complejidades celulares puede ser engañoso. Por lo tanto, para la comunidad científica, la teoría evolutiva debe convertirse en una base teórica no dogmática y dinámica. Proponen que las hipótesis experimentales deberían incorporar orgánicamente la evolución en enfoques funcionales y viceversa.

### **Próximos pasos en la Biología Celular Evolutiva**

Utilizando métodos comparativos, los biólogos evolutivos han intentado durante más de un siglo explorar la historia de la vida en la Tierra para desentrañar los orígenes de rasgos novedosos, innovaciones y transiciones significativas (Szathmáry & Smith, 1995; Weiss et al., 2016). Con este fin, se han desarrollado enfoques de vanguardia en química avanzada. Estos enfoques, comenzando con experimentos pioneros como el experimento de descarga de chispas de Miller-Urey, que permitió la síntesis de aminoácidos en una atmósfera considerada un modelo de la Tierra primitiva, han llevado a resultados que dieron lugar a estudios experimentales en química prebiótica. Estos estudios facilitaron un inventario de compuestos orgánicos supuestamente necesarios para la vida (McCollom, 2013). Aunque estas perspectivas son útiles, no son suficientes para aclarar el camino hacia los procesos celulares simples que dieron lugar a estrategias orientadas hacia la autoorganización macromolecular y la autocatalisis (Hordijk et al., 2012; Kauffman, 1993).

Estudios recientes han demostrado cómo incluso procesos moleculares esenciales, como la replicación del ADN, pueden experimentar una rápida evolución adaptativa bajo ciertas condiciones de laboratorio. Este conocimiento abre nuevas líneas de investigación para investigar experimentalmente la evolución de los procesos celulares. Estas investigaciones destacan una vez más la utilidad de utilizar organismos modelo, como la levadura, que siempre están a la vanguardia de esta línea de investigación. La levadura puede servir para probar hipótesis, principios e ideas en biología celular evolutiva como un "laboratorio celular evolutivo". Permiten la observación de la adaptación evolutiva rápida y proporcionan numerosas herramientas en biología genómica, sintética y celular, ya desarrolladas por una gran comunidad, que benefician a la biología en general (Natalino & Fumasoni, 2023).

El desarrollo futuro de la biología celular evolutiva debe considerar el aumento de la diversidad de organismos modelo para representar de manera justa la diversidad celular. Para que la biología celular complemente la investigación evolutiva, debe considerar cuidadosamente la diversidad de la información a nivel celular. En el proceso de investigar la biología celular evolutiva, las limitaciones funcionales celulares conocidas en organismos modelo ampliamente utilizados en biología celular deberían compararse con los conocimientos obtenidos de la meta-análisis de la diversidad desconocida. Los avances en omicas in situ, microscopía, bioinformática y biología celular deben incorporarse debido a su importancia para el proceso de investigación en biología celular evolutiva. Estos avances facilitan estudios detallados de células de diferentes linajes,

permitiendo enfoques comparativos y avanzando en las hipótesis evolutivas relacionadas con la diversidad de los microbios existentes (Islas-Morales et al., 2021).

El avance en el desarrollo de la biología celular evolutiva depende de su principal desafío, que es educativo y cultural. Para asegurar el éxito, las futuras generaciones de científicos e investigadores deben adquirir una educación sólida y extensa en la teoría y metodología de la evolución, evitando opiniones erróneas y simplificaciones de la teoría evolutiva (como el adaptacionismo) que siguen siendo prevalentes en la comunidad científica mundial. En consecuencia, la educación en biociencias debería mejorar la enseñanza de la evolución con el mismo esfuerzo que se ha dedicado a mejorar las habilidades técnicas en biología celular, molecular y computacional. Esto es esencial para que los biólogos, independientemente de sus disciplinas, se comprendan metodológicamente y establezcan enfoques integradores basados en valores epistemológicos comunes (Islas-Morales et al., 2021).

### **Conclusiones**

La biología celular evolutiva tiene el potencial de cerrar la brecha existente entre los enfoques evolutivos y los programas de investigación a nivel celular, tisular y de organismo, desde las perspectivas funcionales de la biología celular, la biología del desarrollo y la ecología. Cerrar la brecha existente entre la biología evolutiva y la biología celular permitirá mejorar la comprensión de la mayoría de los procesos biológicos. Los esfuerzos deben combinarse con otras disciplinas evolutivas, como la genética de poblaciones y la biología comparativa, que comparten los mismos objetivos y objetos de estudio, sin descuidar enfoques clásicos como la sistemática, que son cruciales como fuente para la planificación transdisciplinaria de nuevas estrategias de investigación.

La comunidad científica coincide en que la biología celular evolutiva es un tema de discusión filosófica. No obstante, los programas de investigación deberían beneficiarse de una comunidad que promueva una cultura epistemológica e histórica para identificar y examinar críticamente los valores comunes entre disciplinas y lograr una verdadera transdisciplinaria. La biología celular evolutiva podría ser una oportunidad prometedora para la integración metodológica y la conciliación teórica entre la biología celular y la biología evolutiva.

## Referencias

- Alberts, B., Baray, D., Hopkin, K., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., y Walter, P. (2004). *Introducción a la Biología Celular*. 2da Edición. Editorial Médica Panamericana. <https://acortar.link/nWQRIC>
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., Walter, P., Hopkin, K. & Bray, D. (2014). *Molecular Biology of the Cell*. Garland Science. <https://acortar.link/zaD77v>
- Brodsky, F., Thattai, M., & Mayor, S. (2012). Evolutionary cell biology: Lessons from diversity. *Nat. Cell Biol.* 14 651. <https://www.nature.com/articles/ncb2539>
- Buccitelli, C., & Selbach, M. (2020). mRNAs, proteins and the emerging principles of gene expression control. *Nature Reviews. Genetics*, 21(10), 630–644. <https://doi.org/10.1038/s41576-020-0258-4>
- Cao, Z., & Grima, R. (2020). Analytical distributions for detailed models of stochastic gene expression in eukaryotic cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(9), 4682–4692. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910888117>
- Chuprin, J., Buettner, H., Seedhom, M., Greiner, D., Keck, J., Ishikawa, F., Shultz, L., & Brehm, M. (2023). Humanized mouse models for immuno-oncology research. *Nature Reviews. Clinical Oncology*, 20(3), 192–206. <https://doi.org/10.1038/s41571-022-00721-2>
- Cobb, M. (2017). Hace 60 años, Francis Crick cambió la lógica de la biología. *PLoS Biol.*, 15(e2003243). <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.2003243>
- Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species*. John Murray. <https://rauterberg.employee.id.tue.nl/lecturenotes/DDM110%20CAS/Darwin-1859%20Origin%20of%20Species.pdf>
- Doyle, J. (2022). Cell types as species: Exploring a metaphor. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.868565>
- Duhart, J., & Mosca, T. (2022). Genetic regulation of central synapse formation and organization in *Drosophila melanogaster*. *Genetics*, 221(3). <https://doi.org/10.1093/genetics/iyac078>
- Dyall, S., y Johnson, P. (2000). Orígenes de los hidrogenosomas y las mitocondrias: evolución y biogénesis de orgánulos. *Actual. Opinión. Microbiol.*, 3, 404–411. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369527400001120>

- Farhadifar, R., & Needleman, D. (2014). Segmentación automatizada del primer huso mitótico en imágenes de microcopia de contraste de interferencia diferencial de embriones de *C. elegans*. *Métodos Mol Biol*, 1136(49), 41–45. [https://link.springer.com/protocol/10.1007/978-1-4939-0329-0\\_3](https://link.springer.com/protocol/10.1007/978-1-4939-0329-0_3)
- González, J. (1990). Elementos dinámicos de la teoría celular. *Revista de Filosofía (Madrid)*, 3, 83–109. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=900729>
- Grahame, J., & Avise, J. (1995). Marcadores moleculares, historia natural y evolución. *J. Anim. Ecológico*, 64, 538. <https://acortar.link/6Baxs2>
- Greiss, S., Schumacher, B., Grandien, K., Rothblatt, J., & Gartner, A. (2008) Transcriptional profiling in *C. elegans* suggests DNA damage dependent apoptosis as an ancient function of the p53 family. *BMC Genomics* 9(334) <https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2164-9-334>
- Hemm, M., Weaver, J., y Storz, G. (2020). *Escherichia coli* Small Proteome. *EcoSal Plus*, 9(1). <https://doi.org/10.1128/ecosalplus.esp-0031-2019>
- Hoffman, S., Martin, D., Meléndez, A., & Bargonetti, J. (2014) *C. elegans* CEP-1/p53 and BEC-1 Are Involved in DNA Repair. *PLoS ONE* 9(2): e88828. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088828>
- Hordijk, W., Steel, M., & Kauffman, S. (2012). The Structure of Autocatalytic Sets: Evolvability, Enablement, and Emergence. *Acta Biotheoretica*, 60(4), 379–392. <https://doi.org/10.1007/s10441-012-9165-1>
- Islas-Morales, P. F., Jiménez-García, L. F., Mosqueira-Santillán, M., & Voolstra, C. R. (2021). Evolutionary Cell Biology (ECB): Lessons, challenges, and opportunities for the integrative study of cell evolution. *Journal of Biosciences*, 46(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s12038-020-00129-z>
- Kalambokidis, M., & Travisano, M. (2024). The eco-evolutionary origins of life. *Evolution*, 78(1), 1–12. <https://doi.org/10.1093/evolut/qpaa195>
- Kauffman, S. (1993). *Los orígenes del orden: autoorganización y selección en la evolución*. Prensa de La Universidad de Oxford. <https://acortar.link/ybzsCY>
- Kim, J., & Zack, J. (2022). A humanized mouse model to study NK cell biology during HIV infection. *The Journal of Clinical Investigation*, 132(24). <https://doi.org/10.1172/JCI165620>

- Lan, Y., Sun, R., Ouyang, J., Ding, W., Kim, M.-J., Wu, J., Li, Y., & Shi, T. (2021). AtMAD: Arabidopsis thaliana multi-omics association database. *Nucleic Acids Research*, 49(D1), D1445–D1451. <https://doi.org/10.1093/nar/gkaa1042>
- Lanigan, T., Kopera, H., & Saunders, T. (2020). Principles of Genetic Engineering. *Genes*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/genes11030291>
- Laporte, E., Nys, C., & Vankelecom, H. (2022). Development of Organoids from Mouse Pituitary as In Vitro Model to Explore Pituitary Stem Cell Biology. *Journal of Visualized Experiments : JoVE*, 180. <https://doi.org/10.3791/63431>
- López, E. (2022). La indagación y el juego en el aprendizaje del concepto de ser vivo (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82081>
- Lynch, M. (2011). El límite inferior de la evolución de las tasas de mutación. *Genoma Biol Evol*, 3, 1107–1118. <https://academic.oup.com/gbe/article/doi/10.1093/gbe/evr066/588039?login=false>
- Lynch, M. (2012). Capas evolutivas y los límites de la perfección celular. *Proc Natl Acad Sci EE.UU*, 109(46), 18851–18856. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1216130109>
- Lynch, M., & Trickovic, B. (2020). A Theoretical Framework for Evolutionary Cell Biology. *Journal of Molecular Biology*, 432(7), 1861–1879. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2020.02.006>
- Lynch, M., Field, M., Goodson, H., Malik, H., Pereira-Leal, J., Roos, D., Turkewitz, A., & Sazer, S. (2014). Evolutionary cell biology: Two origins, one objective. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(48), 16990–16994. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415861111>
- Margulis, L., y Fester, R. (1991). La simbiosis como fuente de innovación evolutiva: especiación y morfogénesis. Prensa Del MIT. <https://acortar.link/QHlepp>
- Mayr, E. (2001). What Evolution Is. Basic Books. [https://www.edge.org/conversation/ernst\\_mayr-what-evolution-is](https://www.edge.org/conversation/ernst_mayr-what-evolution-is)
- Mazzarello, P. (1999). Un concepto unificador: la historia de la célula. *Teoría. Nat. Biol Celular*, 1 E13-5. <https://acortar.link/Z1e8Zk>



- McCollom, T. (2013). Miller-Urey and Beyond: What Have We Learned About Prebiotic Organic Synthesis Reactions in the Past 60 Years? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41(1), 207–229. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040610-133457>
- Natalino, M., & Fumasoni, M. (2023). Experimental approaches to study evolutionary cell biology using yeasts. *Yeast*, 40(3–4), 123–133. <https://doi.org/10.1002/yea.3848>
- Newman, J., Ghaemmaghami, S., Ihmels, J., Breslow, D., Noble, M., DeRisi, J., y Weissman, J. S. (2006). Single-cell proteomic analysis of *S. cerevisiae* reveals the architecture of biological noise. *Nature*, 441(7095), 840–846. <https://doi.org/10.1038/nature04785>
- Panicker, N., Ge, P., Dawson, V., & Dawson, T. (2021). The cell biology of Parkinson's disease. *The Journal of Cell Biology*, 220(4). <https://doi.org/10.1083/jcb.202012095>
- Perera, R. (2021). Zooming in on the cell biology of disease. *Molecular Biology of the Cell*, 32(22), ae4. <https://doi.org/10.1091/mbc.E21-09-0459>
- Potapenko, E., Kashko, N., & Knorre, D. (2023). Spontaneous Mutations in *Saccharomyces cerevisiae* mtDNA Increase Cell-to-Cell Variation in mtDNA Amount. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(24). <https://doi.org/10.3390/ijms242417413>
- Sagan, L. (1967). Sobre el origen de las células mitosantes. *J. Theor. Biol.*, 14, 255–274. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022519367900793>
- Sang, L., Dong, R., Liu, R., Hao, Q., Bai, W., & Sun, J. (2022). *Caenorhabditis elegans* NHR-14/HNF4 $\alpha$  regulates DNA damage-induced apoptosis through cooperating with cep-1/p53. *Cell Commun Signal* 20, 135. <https://doi.org/10.1186/s12964-022-00920-5>
- Stent, G. (1968). Esa era la biología molecular que era. *Ciencias*, 160, 390–395. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.160.3826.390>
- Szathmáry, E., & Smith, J. (1995). The major evolutionary transitions. *Nature*, 374(6519), 227–232. <https://doi.org/10.1038/374227a0>
- Takou, M., Wieters, B., Kopriva, S., Coupland, G., Linstädter, A., & De Meaux, J. (2019). Linking genes with ecological strategies in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Experimental Botany*, 70(4), 1141–1151. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30561727/>
- Taniguchi, Y., Choi, P., Li, G.-W., Chen, H., Babu, M., Hearn, J., Emili, A., & Xie, X. (2010). Quantifying *E. coli* Proteome and Transcriptome with Single-Molecule Sensitivity in Single Cells. *Science*, 329(5991), 533–538. <https://doi.org/10.1126/science.1188308>

- Thattai, M., & Oudenaarden, A. (2001). Intrinsic noise in gene regulatory networks. *PNAS*, 98(15), 8614–8619. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.151588598>
- Wang, T., & Dunlop, M. (2019). Controlling and exploiting cell-to-cell variation in metabolic engineering. *Current Opinion in Biotechnology*, 57, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.08.013>
- Weiss, M., Sousa, F., Mrnjavac, N., Neukirchen, S., Roettger, M., Nelson-Sathi, S., & Martin, W. (2016). La fisiología y el hábitat del último ancestro común universal. *Microbiología de La Naturaleza*, 1(9), 1–8. <https://www.nature.com/articles/nmicrobiol2016116>
- Woese, C., Kandler, O., & Wheelis, M. (1990). Hacia un sistema natural de organismos: propuesta para los dominios Archaea, Bacteria y Eucarya. *Proc. Nacional. Acad. Ciencia. EE.UU.* <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.87.12.4576>
- Zhou, B.-Q., Zhou, Y.-F., Apata, C., Jiang, L., & Pei, Q.-M. (2021). Effects of bidirectional phenotype switching on signal noise in a bacterial community. *Physical Review. E*, 104(5–1), 054116. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.104.054116>
- Zillig, W. (1991). Bioquímica comparada de arqueas y bacterias. *Actual. Opinión. Geneta. Desarrollo.*, 1, 544–55. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959437X05802060>
- Zuckerandl, E., & Pauling, L. (1965). Moléculas como documentos de la historia evolutiva. *J. Theor. Biol.*, 8, 357–366. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022519365900834>

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).