

La teoría evolutiva en la educación médica: desde Darwin hasta la tecnología educativa

Cristina Fernández-Aragón (autora de contacto)

Profesora contratada doctora en la Universidad a Distancia de Madrid, UDIMA (España)
mariacristina.fernandez.a@udima.es | <https://orcid.org/0000-0001-6016-1226>

Cristina Fernández-Arias

Profesora contratada doctora en la Universidad Complutense de Madrid (España)
crifer25@ucm.es | <https://orcid.org/0000-0002-3883-8795>

Este trabajo ha obtenido un **Accésit del Premio Estudios Financieros 2024** en la modalidad de **Educación y Nuevas Tecnologías**. El jurado ha estado compuesto por: D. Juan Ángel Collado Martínez, D. Federico Morán Abad, D. José María de Moya Anegón, D. José Manuel Pérez Martín, D.^a Laura Rayón Rumayor y D. Javier Manuel Valle López. Los trabajos se presentan con seudónimo y la selección se efectúa garantizando el anonimato de los autores.

Extracto

La teoría de la evolución es un principio fundamental en las ciencias de la vida. Sin embargo, más de un siglo y medio después de la publicación de *El origen de las especies* de Charles Darwin, la medicina aún no ha integrado estos principios evolutivos en su práctica diaria o en la formación médica. Este trabajo propone una experiencia educativa que pretende promover la alfabetización evolutiva entre el estudiantado de Medicina, al mismo tiempo que impulsa habilidades esenciales del siglo XXI, como son las competencias científica, global y digital. La propuesta se asienta sobre un profundo análisis de las concepciones alternativas del alumnado y está enriquecida con los elementos innovadores que nos ofrecen las tecnologías educativas. Todo ello se enmarca en el estudio de problemas relevantes en el ámbito médico –como son la resistencia a los antibióticos, el surgimiento de enfermedades zoonóticas o la evolución de las poblaciones humanas frente a los patógenos– desde un enfoque globalizador como el de «Una Sola Salud» (*One Health*). El diagnóstico inicial revela carencias en el conocimiento y en la aceptación de ciertos aspectos de la teoría evolutiva. Tras llevar a cabo la propuesta educativa, se observa una mejora en estos conocimientos y un aumento en el interés y en la motivación por los temas abordados. Esto pone de manifiesto el potencial de las metodologías activas y de la tecnología educativa como impulsoras del aprendizaje, un aspecto que merece más atención dentro de los escenarios de educación superior.

Palabras clave: competencia científica; aprendizaje basado en retos; competencia global; enfoque «Una Sola Salud»; *escape room* educativo; gamificación; medicina evolutiva; metodologías activas.

Recibido: 03-05-2024 | Aceptado: 15-09-2024 | Publicado: 10-01-2025

Cómo citar: Fernández-Aragón, C. y Fernández-Arias, C. (2025). La teoría evolutiva en la educación médica: desde Darwin hasta la tecnología educativa. *Tecnología, Ciencia y Educación*, 30, 67-90. <https://doi.org/10.51302/tce.2025.22213>

The evolutionary theory in medical education: from Darwin to educational technology

Cristina Fernández-Aragón (corresponding author)

Associate professor PhD at the Universidad a Distancia de Madrid, UDIMA (Spain)
mariacristina.fernandez.a@udima.es | <https://orcid.org/0000-0001-6016-1226>

Cristina Fernández-Arias

Associate professor PhD at the Universidad Complutense de Madrid (Spain)
crifer25@ucm.es | <https://orcid.org/0000-0002-3883-8795>

This paper has won a **Runner up Prize in the Financial Studies 2024 Award** in the category of **Education and New Technologies**. The jury members were: Mr. Juan Ángel Collado Martínez, Mr. Federico Morán Abad, Mr. José María de Moya Anegón, Mr. José Manuel Pérez Martín, Mrs. Laura Rayón Rumayor and Mr. Javier Manuel Valle López. The entries are submitted under a pseudonym and the selection process guarantees the anonymity of the authors.

Abstract

The theory of evolution is a fundamental principle in the life sciences. However, more than a century and a half after the publication of Charles Darwin's *On the Origin of Species*, medicine has yet to integrate these evolutionary principles into daily practice or medical training. This work proposes an educational experience aimed at promoting evolutionary literacy among Medical students while fostering essential 21st century skills, such as scientific, global, and digital competencies. The proposal is based on a thorough analysis of students' alternative conceptions and is enriched with innovative elements offered by educational technologies. It addresses relevant medical issues –such as antibiotic resistance, the emergence of zoonotic diseases, and the evolution of human populations in response to pathogens– from a global perspective like that of «One Health». The initial diagnosis reveals gaps in knowledge and acceptance of certain aspects of evolutionary theory. After implementing the educational proposal, an improvement in this knowledge and an increase in interest and motivation regarding the addressed topics were observed. This highlights the potential of active methodologies and educational technology as drivers of learning, an aspect that deserves more attention within higher education scenarios.

Keywords: scientific competence; challenge-based learning; global competence; «One Health» approach; gamification; educational escape room; evolutionary medicine; active learning methodologies

Received: 03-05-2024 | Accepted: 15-09-2024 | Published: 10-01-2025

Citation: Fernández-Aragón, C. and Fernández-Arias, C. (2025). The evolutionary theory in medical education: from Darwin to educational technology. *Tecnología, Ciencia y Educación*, 30, 67-90. <https://doi.org/10.51302/tce.2025.22213>



Sumario

1. Introducción
 2. Objetivos
 3. Método
 - 3.1. Diseño del estudio y toma de datos
 - 3.2. Fundamentación didáctica de la intervención educativa y diseño de la actividad gamificada
 - 3.3. Diseño de la actividad gamificada
 - 3.4. Análisis de datos
 4. Resultados
 5. Discusión
 6. Conclusiones
- Referencias bibliográficas

Nota: este trabajo se ha realizado en el marco de un proyecto de innovación financiado en la IV Convocatoria de Ayudas a Proyectos de Innovación Educativa de la UDIMA (ID-UDIMA-2023-02). Las autoras del artículo declaran que todos los procedimientos llevados a cabo para la elaboración de este trabajo de investigación se han realizado de conformidad con las leyes y directrices institucionales pertinentes. Asimismo, las autoras del artículo han obtenido el consentimiento informado (libre y voluntario) por parte de todas las personas intervinientes en este estudio de investigación.

1. Introducción

La teoría de la evolución representa uno de los hitos más relevantes en la historia de la ciencia. El germen de esta teoría, la obra de Darwin *El origen de las especies* (1859), supuso una revolución en el pensamiento científico, filosófico y cultural que continúa teniendo un profundo impacto en nuestra comprensión del mundo natural y en la forma en la que el ser humano se contempla dentro de él.

Las ideas de Darwin sobre la evolución mediante el mecanismo de selección natural se ampliaron y consolidaron durante la primera mitad del siglo XX con las aportaciones de la genética, la biología molecular o la embriología comparada y cristalizaron en lo que se conoce como la síntesis evolutiva moderna (SEM). La SEM proporciona un marco teórico integrado para los mecanismos y los patrones de la evolución biológica y se considera el gran principio unificador de la biología moderna: nos permite comprender cómo se ha originado la enorme diversidad de formas de vida en la Tierra y cuáles son las relaciones de parentesco entre los organismos, sus adaptaciones o sus patrones de distribución geográfica.

Si bien la SEM goza de un amplio respaldo y reconocimiento en la comunidad científica, esta teoría continúa siendo poco comprendida por la ciudadanía (Miller *et al.*, 2006). Incluso las personas con formación en ciencias de la vida, como el profesorado de Biología en enseñanzas medias (Friedrichsen *et al.* 2018; Mardones Cofré *et al.*, 2017) o el alumnado universitario de ramas afines a la Biología y la Medicina (Gefaeil *et al.*, 2020; Yousuf *et al.*, 2011) llegan a mostrar dificultades de comprensión y aceptación de esta teoría. Esto es especialmente alarmante si consideramos que los procesos evolutivos moldean todos los aspectos del mundo natural (Mindell, 2007) y que muchos de los complejos desafíos globales que afronta la humanidad en la actualidad, como la salud humana (por ejemplo, enfermedades zoonóticas emergentes, resistencia a los antibióticos, etc.), la seguridad alimentaria y la pérdida de biodiversidad tienen raíces en estos procesos evolutivos.

Entre los factores responsables de esta pobre comprensión de los conceptos y procesos evolutivos destaca la naturaleza compleja y multidimensional de estos contenidos que generalmente entran en conflicto con las ideas intuitivas y sesgos cognitivos, altamente resistentes al cambio, que se configuran temprano en el desarrollo de las personas (Gregory, 2009; Kampourakis 2014).

Para reconstruir estas ideas intuitivas, la didáctica de las ciencias nos indica la necesidad de transitar de un modelo de enseñanza meramente transmisivo hacia un modelo de enseñanza basado en la indagación (Glaze y Goldston, 2015; Harms y Reiss, 2019) que asegure la participación activa del alumnado en la reflexión, el análisis y la generación de nuevas ideas. Este modelo debería incluir actividades basadas en la indagación, la experiencia y la argumentación (Domènech Girbau y Lope Pastor, 2009), incluir contextos de la vida cotidiana del alumnado (Heddy y Sinatra, 2013; Mardones Cofré *et al.*, 2017) y desplegar metodologías y estrategias didácticas motivadoras, como la gamificación o el aprendizaje cooperativo (Herrada Valverde y Baños Navarro, 2018; Pérez Vázquez *et al.*, 2019). Además, en un mundo cada vez más digitalizado, es crucial fomentar el uso de tecnologías educativas por su efecto positivo en la motivación hacia los contenidos que se van a aprender (Khoshnoodifar *et al.* 2023), así como por la preparación del alumnado para el entorno laboral y social del siglo XXI.

En el ámbito específico de la educación médica, existe un amplio consenso entre la comunidad de expertos sobre la importancia de incorporar una perspectiva evolutiva en el estudio de la etiología, la prevención y el tratamiento de las enfermedades humanas (Graves *et al.*, 2016; Nesse *et al.* 2010). Sin embargo, la formación en biología evolutiva de los profesionales de la salud continúa siendo deficiente (Grunspan *et al.*, 2019; Nesse *et al.*, 2010; Yousuf *et al.*, 2011) y ha estado tradicionalmente ausente de los planes de estudio de Medicina (Gomollón, 2011; Grunspan *et al.*, 2019).

La medicina evolutiva, es decir, la aplicación de conocimientos de evolución y ecología a la medicina, tiene un enorme potencial aún por explotar para generar innovación en la investigación biomédica y aplicaciones orientadas a la salud pública (Benton *et al.*, 2021; Natterson-Horowitz *et al.*, 2023). Por ejemplo, el manejo efectivo de pandemias como la del COVID-19 o de futuras zoonosis emergentes requiere la aplicación de la teoría evolutiva para comprender y modelizar la dinámica de las infecciones. Además, los principios evolutivos también pueden utilizarse para entender y abordar aspectos del comportamiento humano que se interponen en la correcta aplicación de las medidas de salud pública (por ejemplo, uso incorrecto de los antibióticos, reticencia a vacunarse, etc.) (Natterson-Horowitz *et al.*, 2023). Todo ello indica que los profesionales de la salud cada vez emplearán más aplicaciones de la biología evolutiva en su trabajo práctico (Benton *et al.*, 2021), por lo que es crucial formar al alumnado de Medicina en los conceptos y procesos evolutivos (Graves *et al.*, 2016).

Tal y como se mencionó anteriormente, el actual panorama mundial presenta una serie de desafíos en materia de salud que con frecuencia tienen su origen en procesos evolutivos y que, además, están estrechamente interconectados. El alarmante aumento de patógenos resistentes a los medicamentos

El actual panorama mundial presenta una serie de desafíos en materia de salud que con frecuencia tienen su origen en procesos evolutivos y que, además, están estrechamente interconectados

–conocido como la «pandemia silenciosa», con una estimación de 4,95 millones de muertes solo en 2019 (Murray *et al.*, 2022)–, el incremento de las tasas de obesidad e inactividad física y los efectos adversos para la salud derivados de la contaminación ambiental o el cambio climático no pueden abordarse de manera aislada, y la búsqueda de soluciones a estos problemas se podría beneficiar de la aplicación de una perspectiva evolutiva. La farmacoresistencia, por ejemplo, es una problemática que ilustra de forma sencilla esta naturaleza evolutiva e interconectada: el uso excesivo de fármacos antimicrobianos tanto en humanos como en animales y en el medioambiente a través de la industria agroalimentaria contribuye a la creciente resistencia de los patógenos por selección natural, comprometiendo severamente la eficacia de los tratamientos médicos (OMS, 2021). En resumen, la complejidad e interconexión de los problemas de salud global demandan un enfoque integrado –también conocido como enfoque *One Health* (Una Sola Salud)– que reconozca la relación entre la salud humana, la salud del resto de organismos vivos y la salud medioambiental.

Este enfoque nos permite, además, promover la «competencia global» del alumnado universitario, entendida como un objetivo de aprendizaje multidimensional y permanente que posibilita la capacidad de análisis de los asuntos globales e interculturales, así como la habilidad para valorar distintas perspectivas y para emprender acciones por el bien común y por el desarrollo sostenible (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE], 2018). Con este enfoque se busca promover la comprensión de los fenómenos globales y la capacidad de respuesta ante los desafíos actuales, habilidades clave para los individuos y las sociedades en un mundo globalizado y cambiante.

2. Objetivos

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el objetivo principal de este estudio es contribuir a la mejora de la educación en biología evolutiva dirigida a estudiantes de Medicina, siguiendo un enfoque de enseñanza competencial basado en las recomendaciones de la didáctica de la ciencia evolutiva y en los principios del enfoque *One Health*, y a través de la tecnología educativa. Los objetivos específicos del estudio fueron:

- Evaluar los conocimientos y la aceptación de la teoría de la evolución en una muestra de estudiantes de Medicina.
- Diseñar un módulo de enseñanza sobre biología evolutiva diseñado *ad hoc* para estudiantes de Medicina, basado en las metodologías activas de aprendizaje y en la tecnología educativa.
- Contribuir a la mejora en el conocimiento, la aceptación y la percepción de la relevancia de la SEM («competencia científica» y «competencia evolutiva») en el alumnado diana.
- Fomentar la motivación y el interés por el enfoque *One Health* y la comprensión de los fenómenos globales («competencia global») en el alumnado diana.

3. Método

3.1. Diseño del estudio y toma de datos

Se ha diseñado un estudio de tipo pre-, pos- y cuasiexperimental en el que se han analizado datos antes (pre) y después (pos) de la implementación de una intervención educativa desde un enfoque mixto cuantitativo y cualitativo. El estudio se dividió en cinco fases que se han llevado a cabo durante el curso 2023-2024 y que se describen a continuación.



Fase 1. Diseño y elaboración de un módulo de enseñanza sobre biología evolutiva orientado a estudiantes de Medicina

El módulo de enseñanza sobre biología evolutiva se concretó, principalmente, en dos herramientas:

- Cuestionario sobre aceptación y conocimiento de la evolución (EEQ [Beniermann *et al.*, 2021]).
- Actividad gamificada.

El cuestionario permite evaluar el grado de conocimiento y el grado de aceptación de la SEM entre el alumnado y, al mismo tiempo, sirve para movilizar sus ideas previas. La actividad gamificada se concibió como un *escape room* digital educativo (Pérez Vázquez *et al.*, 2019), articulado en torno a la resolución de retos (o problemas) relacionados con la medicina evolutiva. Para el diseño de esta actividad, inicialmente se tuvieron en cuenta todos los elementos que se recomiendan para conseguir una adecuada educación evolutiva (Kampourakis, 2022): noción de tiempo geológico, concepto de «ancestría común», ejemplos cercanos al alumnado para ilustrar el mecanismo de selección natural, enfatizando que esta actúa en las poblaciones y no en los individuos, evidencias de la evolución y nociones sobre filosofía de la ciencia. La fundamentación didáctica en la que se basa esta intervención educativa, así como los detalles de la actividad gamificada, se especifican en el apartado 3.2 (Fundamentación didáctica de la intervención educativa y diseño de la actividad gamificada).

Fase 2. Análisis diagnóstico de las ideas previas del grupo diana

El grupo diana estaba constituido por un conjunto de estudiantes matriculados en la asignatura de Inmunología del primer año del grado de Medicina. La intervención se desarrolló dentro de una actividad práctica conocida como «Seminarios», diseñada para fomentar tanto el aprendizaje individual como el trabajo en equipo del alumnado. Durante estos seminarios, los estudiantes, en equipos de tres o cuatro miembros, deben identificar noticias actuales relacionadas con el sistema inmunológico. Tras una sesión de debate y de intercambio de ideas, cada grupo elige un tema sobre el cual profundizarán, investigando la base inmunológica de la noticia seleccionada a través de búsqueda bibliográfica y lectura de artículos científicos. Este entorno proporciona el escenario ideal para llevar a cabo esta intervención, ya que los estudiantes se encuentran en pleno proceso de adquisición de conocimientos sobre el funcionamiento del sistema inmunológico. Entender los conceptos evolutivos es fundamental para comprender el papel del sistema inmunológico en la regulación de la homeostasis y la defensa contra infecciones.

Para la evaluación del grado de conocimiento y aceptación de la SEM en el alumnado y su relación con posibles variables sociodemográficas (tipo de estudios previos, edad, género, etc.) se utilizó el [cuestionario disponible y validado](#) (EEQ [Beniermann *et al.*, 2021]) mencionado anteriormente, fruto de un trabajo colaborativo a nivel europeo cuyo objetivo fue proponer una herramienta que recopilara y estandarizara los diferentes métodos para medir la competencia evolutiva. El cuestionario EEQ contiene diferentes instrumentos –conocimiento de la evolución (KAEVO 2.0 [Kuschmierz *et al.*, 2020]), aceptación de la evolución (ATEVO [Beniermann, 2019]), pensamiento dualista (SD [Beniermann, 2019]) y grado de religiosidad (escala PERF [Beniermann, 2019])– y sus autores proponen unos umbrales para categorizar los niveles de cada uno de ellos. En este estudio se utilizaron todos los instrumentos excepto el del pensamiento dualista. El cuestionario fue administrado en tres grupos de 20 alumnos cada uno durante una de las primeras sesiones de seminarios de la asignatura (celebrada durante el segundo cuatrimestre).



Fase 3. Rediseño y personalización de un módulo de enseñanza sobre biología evolutiva

Tras un análisis preliminar de los resultados obtenidos en los cuestionarios administrados en la fase 2, se hicieron algunas modificaciones en la actividad gamificada para hacer un mejor ajuste entre los retos a resolver y los conocimientos previos del alumnado. Por ejemplo, se dio menor énfasis a la resolución de un problema sobre las mutaciones en favor de un problema sobre filogenias al comprobar que los conocimientos de los estudiantes sobre esos aspectos eran mejores y peores de lo esperado, respectivamente. La actividad gamificada está completamente descrita en el apartado 3.3.

Fase 4. Implementación del módulo de enseñanza sobre biología evolutiva

En la última sesión de seminarios, se invitó al alumnado de uno de los grupos ($n = 20$) a participar en la actividad gamificada. La puesta en acción tuvo una duración aproximada de 1 hora.

Fase 5. Evaluación

Tras la finalización del módulo, se realizó la evaluación de la intervención a través de dos estrategias:

- **Discusión deliberativa.** Entendida como una discusión (guiada) de carácter argumentativo para la resolución de problemas prácticos y orientada a la acción colectiva. Se estableció una argumentación colectiva final en relación con las preguntas analizadas en los cuestionarios iniciales (EEQ) hasta alcanzar un consenso en las respuestas.
- **Administración de un cuestionario semiestructurado con cinco preguntas de respuesta múltiple tipo Likert y una pregunta abierta.** Las preguntas versaban sobre la autopercepción del aprendizaje y sobre el grado de motivación e interés generado tanto por los contenidos como por el enfoque metodológico utilizado.

Nota. En las fases 2 y 5 se informó al alumnado de que cumplimentar estos cuestionarios era voluntario y que tendría un carácter anónimo. Además, se ofreció al alumnado la opción de consentir o no el uso de estos datos con fines de investigación, quedando informado de que el consentimiento o no del uso de los datos no tendría ninguna repercusión (positiva o negativa) en las calificaciones de la asignatura.

3.2. Fundamentación didáctica de la intervención educativa y diseño de la actividad gamificada

Desde el punto de vista del proceso de enseñanza-aprendizaje, esta intervención desarrolla acciones alineadas con el enfoque socioconstructivista del aprendizaje –basado en la noción de que el aprendizaje es un proceso que parte de las ideas previas del alumnado y en el que los estudiantes construyen de forma activa su conocimiento en diálogo con los demás– y se apoya en estrategias que promueven la indagación, la argumentación y la metacognición, aconsejadas para la superación de los obstáculos cognitivos y epistemológicos en torno a la teoría de la evolución (González Galli *et al.*, 2020).

Por otro lado, el aprendizaje competencial requiere de metodologías de enseñanza que permitan al alumnado involucrarse activamente en su propio proceso de aprendizaje (Robledo Ramón *et al.*, 2015). El aprendizaje basado en retos (o en problemas) o el aprendizaje basado en juegos (*serious games*) son ejemplos de metodologías en las que el alumnado, además de adquirir conocimientos disciplinares, también puede desarrollar habilidades de pensamiento de orden superior, como la capacidad de pensar de manera crítica, reflexiva y creativa, y de interesarse por investigar contextos diferentes del que ofrece su entorno inmediato (De la Cruz Velasco *et al.*, 2022; Delgado-Quiñones *et al.* 2022; Gallagher y Savage, 2023).

El modelo didáctico que continúa predominando en la enseñanza universitaria es el transmisivo, a través del cual el profesorado se centra en intentar transmitir una gran cantidad de información a menudo fragmentada, olvidando la visión epistemológica global (De Alba y Porlán, 2017). Las metodologías activas que aquí se proponen se alejan de este modelo transmisivo centrado en el profesorado y fomentan la participación activa, el pensamiento crítico y la resolución de problemas por parte del alumnado.

Los recursos y técnicas que se han seleccionado –gamificación a través del *escape room* educativo, elementos motivadores a través de la realidad aumentada y las imágenes inmersivas generadas a través de la inteligencia artificial (véase apartado 3.2)– tienen una doble finalidad: potenciar la motivación del alumnado y promover la adquisición de capacidades y habilidades digitales, además de las relacionadas con la disciplina de estudio.

Por un lado, la «motivación» ha sido definida como el proceso mediante el cual se inician y mantienen actividades dirigidas hacia metas específicas y es considerada el motor del aprendizaje (Cook y Artino, 2016). En relación con ello, la gamificación –o aplicación de elementos y principios característicos de los juegos en contextos no lúdicos, como la educación– promueve la motivación, el compromiso, la participación y la autoeficacia en el proceso de aprendizaje (Khoshnoodifar *et al.* 2023). La gamificación educativa busca aprovechar la naturaleza intrínsecamente motivadora de los juegos para influir en el comportamiento del alumnado y alcanzar objetivos específicos de aprendizaje (Chen y Liang, 2022).

Por otro lado, la actividad gamificada propuesta pretende promover la adquisición de competencias a través de tres ejes: la competencia científica en sentido amplio (Cañal, 2011), la competencia evolutiva (o alfabetización evolutiva, Kampaourakis, 2022) y la competencia global (OECD, 2018). En primer lugar, el hecho de que la propuesta se articule en torno

La actividad gamificada propuesta pretende promover la adquisición de competencias a través de tres ejes: la competencia científica en sentido amplio, la competencia evolutiva y la competencia global

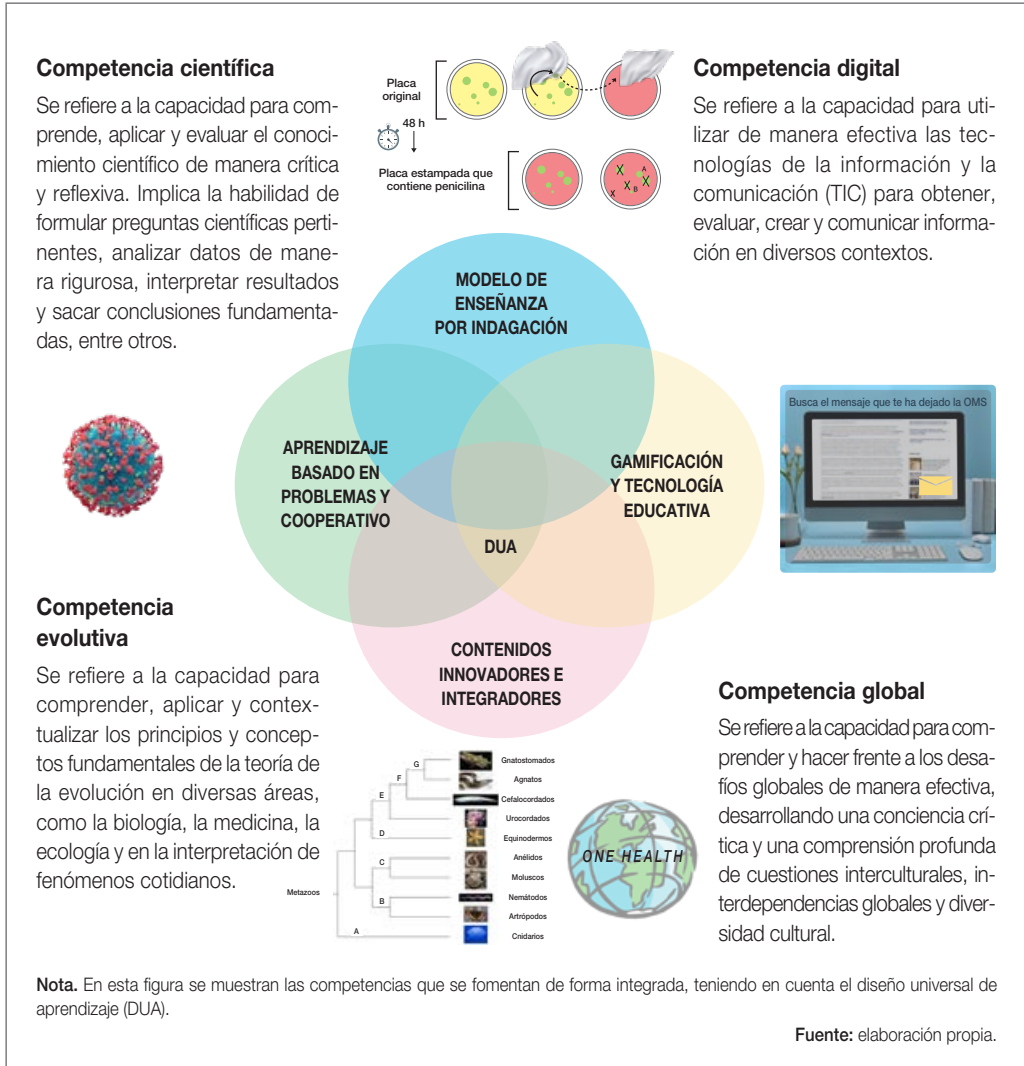
a la resolución de retos favorece el fomento de la Competencia científica, dado que para la resolución de estos retos es necesario ejercitar habilidades como la argumentación y el uso de pruebas, el pensamiento lógico y el pensamiento lateral, así como asimilar una visión actualizada de la actividad científica, entendiéndola como una forma de generación de conocimiento colaborativa y sujeta a continua evaluación por la comunidad científica (Cañal, 2011; Gallagher y Savage, 2023). Por otro lado, la competencia evolutiva se promueve a través de la inclusión en la actividad gamificada de diferentes elementos considerados esenciales para una correcta comprensión de cómo el principio organizador de la evolución por selección natural explica la diversidad de la vida en la Tierra (Kampourakis, 2022): noción de tiempo geológico; concepto de «ancestría común»; ejemplos cercanos al alumnado para ilustrar el mecanismo de selección natural, enfatizando que esta actúa en las poblaciones y no en los individuos; evidencias de la evolución; y nociones actualizadas sobre la epistemología de la ciencia. Además, se han tenido en cuenta, de forma específica, consideraciones de los expertos en medicina evolutiva sobre qué debería considerarse para una adecuada enseñanza de la evolución en el campo médico (Nesse *et al.*, 2010).

Estas recomendaciones indican la necesidad de enfatizar la filogenia y los fenómenos a nivel de especie y superiores, y de profundizar específicamente en ejemplos aplicados a la medicina en los que se ilustre cómo la selección natural ha moldeado rasgos que permiten a los individuos adaptarse a sus entornos (por ejemplo, resistencia de las bacterias a los antibióticos o resistencia de las poblaciones humanas al patógeno causante de la malaria), así como el papel de factores evolutivos distintos de la selección (por ejemplo, deriva génica).

Por último, la Competencia global, definida como «la capacidad de analizar asuntos globales e interculturales, valorar distintas perspectivas desde el respeto por los derechos humanos, para interrelacionarse con personas de diferentes culturas [y] emprender acciones por el bien común y por el desarrollo sostenible» (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte/OECD/INEE, 2018, p. 5), es un concepto que está en la vanguardia de las iniciativas educativas impulsadas para atender las demandas de la sociedad del siglo XXI. En este sentido, la propuesta fomenta en el alumnado diferentes dimensiones de la competencia global a través de los contextos relacionados con el enfoque *One Health* integrado en la actividad gamificada (efectos de la pérdida de biodiversidad o del cambio climático en la emergencia de enfermedades zoonóticas, efectos de los patrones de producción y consumo en la resistencia a antibióticos, etc.), así como mediante las propias metodologías activas utilizadas, que instan a la participación y toma de acción ante los fenómenos estudiados.

La competencia evolutiva se promueve a través de diferentes elementos que se consideran esenciales: noción de tiempo geológico, concepto de «ancestría común», ejemplos cercanos al alumnado para ilustrar el mecanismo de selección natural, evidencias de la evolución y nociones actualizadas sobre la epistemología de la ciencia

Figura 1. Resumen de los elementos innovadores implicados en el diseño de la propuesta



En síntesis, podemos decir que la innovación educativa en esta propuesta es de carácter multifactorial y comprende (véase figura 1):

- Inclusión en el currículo de contenidos de naturaleza integradora, como la SEM y el marco *One Health* (generalmente ausentes de los planes de estudios en Medicina), utilizando contextos relevantes tanto para la formación disciplinar científica y evolutiva como para la competencia global y digital del alumnado.

- Implementación de metodologías activas (por ejemplo, aprendizaje basado en retos) y estrategias didácticas enmarcadas en un modelo de enseñanza por indagación, alternativo al modelo transmisivo predominante.
- Utilización de elementos motivadores, como técnicas de gamificación y recursos tecnológicos, que dinamizan el despliegue de los contenidos de una forma rigurosamente planificada y que se implementan con menos frecuencia en contextos de educación superior. La finalidad de todo ello es captar la atención del alumnado desde el principio y que esa motivación catalice el aprendizaje significativo, autónomo y autorregulado, tan importante para la adquisición de conocimientos, en general, y de los conocimientos evolutivos en particular (González Galli *et al.*, 2020).

3.3. Diseño de la actividad gamificada

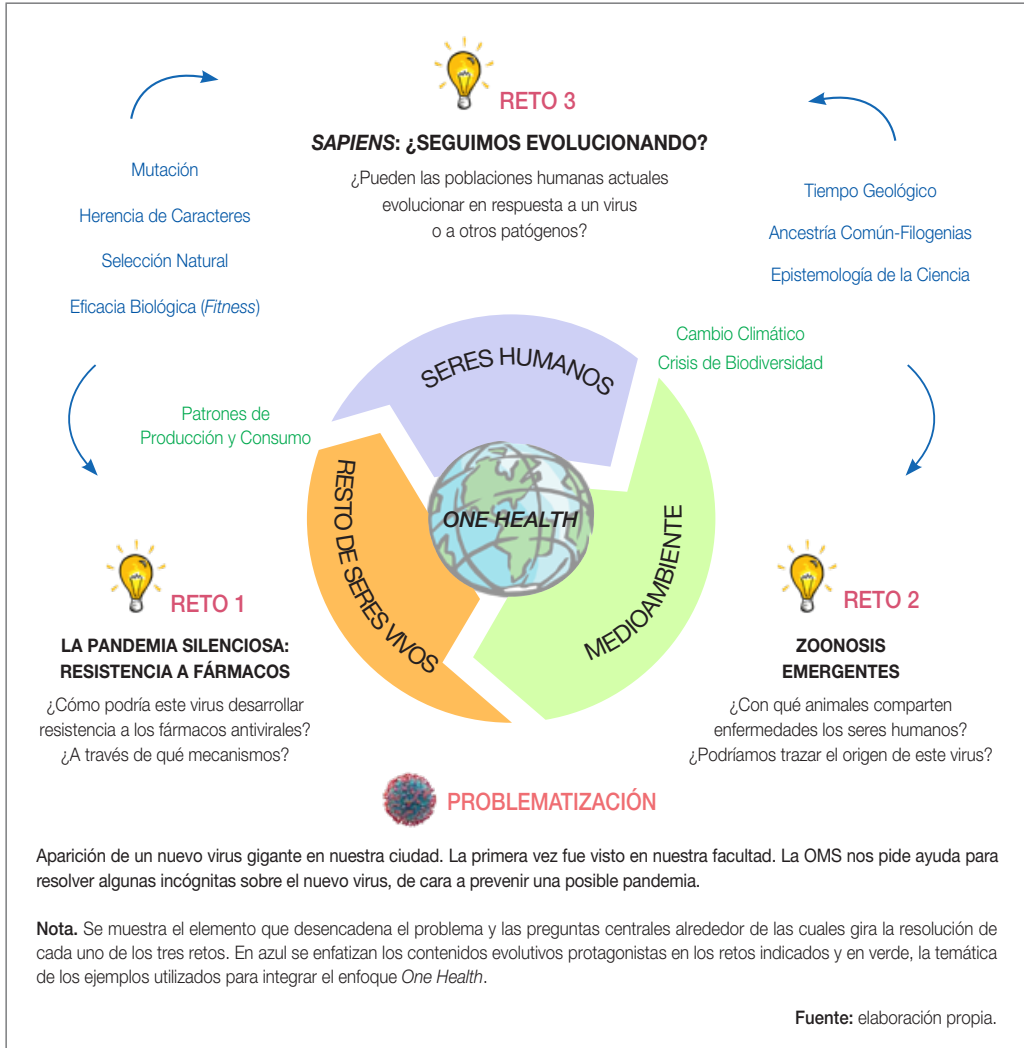
El *escape room* diseñado consta de tres retos (véase figura 2) que parten de un tema central problematizador: la aparición en nuestra ciudad de una partícula sospechosa que ha resultado ser un virus gigante y que ha llevado a la Organización Mundial de la Salud (OMS) a solicitar la ayuda del alumnado para prevenir una posible pandemia. Quienes consigan resolver todos los retos entrarán a formar parte de un grupo de expertos de excelencia de la OMS.

Para la presentación del reto se muestra al alumnado una noticia de prensa ficticia acompañada de un breve vídeo de YouTube (YouTube Shorts) que simula los vídeos capturados por la ciudadanía y que son subidos a redes sociales, en los que aparece el virus suspendido en el aire en lugares icónicos de la ciudad. Para darle calidad y credibilidad a este vídeo, se utilizaron diferentes herramientas de creación y edición de imagen. Por un lado, se utilizó una aplicación para crear experiencias de realidad aumentada (Arloopa), que permitió generar la imagen 3D de un virus y capturarla en vídeo en diferentes localizaciones reales. Además, para ofrecer un mejor acabado y generar la sensación de que el vídeo realmente había sido compartido en redes sociales, se editó la compilación de vídeos con la herramienta CapCut, una aplicación de diseño gráfico con tecnología de inteligencia artificial avanzada integrada.

Cada reto tiene una temática principal relacionada con casos de estudio de origen evolutivo de alto impacto en la salud humana y está constituido por un número variable de pruebas. Estas pruebas articulan los objetivos de aprendizaje en materia científica y evolutiva, y se han enmarcado dentro del enfoque *One Health*, a través de los ejemplos escogidos, para integrar los objetivos en materia de competencia global.

Cada reto tiene una temática principal relacionada con casos de estudio de origen evolutivo de alto impacto en la salud humana y está constituido por un número variable de pruebas que se encuentran enmarcadas dentro del enfoque *One Health*

Figura 2. Esquema del planteamiento del escape room digital



Así, en el primer reto se aborda la resistencia a fármacos utilizando experimentos con bacterias resistentes a antibióticos y se escoge un ejemplo final donde se utiliza lo aprendido para investigar la relación que tiene este fenómeno con ciertas prácticas de la industria agroganadera. Todo ello entronca con el segundo reto, en el que se explora el papel del sistema inmune adaptativo en las enfermedades zoonóticas (aquellas que se transmiten a los seres humanos desde otros animales vertebrados) y se investiga el origen del virus de la inmunodeficiencia humana (VIH). Finalmente, se analizan las consecuencias de fenómenos globales –como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad– en la aparición de nuevas

zoonosis. En el último reto se estudia la evolución de las poblaciones humanas actuales en respuesta a patógenos, utilizando el ejemplo de la malaria. Cada uno de los retos está ambientado en unas instalaciones de referencia mundial –Centro Nacional de Microbiología (España), Laboratorio Nacional de Referencia de VIH (Botswana) y Laboratorio de Antropología Forense de la Universidad de Granada (España)– por su relación con cada temática. Para ambientar los escenarios se han utilizado tanto imágenes reales retocadas como imágenes generadas a través de inteligencia artificial (CapCut e IA Magic Design de Canva).

La resolución de estas pruebas exige utilizar tanto el pensamiento hipotético-deductivo y el pensamiento lateral como las habilidades cognitivo-lingüísticas implicadas en la argumentación para relacionar las evidencias e información proporcionada con las respuestas a las preguntas planteadas. Las pruebas incluyen la información en una variedad de formatos –escrito, visual (imágenes, gráficos), audio y vídeo– teniendo en cuenta las recomendaciones del DUA (Rubio Pulido, 2017). Una de las pruebas incluyó información sobre una científica microbióloga cuyos descubrimientos, realizados a mediados del siglo pasado, siempre quedaron injustamente atribuidos a su marido. Este tipo de información nos permite visibilizar las cuestiones de género que atraviesan todos los ámbitos de la sociedad, incluido el ámbito científico. Para la edición de los vídeos se utilizó el *software* iMovie. Todos los elementos del *escape room* fueron organizados, editados y presentados al alumnado a través de la aplicación Genially.

3.4. Análisis de datos

Los datos recopilados en los cuestionarios, tanto el EEQ como el cuestionario de auto-percepción, se analizaron en primer lugar desde una óptica descriptiva (frecuencia de las respuestas, moda, media, etc.). Adicionalmente, se realizaron pruebas de contraste de hipótesis para comprobar la relación entre las variables estudiadas en el cuestionario EEQ (por ejemplo, diferencias en el grado de aceptación de la teoría según la edad, el género o los estudios previos; la relación entre los índices de conocimiento y de aceptación de la SEM; etc.). Se construyeron modelos lineales generalizados (GLM), una herramienta estadística sólida para el análisis de datos no paramétricos (que no cumplen con los requisitos de normalidad y homocedasticidad) y que permite el análisis conjunto de variables continuas y discretas. Los GLM se construyeron utilizando la función «glm () de R» (R Core Team, 2022). Como variables respuesta se utilizaron:

- a) Puntuación del instrumento de conocimiento de la evolución (KAEVO Score).
- b) Puntuación del instrumento de aceptación de la evolución (ATEVO Score).

En ambos modelos se incluyeron como variables explicativas, inicialmente, el género, la edad, el año de finalización de la educación secundaria y el grado de religiosidad (PERF Score). Adicionalmente, en el caso b) se incluyó como variable explicativa en el modelo el grado de comprensión de la evolución (KAEVO Score). Un análisis preliminar, que incluyó

el «grupo» como variable explicativa, reveló que no existían diferencias significativas entre grupos, por lo que esta variable no fue incluida en los GLM finales, siguiendo un principio de máxima parsimonia en la construcción de modelos. En los modelos definitivos también se excluyó la variable año de finalización de la educación secundaria, por encontrarse altamente correlacionada con la variable edad. El análisis cualitativo se basó en una selección de transcripciones escritas de las conversaciones generadas entre los estudiantes durante el trabajo cooperativo dentro de los grupos, así como en un debate final en el que apreciar la revisión de los modelos mentales iniciales. Se prestó especial atención al análisis de las destrezas argumentativas que afectan a la construcción, revisión y evaluación de los modelos mentales.

4. Resultados

Para la evaluación del conocimiento y aceptación de la evolución, se contó finalmente con una muestra de 39 informantes, 24 de los cuales se identificaron con el género femenino y 15 con el masculino. El perfil del alumnado coincide mayoritariamente con personas egresadas recientemente de la educación secundaria, entre los años 2021 y 2023 (moda = 2023), con la excepción de un par de casos de personas graduadas con anterioridad (años 2004 y 2016). El rango de edad de los participantes oscila entre 17 y 29 años, siendo la moda estadística de 19 años. El 100 % de participantes indica en el cuestionario que ha cursado algún itinerario relacionado con las ciencias de la salud durante el bachillerato y reconoce haber recibido formación en evolución durante su escolarización. La autopercepción del alumnado sobre conocimiento de la evolución es alta, con un 72 % y un 15 % de estudiantes que indica que «sí sabe» o «sabe en parte» qué es la evolución, respectivamente, frente a un 13 % que lo «sabe más o menos» y un 0 % que «no sabe» lo que es la evolución biológica.

La puntuación en el instrumento de conocimiento de la evolución (KAEVO Score) se interpreta a través de cinco categorías (Kuschmierz *et al.*, 2020) —«muy bajo», «bajo», «moderado», «más bien alto» y «muy alto»— y los resultados obtenidos indican que el alumnado encuestado tiene un nivel moderado (media = 15,28; desviación estándar = 4,44) de conocimiento de esta teoría. De forma similar, la puntuación en el instrumento de aceptación de la evolución (ATEVO Score) se interpreta a través de cinco categorías (Beniermann, 2019) —«rechazo», «más bien rechazo», «posición indiferente», «más bien aceptación» y «aceptación»— e indic que el alumnado encuestado en promedio se localiza en el umbral inferior de la categoría «más bien aceptación» (puntuación entre 29 y 34), muy cerca de la categoría «posición indiferente» (puntuaciones entre 20 y 28). Merece la pena destacar que los datos de aceptación presentan una elevada dispersión en torno a la media (media = 28,81; desviación estándar = 13,33) y que el puntaje más frecuente en la muestra (moda = 34) inclinaría el resultado hacia la categoría de «más bien aceptación». Sin embargo, es importante destacar que un 23,10 % de los datos se encuentran dentro de las categorías que indican un «bajo» conocimiento y un 10,30 %, dentro de las categorías de «rechazo» o «más bien rechazo» a la teoría evolutiva.

Los resultados de los GLM (véase cuadro 1) indican que la edad y el género no ejercen una influencia significativa en los resultados obtenidos, tanto para el conocimiento como

para la aceptación de la evolución. Sin embargo, un mayor grado de religiosidad sí tiene un efecto negativo y significativo tanto en el nivel de conocimiento como de aceptación de la evolución. Además, parece que un mejor conocimiento de la teoría mejora significativamente la aceptación de la misma.

En relación con el grupo en el que se llevó a cabo la intervención educativa ($n = 20$), el análisis de los diálogos establecidos en los agrupamientos pequeños reveló que las pruebas propuestas en cada reto permitían ejercitar diferentes habilidades vinculadas con el pensamiento científico y suscitaban reflexión y discusión en torno a los razonamientos de corte teleológico, en particular en torno a la aleatoriedad de las mutaciones, pero a la no aleatoriedad del proceso de selección natural (por ejemplo, «Pero, si escogemos la segunda opción, dices que las [bacterias] supervivientes ya eran mutantes, ¿no?») o sobre la concepción errónea de herencia de los caracteres adquiridos (por ejemplo, «¡No, no, espera, no pinches en esa [opción de respuesta]! Esa es que la tinción se hereda, pero en el "ojo" [pista] dice que no afecta al ADN, entonces no se hereda»).

Cuadro 1. Resultados de los GLM construidos para las variables respuesta (dependientes) «KAEVO Score» y «ATEVO Score»

	Variables independientes							
	Edad		Género		PERF Score (religiosidad)		KAEVO Score (conocimiento)	
	t-value	p	t-value	p	t-value	p	t-value	p
KAEVO Score (conocimiento)	-0,010	0,992	0,335	0,725	-2,269	0,029	-	-
ATEVO Score (aceptación)	0,012	0,990	1,306	0,200	-2,161	0,038	7,267	0,000

Nota. Se indican las estimas del estadístico t (t-value) y su valor p asociado para cada una de las variables explicativas (independientes) utilizadas en cada modelo. Se marcan en negra los efectos significativos (umbral de significación $p < 0,05$).

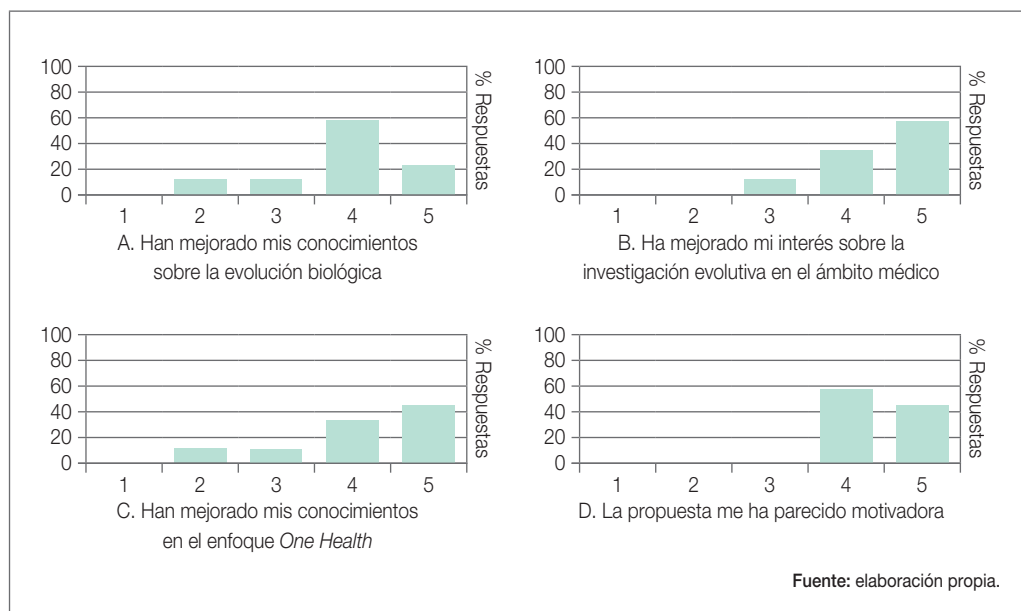
Fuente: elaboración propia.

La necesidad de colaboración intragrupos y el factor de competitividad entregrupos generó un buen clima de diversión en el aula que se tradujo en expresiones de satisfacción y celebración al hallar las respuestas correctas, e, incluso, risas cuando se llegaba a los mensajes de notificación de respuestas erróneas. La dinámica final en gran grupo, con la que se pretendía alcanzar consensos sobre las preguntas del cuestionario EEQ, sucedió de forma muy fluida, ya que esos consensos se habían alcanzado previamente durante la resolución de las pruebas dentro de los agrupamientos pequeños. La mejora más notable entre los conocimientos expuestos pre- y posintervención (consensos que se alcanzaron de forma más rápida por la unanimidad de las intervenciones) fueron aquellos relacionados con la herencia

de caracteres adquiridos y la interpretación de filogenias y relaciones de parentesco. Los resultados del cuestionario de autopercepción del aprendizaje del alumnado se muestran en las gráficas de la figura 3. La mejora de los conocimientos en evolución y en el concepto *One Health* es moderadamente alta, con un 78 % de las respuestas englobadas en las categorías alta (4) y muy alta (5), en ambos casos. Además, se encuentra una mejora importante en el interés hacia los temas de investigación en medicina evolutiva, con un 89 % de respuestas distribuidas en las categorías más altas. La propuesta en general resultó motivadora al alumnado, con un 100 % de respuestas incluidas en las dos categorías más altas.

La última pregunta del cuestionario de evaluación (pregunta E) consistía en una pregunta abierta en la que dejar un comentario de retroalimentación relacionado con la propuesta. Solo se recogieron dos comentarios a través del cuestionario en los que se comentaba que «podría mejorarse la visibilidad de algunas pistas en pantalla» y que les «habría gustado que la actividad durase más tiempo».

Figura 3. Distribución de frecuencias (%) en las respuestas a las preguntas (A-D) del cuestionario de autopercepción del aprendizaje, la motivación y el interés por los temas abordados



5. Discusión

Los datos de este estudio muestran que los estudiantes encuestados, en su mayoría de primer año de carrera, tienen conocimientos moderados, pero una considerable aceptación de la teoría de la evolución. Estos datos están en consonancia con otros estudios a

mayor escala realizados en el contexto español (Gefaell *et al.*, 2020) y europeo (Kuschmierz *et al.*, 2021), este último utilizando el mismo instrumento de medición multidimensional de la competencia evolutiva empleado en la presente investigación. En promedio, los alumnos de la muestra aquí estudiada tienen un grado de aceptación de la teoría evolutiva algo menor que la media europea de estudiantes de primer año de carrera en ramas afines a las ciencias de la vida ($\text{media}_{\text{española}} = 28,81$ frente a $\text{media}_{\text{europea}} = 32,52$). No obstante, existe una buena fracción de la muestra que presenta un conocimiento bajo y una aceptación más bien baja. Esto puede ser algo sorprendente si consideramos que este perfil de estudiante se encuentra especialmente preparado en cuestiones relacionadas con la biología, según su itinerario en el bachillerato y, en general, tiene que alcanzar calificaciones muy altas en las pruebas de acceso a este grado universitario. Además, detectar este tipo de carencias en los conocimientos evolutivos tiene unas importantes implicaciones al tratarse de futuros profesionales de la salud, quienes tendrán que lidiar con situaciones complejas que a menudo requieren tener un dominio de este tipo de conocimientos. Ello indica que hay que continuar haciendo esfuerzos por mejorar la enseñanza de la evolución tanto en las enseñanzas medias como en la educación superior (Gefaell *et al.*, 2020).

Otro resultado consistente con lo encontrado en la literatura es que la aceptación de la teoría mejora significativamente con el conocimiento de la misma y está negativamente influida por el grado de religiosidad (Gefaell *et al.*, 2020, Kuschmierz *et al.*, 2021). Si bien es interesante mencionar que, en comparación con otros países, en España existe un menor conflicto entre sostener creencias religiosas y, al mismo tiempo, aceptar la evolución (Kuschmierz *et al.*, 2021). Una línea de investigación futura podría profundizar aún más en los factores que subyacen a este rechazo, total o parcial, de la teoría de la evolución y profundizar en las medidas que podrían implementarse para mejorar esta situación.

Promover la alfabetización científica, así como la evolutiva, implica ayudar a los estudiantes a cambiar sus concepciones previas, generalmente erróneas y resistentes a las intervenciones educativas, para desarrollar una comprensión precisa de los conceptos científicos y poderlos aplicar a la interpretación de los fenómenos naturales (Li *et al.*, 2023). En esta tarea, los docentes, en sus intervenciones, han de tener en cuenta las ideas previas del alumnado y ofrecer oportunidades de indagación y cooperación para que los estudiantes puedan examinar activamente sus propias ideas y entablar una interacción dialógica que permita afianzar el proceso de cambio conceptual (Casado-Ledesma *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023). En este estudio se ha evidenciado, en línea con lo observado en otros trabajos (Casado-Ledesma *et al.*, 2023), la utilidad de los procesos de argumentación colaborativa, basados en el uso de evidencias para la resolución de problemas (o retos), a la hora de fomentar la comprensión conceptual y la reconstrucción de los conocimientos científicos. Esto cobra aún mayor relevancia si tenemos en cuenta que toda la intervención se asienta en un diagnóstico riguroso de los preconceptos del alumnado en relación con los contenidos a tratar.

Por otro lado, la gamificación es una estrategia que puede promover el compromiso y la motivación en los estudiantes, de forma similar a como lo hacen los juegos. En este estudio, el hecho de desplegar los contenidos y pruebas en forma de *escape room* digital, con un alto

grado de elementos de diseño atractivos y cercanos a la realidad del alumnado (redes sociales, etc.), se percibió como una propuesta motivadora. Las apreciaciones cualitativas de la experiencia, junto con las respuestas del cuestionario de evaluación final, indican que gran parte del éxito de la experiencia se apoya en la sensación de disfrute y diversión percibida durante la resolución de los retos intelectuales, factores que previamente han sido señalados como facilitadores de las experiencias de aprendizaje colaborativo (Bilbao-Quintana *et al.*, 2022). Otros estudios previos reconocen la influencia de la gamificación en el aprendizaje, especialmente para el aprendiz «milenial» (o más joven), por las ventajas que aporta a la educación médica, como mejorar la colaboración y aumentar el compromiso de los estudiantes, mejorar su capacidad analítica, así como ofrecer una oportunidad para prácticas deliberadas en razonamiento clínico (Xu *et al.*, 2023). Los hallazgos del presente estudio, además, son coherentes con los de experiencias previas en el ámbito de la enseñanza de la inmunología (asignatura de referencia en este trabajo), en los que la gamificación arrojó resultados significativos, consiguiendo captar la atención y mantener el grado de compromiso y participación de los estudiantes a lo largo del curso (Xu *et al.*, 2023). El uso de experiencias de aprendizaje basado en retos integrado con las tecnologías educativas parece una combinación prometedora para impulsar el proceso de enseñanza-aprendizaje, al menos si es utilizada con una frecuencia adecuada (Ratinho y Martins, 2023), o bien con contenidos que cuentan con un tiempo limitado dentro del currículo o son especialmente complicados para el alumnado (Bland, 2004; Xu *et al.*, 2023).

Por último, en esta propuesta, el alumnado, en un elevado porcentaje, declara haber mejorado su conocimiento del enfoque *One Health*, el cual reconoce la interdependencia de los fenómenos que afectan a la salud humana, la de otros organismos vivos y la de los ecosistemas a nivel global. De acuerdo con el Real Decreto 822/2021, de 28 de septiembre, por el que se establece la organización de las enseñanzas universitarias y del procedimiento de aseguramiento de su calidad, «los profesionales surgidos de las universidades deben ser capaces de liderar transformaciones para construir colectivamente una sociedad abierta al cambio, económica y medioambientalmente sostenible, tecnológicamente avanzada, socialmente equitativa, sin ningún tipo de discriminación por cuestiones de género, origen nacional o étnico, edad, ideología, religión o creencias, enfermedad, clase social, o cualquier otra condición o circunstancia personal o social, y claramente alineada con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)». La inclusión de temas relacionados con el enfoque *One Health* y la visibilización de científicas que la historia ha relegado a un segundo plano permiten abordar los contenidos disciplinares de forma tangencial al fomento de esa competencia global y la promoción de los ODS 2 (salud y bienestar), 4 (educación de calidad), 5 (igualdad de género), 12 (producción y consumo responsables), 13 (acción por el clima) y 15 (vida de ecosistemas terrestres), con el objetivo final de preparar al alumnado universitario para enfrentarse a los desafíos del mundo actual y contribuir al desarrollo sostenible.

6. Conclusiones

La especie humana es una más entre los cerca de nueve millones de especies que habitan el planeta y que son resultado de 4.000 millones de años de evolución biológica. Nues-

tras características como especie, incluidas aquellas que determinan nuestra salud o que condicionan por qué enfermamos, no pueden desligarse de nuestra historia evolutiva ni de la del resto de nuestros parientes en el árbol de la vida.

La biología evolutiva moldea todos los aspectos de la vida en la Tierra. Por todo ello, toda innovación en ciencias de la vida en las próximas décadas dependerá en gran medida de los enfoques que están siendo desarrollados en el ámbito de la medicina evolutiva. Mejorar la formación en evolución en la educación médica es vital para aprovechar el potencial de la medicina evolutiva en la comprensión, prevención y tratamiento de las amenazas ya existentes y emergentes para la salud humana, la salud del resto de organismos vivos y la del medioambiente. El presente estudio contribuye a mejorar el conocimiento del nivel de alfabetización evolutiva del alumnado universitario en un contexto español, que en la actualidad continúa siendo limitado, a pesar de su importancia. Además, este trabajo propone una intervención educativa que resulta efectiva para mejorar el aprendizaje de los conceptos evolutivos en el marco de un contexto globalizador, como el enfoque *One Health*, a través de una experiencia digital motivadora para el alumnado de educación superior.

En este sentido, las metodologías activas y la tecnología educativa, utilizadas en enfoques integrados y globalizadores, pueden ser grandes aliadas de la educación médica del siglo XXI.

Referencias bibliográficas

- Alba, N. de y Porlán, R. (2017). La metodología de enseñanza. En R. Porlán (Coord.), *Enseñanza universitaria: cómo mejorarla* (pp. 37-54). Morata.
- Beniermann, A. (2019). *Evolution-von Akzeptanz und Zweifeln: Empirische Studien über Einstellungen zu Evolution und Bewusstsein*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24105-6>.
- Beniermann, A., Kuschmierz, P., Pinxten, A., Aivelo, T., Bohlin, G., Brennecke, J. S., Cebe-soy, U. B., Cvetković, D., Đorđević, M., Dvořáková, R. M., Futo, M., Geamana, N., Korfiatis, K., Lendvai, A., Mogias, A., Paolucci, S., Petersson, M., Pietrzak, B., Porozovs, J., ... y Graf, D. (2021). *Evolution Education Questionnaire on Acceptance and Knowledge (EEQ)-Standardised and Ready-to-Use Protocols to Measure Acceptance of Evolution and Knowledge about Evolution in an International Context*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4554742>
- Benton, M. L., Abraham, A., LaBella, A. L., Abbot, P., Rokas, A. y Capra, J. A. (2021). The influence of evolutionary history on human health and disease. *Nature Review Genetics*, 22, 269-283. <https://doi.org/10.1038/s41576-020-00305-9>
- Bilbao-Quintana, N., Romero-Andonegui, A., Portillo-Berasaluce, J. y López-de-la-Serna, A. (2022). Escape room digital para el desarrollo del aprendizaje colaborativo en educación superior. *Education in the Knowledge Society (EKS)*, 23, 1-14. <https://doi.org/10.14201/eks27126>
- Bland, J. (2004). Teaching statistics to medical students using problem-based learning: the australian experience. *BMC Medical Education*, 4. <https://doi.org/10.1186/1472-6920-4-31>
- Cañal, P. (Coord.). (2011). *Didáctica de la biología y la geología*. Graó.
- Casado-Ledesma, L., Cuevas, I. y Martín, E. (2023). Learning science through argumen-

- tative synthesis writing and deliberative dialogues: a comprehensive and effective methodology in secondary education. *Reading and Writing*, 36, 965-996. <https://doi.org/10.1007/s11145-021-10191-0>
- Chen, J. y Liang, M. (2022). Play hard, study hard? The influence of gamification on students' study engagement. *Frontiers in Psychology*, 13, 1-9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.994700>
- Cook, D. A. y Artino, A. R. Jr. (2016). Motivation to learn: an overview of contemporary theories. *Medical Education*, 50(10), 997-1.014. <https://doi.org/10.1111/medu.13074>
- Cruz Velasco, P. H. de la, Poquis Velasquez, E. V., Valle Chavez, R. A., Castañeda Sánchez, M. I. y Sánchez Anastacio, K. R. (2022). Aprendizaje basado en retos en la educación superior: una revisión bibliográfica. *Horizontes: Revista de Investigación en Ciencias de la Educación*, 6(25), 1.409-1.421. <https://doi.org/10.33996/revistahorizontes.v6i25.422>
- Delgado-Quñones, E. G., Rivero-López, C. A., Orozco-Sandoval, R., Sahagún-Cuevas, M. N., Silva-Luna, Z. E. N. y López-Cázares, D. A. (2022). Aprendizaje basado en juegos: propuesta de técnica-enseñanza en médicos becarios. *Revista de Medicina del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 60(1), 19-25. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-1359779>
- Domènech Girbau, M. y Lope Pastor S. (2009). Propuesta de actividades de aula sobre evolución: otros prismas y contextos. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 1, 1.148-1.153.
- Friedrichsen, P. J., Brown, L. G. y Schul, J. (2018). Project teach evolution: preparing biology pre-service teachers to teach evolution in Missouri, U.S.A. En H. Deniz y L. A. Borgerding (Eds.), *Evolution Education Around the Globe*. Springer International.
- Gallagher, S. E. y Savage, T. (2023). Challenge-based learning in higher education: an exploratory literature review. *Teaching in Higher Education*, 28(6), 1.135-1.157. <https://doi.org/10.1080/13562517.2020.1863354>
- Gefaell, J., Prieto, T., Abdelaziz, M., Álvarez, I., Antón, J., Arroyo, J., Bella J. L., Botella M., Bugallo, A., Claramonte V., Gijón, J., Lizarte, E., Maroto, R. M., Megias, M., Milá, B., Ramón, C., Vila, M. y Rolán-Alvarez, E. (2020). Acceptance and knowledge of evolutionary theory among third-year university students in Spain. *PLOS ONE*, 15(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238345>
- Glaze, A. L. y Goldston, M. J. (2015). U.S. science teaching and learning of evolution: a critical review of the literature 2000-2014. *Science Education*, 99(3), 500-518.
- Gomollón, F. (2011). La medicina desde la perspectiva evolutiva. *GH Continuada*, 10(4), 191-195.
- González Galli, L., Pérez, G. y Gómez Galindo, A. A. (2020). The self-regulation of teleological thinking in natural selection learning. *Evolution: Education and Outreach*, 13(6). <https://doi.org/10.1186/s12052-020-00120-0>
- Graves, J. L., Reiber, C., Thanukos, A., Hurtado, M. y Wolpaw, T. (2016). Evolutionary science as a method to facilitate higher level thinking and reasoning in medical training. *Evolution, Medicine and Public Health*, 2016(1), 358-368. <https://doi.org/10.1093/EMPH/EOW029>
- Gregory, T. R. (2009). Understanding natural selection: essential concepts and common misconceptions. *Evolution: Education and Outreach*, 2, 156-175. <https://doi.org/10.1007/s12052-009-0128-1>
- Grunspan, D. Z., Moeller, K. T., Nesse, R. M. y Brownell, S. E. (2019). The state of evolutionary medicine in undergraduate education. *Evolutionary Medicine and Public Health*, 2019(1), 82-92. <https://doi.org/10.1093/emph/eoz012>
- Harms, U. y Reiss, M. (2019). The present state of evolution education. En U. Harms y M. Reiss (Eds.), *Evolution Education: Re-considered* (pp. 1-19). Springer.
- Heddy, B. C. y Sinatra, G. M. (2013). Transforming misconceptions: using transformative experience to promote positive affect and conceptual change in students learning

- about biological evolution. *Science Education*, 97(5), 723-744. <https://doi.org/10.1002/sce.21072>
- Herrada Valverde, R. I. y Baños Navarro, R. (2018). Revisión de experiencias de aprendizaje cooperativo en ciencias experimentales. *Campo Abierto: Revista de Educación*, 37(2), 157-170. https://dehesa.unex.es:8443/bitstream/10662/8462/1/0213-9529_37_2_157.pdf
- Kampourakis, K. (2014). *Understanding Evolution*. Cambridge University Press.
- Kampourakis, K. (2022). Reconsidering the goals of evolution education: defining evolution and evolutionary literacy. *Evolution: Education and Outreach*, 15, 1-9. <https://doi.org/10.1186/s12052-022-00180-4>
- Khoshnoodifar, M., Ashouri, A. y Taheri, M. (2023). Effectiveness of gamification in enhancing learning and attitudes: a study of statistics education for health school students. *Journal of Advances in Medical Education & Professionalism*, 11(4), 230-239. <https://doi.org/10.30476/JAMP.2023.98953.1817>
- Kuschmierz, P., Beniermann, A., Bergmann, A., Pinxten, R., Aivelo, T., Berniak-Woźny, J., Bohlin, G., Bugallo-Rodríguez, A., Cardia, P., Barreiras Pinto, B. P., Betul Ceibesoy, U., Cvetković, D., Demarsy, E., Đorđević, M. S., Drobniak, S. M., Dubchak, L., Dvořáková, R. M., Fančovičová, J., Fortin, C., ... y Graf, D. (2021). European first-year university students accept evolution but lack substantial knowledge about it: a standardized European cross-country assessment. *Evolution: Education and Outreach*, 14, 1-22. <https://doi.org/10.1186/s12052-021-00158-8>
- Kuschmierz, P., Beniermann, A. y Graf, D. (2020). Development and evaluation of the knowledge about evolution 2.0 instrument (KAEVO 2.0). *International Journal of Science Education*, 42(15), 2.601-2.629. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1822561>
- Li, X., Li, Y. y Wang, W. (2023). Long-lasting conceptual change in science education. *Science & Education*, 32, 123-168. <https://doi.org/10.1007/s11191-021-00288-x>
- Mardones Cofré, H., Olguín Becerra, B., Aldunate Cuevas, E., Nieto Núñez, P., Gómez Santibáñez, D., Díaz Vergara, C. y González Bravo, P. (2017). Relación entre los conocimientos de naturaleza de la ciencia, de evolución y la aceptación de la teoría evolutiva en profesores de biología luego de un programa de desarrollo profesional. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, núm. extra, 2.491-2.496. <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/336875>
- Miller, J., Scott, E. y Okamoto, S. (2006). Public acceptance of evolution. *Science*, 313, 765-766.
- Mindell, D. P. (2007). *The Evolving World: Evolution in Everyday Life*. Harvard University Press.
- Murray, C. J. L., Shunji, K., Sharara, F., Swetschinski, L., Robles-Aguilar, G., Gray, A., Han, C., Bisignano, C., Rao, P., Wool, E., Johnson, S. C., Browne, A. J., Give-Chipeta, M., Fell, F., Hackett, S., Haines-Woodhouse, G., Kashef, B. H., Kumaran, E. A. P., McManigal, B., ... y Naghavi, M. (2022). Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *The Lancet*, 399(10.325), 629-655. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0)
- Natterson-Horowitz, B., Aktipis, A., Fox, M., Gluckman, P. D., Low, F. M., Mace, R., Read, A. Turner, P. E. y Blumstein, D. T. (2023). The future of evolutionary medicine: sparking innovation in biomedicine and public health. *Frontiers in Science*, 1. <https://doi.org/10.3389/fsci.2023.997136>
- Nesse, R. M., Bergstrom, C. T., Ellison, P. T., Flier, J. S., Gluckman, P., Govindaraju, D. R., Niethammer, D., Omenn, G. S., Perlman, R. L., Schwartz, M. D., Thomas, M. G., Stearns, S. C. y Valle, D. (2010). Evolution in health and medicine Sackler colloquium: making evolutionary biology a basic science for medicine. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(suplemento 1), 1.800-1.807. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906224106>

- OCDE. (2018). *Preparing Our Youth for an Inclusive and Sustainable Work. The OCDE PISA Global Competence Framework*. OCDE. <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/topics/policy-sub-issues/global-competence/Handbook-PISA-2018-Global-Competence.pdf>
- OMS. (2021). *Resistencia a los antimicrobianos*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>
- Pérez Vázquez, E., Gilabert Cerdá, A. y Lledó Carreres, A. (2019). Gamificación en la educación universitaria: el uso del escape room como estrategia de aprendizaje. En R. Roig Vila (Coord.), *Investigación e innovación en la enseñanza superior* (pp. 660-668). Octaedro.
- R Core Team. (2022). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Ratinho, E. y Martins, C. (2023). The role of gamified learning strategies in student's motivation in high school and higher education: a systematic review. *Heliyon*, 9(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19033>
- Real Decreto 822/2021, de 28 de septiembre, por el que se establece la organización de las enseñanzas universitarias y del procedimiento de aseguramiento de su calidad (BOE núm. 233, de 29 de septiembre de 2021). <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/09/28/822/con>
- Robledo Ramón, P., Fidalgo Redondo, R., Arias Gundín, O. y Álvarez Fernández, L. (2015). Percepción de los estudiantes sobre el desarrollo de competencias a través de diferentes metodologías activas. *Revista de Investigación Educativa*, 33(2), 369-383. <https://doi.org/10.6018/rie.33.2.201381>
- Rubio Pulido, M. (2017). *Diseño universal para el aprendizaje, porque todos somos todos*. Emtic. <https://emtic.educarex.es/224-nuevo-ent/atencion-a-la-diversidad/3020-diseno-universal-para-el-aprendizaje-por-que-todos-somos-todos#ejemplos>
- Xu, M., Luo, Y., Zhang, Y., Xia, R., Qian, H. y Zou, X. (2023). Game-based learning in medical education. *Frontiers in Public Health*, 11, 1-9. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1113682>
- Yousuf, A., Daud, M. A. bin y Nadeem, A. (2011). Awareness and acceptance of evolution and evolutionary medicine among medical students in Pakistan. *Evolution: Education and Outreach*, 4, 580-588. <https://doi.org/10.1007/s12052-011-0376-8>

Cristina Fernández-Aragón. Licenciada en Biología por la Universidad Complutense de Madrid (España) y doctora en Ecología por la Universidad Rey Juan Carlos (España). Su trayectoria profesional combina la actividad docente e investigadora en las áreas de ecología y ciencias de la educación. Coordina el grupo de trabajo La Ecología en la Educación de la Asociación Española de Ecología Terrestre.

Cristina Fernández-Arias. Licenciada en Biología por la Universidad Complutense de Madrid (España) y doctora en Biología Celular e Inmunología por la Universidad Autónoma de Madrid (España). Durante más de diez años investigó el papel del sistema inmunológico en la infección por malaria en instituciones europeas (España y Portugal) y estadounidenses (Nueva York). Desde 2021, es profesora de inmunología en la Facultad de Medicina de la Universidad Complutense y dirige el grupo de inmunología teórica, donde combina la investigación y la docencia para impulsar el conocimiento en este campo.

Contribución de autoras. C. F.-A. y C. F.-A. han participado a partes iguales en la elaboración de este estudio de investigación.