

LA EVOLUCIÓN Y EL MÉTODO CIENTÍFICO COMO CIMIENTOS DE LA ENSEÑANZA DE LA BIOLOGÍA

MARÍA JOSÉ APODACA
LILIANA KATINAS
JORGE V. CRISCI

La problemática expansión de la resistencia de las bacterias a los antibióticos y de las malezas a los herbicidas, las semejanzas morfológicas y moleculares entre diferentes grupos de organismos, la unidad de todos los seres vivos reflejada en los ácidos nucleicos, la extraordinaria y asombrosa biodiversidad que nos rodea, el pasado escrito en los fósiles y la posición del hombre en la historia de la vida son todos hechos aislados, pero solo pueden ser comprendidos y relacionados entre sí a la luz de la evolución biológica. La evolución explica y unifica.

¿Es posible enseñar biología sin mencionar la evolución? La respuesta, lamentablemente, es sí, y, en efecto, ocurre todo el tiempo. Pero no es posible que los estudiantes comprendan biología sin el entorno evolutivo; contexto del cual dependen el sentido y el valor de los conceptos biológicos.

La evolución biológica consiste en el cambio de las características hereditarias de grupos de organismos en el curso de varias generaciones. En una perspectiva a largo plazo, la evolución es la descendencia con modificación de diferentes linajes a partir de un ancestro común. Desde una perspectiva de corto plazo, es la adaptación de los organismos a desafíos y cambios ambientales. Por lo tanto, la evolución tiene dos componentes: la relación ancestro-descendiente de los diferentes linajes y los procesos que la causaron.¹

Por otra parte, la humanidad ha desarrollado y confirmado, a través de los siglos, un conjunto de ideas, interconectadas entre sí, que explican —o intentan explicar— los aspectos físicos, biológicos, psicológicos y sociales que la rodean. Este conjunto de ideas, al que llamamos ciencia, ha permitido que las sucesivas generaciones comprendan, cada vez con más profundidad, a los seres vivos y su historia. Por ello, la ciencia es otro factor unificador de la biología. La ciencia requiere de procedimientos pertinentes a los diferentes enfoques disciplinarios. De allí que existan métodos especiales adecuados al tipo de problema que se investiga. No obstante esto, existe un método general que contiene conceptos transversales y prácticas que subyacen a toda investigación.²

En este trabajo presentaremos, de manera sumaria, un mapa de conceptos (Figuras 1, 2 y 3) que combina las ideas centrales de la evolución con las prácticas y conceptos transversales de la ciencia. Los mapas de conceptos^{3 4} son un excelente medio para visualizar las ideas o conceptos y las relaciones jerárquicas entre ellos. Así, ayudan a los estudiantes a clarificar su pensamiento y a procesar, organizar y priorizar nueva información.

Nos ha parecido provechoso añadir un capítulo con las evidencias de la evolución, que sirva como introducción a la enseñanza de la misma. Además, y a manera de ejemplo, agregamos una actividad, con su resolución, en las que se aplica nuestro mapa de conceptos (Apéndice 1).

Finalmente, incluimos una sección en la que proponemos que la evolución no es solo un elemento unificador, sino que constituye una narrativa que brinda una razón al docente para enseñar y al estudiante para aprender biología.

Figura 1. Mapa de conceptos (parte I) que muestra las relaciones entre la biología evolutiva y el método científico como base para la enseñanza de la biología.

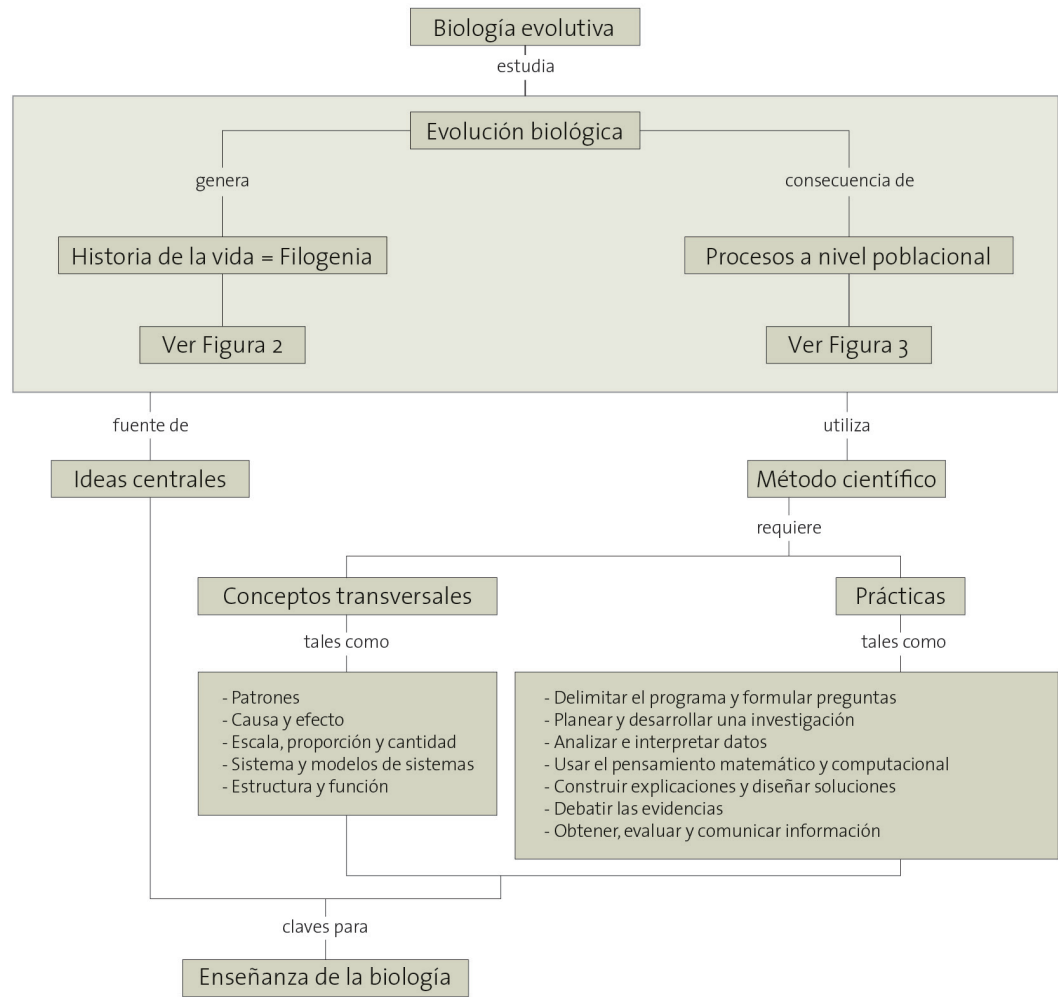
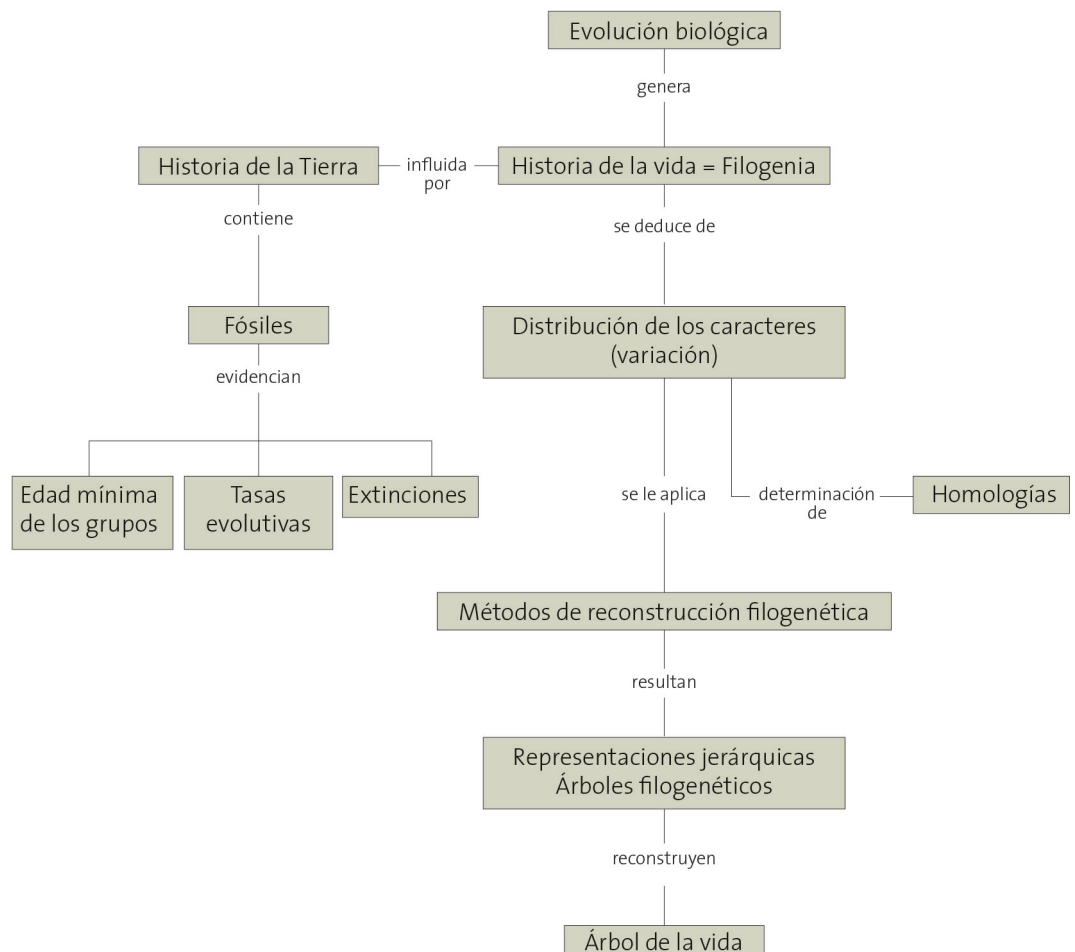


Figura 2. Mapa de conceptos (parte II) que muestra la historia de la vida como un producto de la evolución biológica y su representación por árboles filogenéticos.



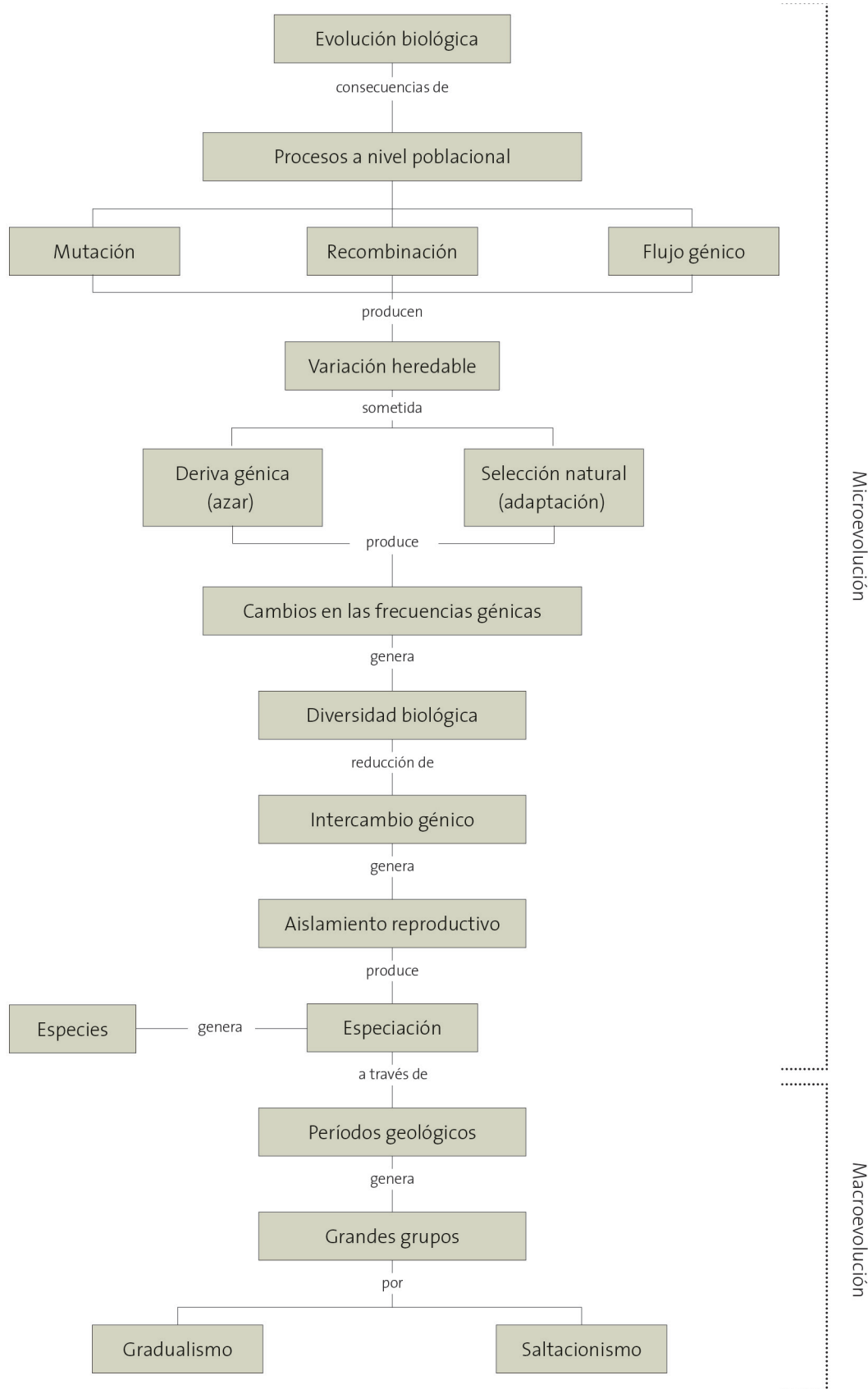


Figura 3. Mapa de conceptos (parte III) que muestra los procesos a nivel poblacional que generan la evolución biológica desde la micro- a la macroevolución.

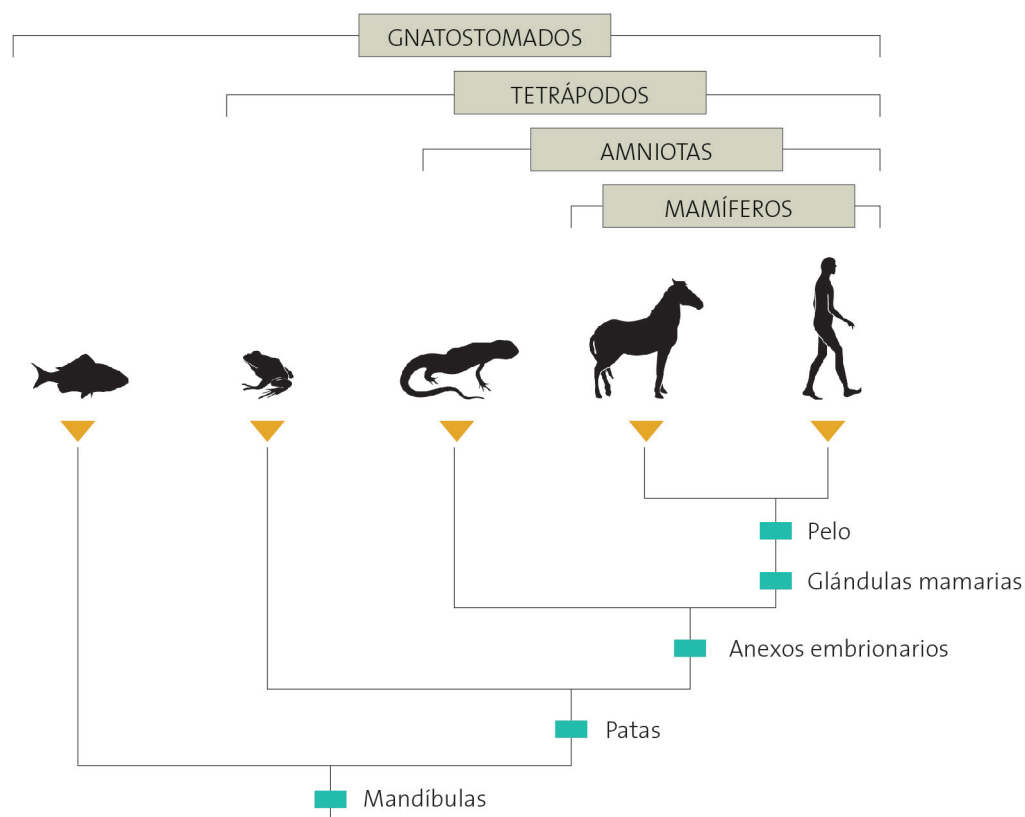
IDEAS CENTRALES DE LA EVOLUCIÓN

La Figura 1 muestra que la **biología evolutiva** responde dos preguntas: ¿cuál es la historia de la vida?, la cual se explica en la Figura 2, y ¿qué procesos la causaron?, que encuentra respuesta en la Figura 3.

La primera pregunta (Figura 2) se contesta reconstruyendo el árbol genealógico de la vida. Charles Darwin (1809-1882) fue uno de los primeros naturalistas en sugerir, en 1859, la imagen de un árbol genealógico para representar la **historia de la vida**. En 1866 Ernst Haeckel (1834-1919) creó el concepto de **filogenia** para definir esa historia.

Luego de numerosos intentos de formular un **método de reconstrucción de la filogenia** y su representación gráfica, el biólogo Willi Hennig (1913-1976) presentó en 1950 las bases de un método al que se denominó "sistemática filogenética" o "cladismo". Este método utiliza la **distribución de los caracteres de los organismos (variación)**, determina **homologías**, forma los grupos en función de las novedades evolutivas que presentan y se basa en el principio de simplicidad para reconstruir la relación ancestro-descendiente. El principio de simplicidad (metodológico, no ontológico) postula que los cambios evolutivos suceden de la forma más económica posible desde el punto de vista de los eventos genéticos que los generan. La Figura 4 es un **árbol filogenético** de algunos vertebrados con las principales novedades evolutivas que definen a cada grupo.

Figura 4. Árbol filogenético que muestra las relaciones de algunos vertebrados, con las principales novedades evolutivas que definen a cada grupo.



Recientemente, y con el propósito de aplicarlos a datos moleculares (secuencias de ácidos nucleicos), se han propuesto además métodos estadísticos basados en el cálculo de probabilidades, como el de máxima verosimilitud o el bayesiano.

Por la complejidad de los cálculos, en la mayoría de los casos de reconstrucción filogenética se utilizan herramientas computacionales. Todos los métodos se basan en los siguientes postulados básicos:

1. La naturaleza tiene una **estructura jerárquica**.
2. Esa estructura jerárquica puede representarse por diagramas ramificados denominados árboles filogenéticos o cladogramas.
3. La estructura jerárquica de la naturaleza puede rescatarse mediante un muestreo de caracteres homólogos.

Caracteres homólogos son aquellos que fueron originados, con o sin modificación, a partir del ancestro común de ese grupo (por ejemplo, los miembros anteriores de los tetrápodos, como las patas del perro y las de las ovejas). La homoplasia (no es útil para establecer relaciones ancestro-descendiente) es el concepto complementario de la homología: se presenta cuando dos o más organismos poseen atributos similares y/o con la misma función, que no fueron originados en el ancestro común a esos organismos (por ejemplo, los ojos complejos de los vertebrados y los de los cefalópodos).

La Figura 5 es un árbol filogenético (basado en datos morfológicos y moleculares) que muestra las relaciones de los grandes grupos de seres vivos, desde las bacterias hasta el hombre (*Homo sapiens*).

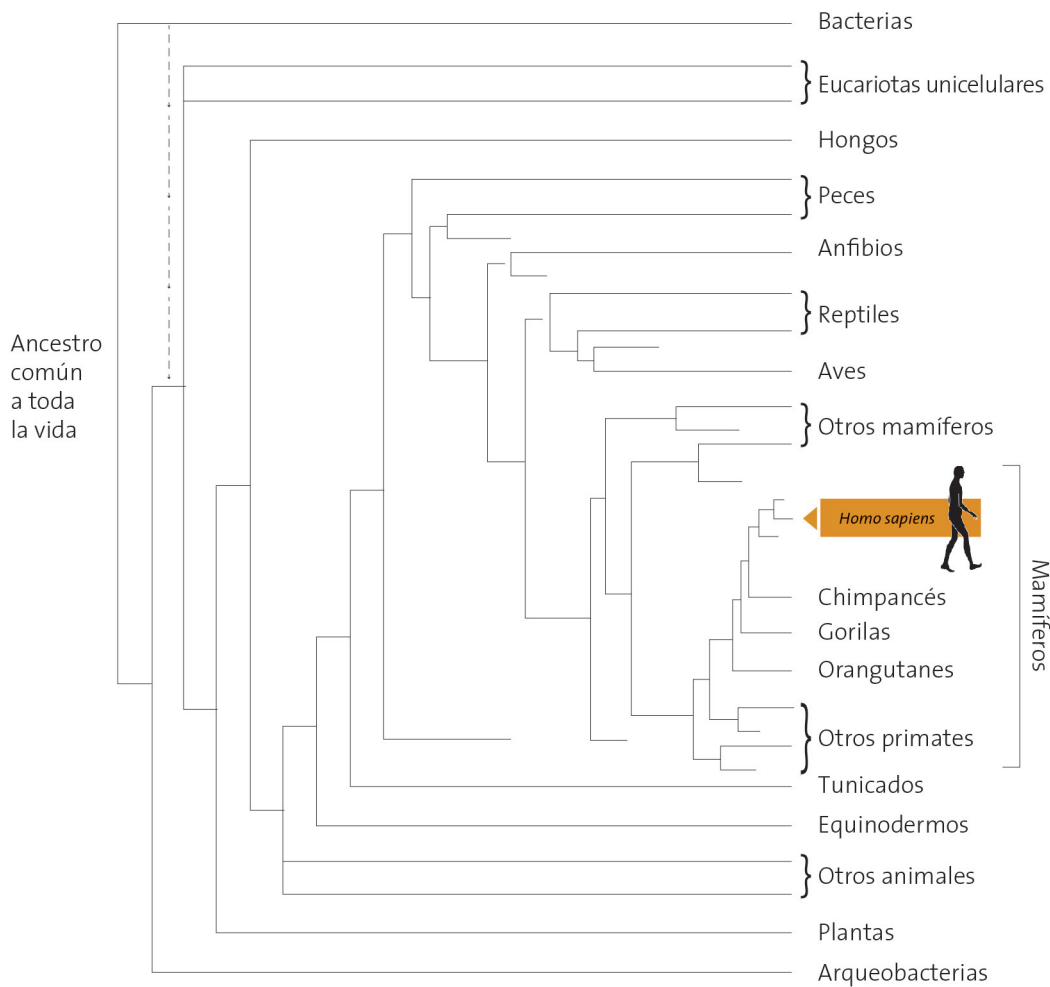


Figura 5. Árbol filogenético que muestra las relaciones de los grandes grupos de seres vivos. Las ramas sin labels y más cortas significan extinciones. La línea punteada muestra el evento evolutivo por el cual una bacteria simbiótica se transformó en mitocondria de las células del resto de los seres vivos (excepto las arqueobacterias).

Los 3500 millones de años de la historia de la vida han estado siempre bajo la influencia de la **historia de la Tierra**. Los **fósiles** (restos o evidencias de vida de más de 5000 años) son las huellas de ese pasado y son un elemento fundamental para establecer la **edad mínima de los grupos** y las **tasas de evolución** de cada uno de ellos. Los fósiles también nos muestran el fenómeno de la **extinción** (desaparición de todos los integrantes de un grupo de seres vivos), hecho común en la historia de la vida.

El primer paso para responder la segunda pregunta (¿Qué procesos causaron la historia de la vida?) es investigar cuáles son los mecanismos de la evolución (Figura 3).

Los cambios evolutivos se deben principalmente a tres tipos básicos de **procesos que actúan a nivel poblacional**: mutación, recombinación génica y flujo génico. **Mutación** es un proceso de alteración de un gen o de un cromosoma, así como el estado alterado producto de ese proceso, independientemente de si genera o no un cambio en las características visibles del organismo. La **recombinación génica** es producto de la combinación de genes de ambos progenitores en la reproducción sexual. No se trata de una fuerza que cambia la frecuencia de genes en la población, pero sí produce nuevas combinaciones de genes. **El flujo génico** es el aumento de la variación por nuevos genes aportados por la llegada de individuos de otras poblaciones.

Estos procesos básicos son los que generan la **variación heredable**. A su vez, esta se encuentra sometida a procesos que cambian la **frecuencia génica de las poblaciones**, como la selección natural (adaptación) y la deriva génica.

La **selección natural** se basa en que los diferentes fenotipos (características de los individuos como consecuencia de la interacción del genotipo con el ambiente) poseen distinta capacidad de supervivencia y/o reproducción en el ambiente en que viven, lo cual genera una perpetuación diferencial de los respectivos genotipos. Se denomina **adaptación** a aquella característica que aumenta la supervivencia y/o la reproducción del organismo que la porta, en un ambiente determinado. La selección natural es el único mecanismo conocido que origina las adaptaciones, por lo que podría decirse que una adaptación es una característica que evolucionó por selección natural.

La **deriva génica** está representada por cambios al **azar**, no adaptativos, en la frecuencia de dos o más genotipos (la totalidad de los genes que un individuo recibe de sus progenitores) dentro de una misma población, como consecuencia de las fluctuaciones debidas a “errores de muestreo” (procesos aleatorios). Por ejemplo, el proceso llamado “cuello de botella”, en el que un pequeño número de individuos de una población migra y se establece como colonizador (fundadores) de una nueva población. Como los fundadores son una pequeña muestra de la población original, la frecuencia de los genotipos en la nueva población puede diferir por azar de aquellos de la población fuente.

La selección natural y la deriva génica son los procesos que generan la diversidad biológica. La **diversidad biológica** no es un continuo, puesto que a través de una reducción del **intercambio génico** entre poblaciones se genera **aislamiento reproductivo** entre ellas, lo que conduce al proceso de **especiación** o formación de nuevas especies. Los miembros de una **especie** pueden diferir genética, ecológica, etológica o morfológicamente de los de otras, pero las especies se diferencian entre sí, en la mayoría de los casos, por estar aisladas reproductivamente de otras especies.

La definición de especie es un tema muy controvertido. Se la ha definido de muy diversas maneras,⁵ pero el criterio más utilizado, aunque no exento de dificultades, es el concepto biológico de especie: grupo de poblaciones naturales, genéticamente similares, interfértiles y aisladas reproductivamente de otros grupos análogos.

La especiación, por lo tanto, es responsable de las discontinuidades que observamos en la diversidad biológica. Estas discontinuidades van desde el nivel de especie (**microevolución**) a los niveles de **grandes grupos (macroevolución)**. Los cambios macroevolutivos ocurren con la aparición de características que distinguen grandes grupos, tales como los mamíferos, los insectos o las plantas con flores. Son cambios que ocurrieron en una escala de tiempo geológico. La macroevolución presenta dos escuelas de pensamiento: el gradualismo y el saltacionismo.

El **gradualismo** explica la macroevolución como el resultado de la acumulación de pequeñas modificaciones a lo largo de los **períodos geológicos**. La única diferencia entre macro- y microevolución sería entonces la cantidad de tiempo en el que transcurren. Por tanto, la macroevolución es una simple extensión en el tiempo de la microevolución.

Por otro lado, el **saltacionismo** propone que la macroevolución incluye factores o procesos puntuales que solo operan a nivel macroevolutivo. Por ejemplo, grandes cambios en los cromosomas (macromutaciones) darían origen a organismos muy diferentes, que se adaptarían a nuevos modos de vida y generarían las diferencias entre los grandes grupos.

La oposición binaria⁶ gradualismo-saltacionismo puede ser superada con la siguiente argumentación: las fuerzas evolutivas de la microevolución funcionan y son causantes de la mayoría de los grandes grupos que hoy vemos. Sin embargo, en la larga historia de la vida podemos aceptar la ocurrencia ocasional de eventos únicos con grandes consecuencias. Por ejemplo, el evento evolutivo por el cual una bacteria simbiótica se transformó en mitocondria de las células de la mayoría del resto de los seres vivos (Figura 5).

CONCEPTOS TRANSVERSALES Y PRÁCTICAS DEL MÉTODO CIENTÍFICO

Una manera de unir la enseñanza de la evolución al método científico es aplicar en el aula los **conceptos transversales** y las **prácticas** que el científico utiliza en sus investigaciones.

A modo de ejemplo, un concepto transversal es el de patrones, es decir, ciertas características u objetos que se repiten de manera predecible. Existen patrones en todas partes: en la simetría de las flores y en los pares de bases nitrogenadas repetidas del ADN, entre otros. Registrar los patrones es el primer paso para luego poder hacer preguntas evolutivas sobre por qué y cómo se producen los patrones y cuáles son los factores que los influyen. Los patrones ocupan un lugar destacado cuando se realiza un análisis e interpretación de datos.

Los conceptos transversales proveen a los alumnos de conexiones y herramientas intelectuales que se relacionan a través de las diferentes áreas de contenidos disciplinares y que pueden enriquecer la aplicación de prácticas y la comprensión de las ideas centrales. No hay mejor manera de comprender un concepto que entendiendo cómo fue generado. De este modo se buscará despertar el interés de los estudiantes por la investigación. En el Cuadro 1 se citan otros conceptos transversales.

Por otro lado, las prácticas son aquellos pasos que realizan los científicos en sus investigaciones. Un ejemplo de prácticas es delimitar un problema y formular preguntas. La formulación de preguntas puede surgir de diversas maneras: por simple curiosidad por el mundo que nos rodea, inspirados en las predicciones de un modelo, de una teoría o en los resultados de investigaciones anteriores. La biología evolutiva, como hemos visto, se hace dos grandes preguntas que la sustentan y la organizan: ¿cuál es la historia de la vida? y ¿qué procesos la generaron? En el Cuadro 1 se mencionan más ejemplos de prácticas.

Además, en el Apéndice 1 se proporciona un ejemplo de actividad docente en la que se emplean algunas ideas centrales de la evolución y algunos conceptos transversales y prácticas.

EVIDENCIAS DE LA EVOLUCIÓN

¿Cuáles son las pruebas de que la evolución ha ocurrido —y ocurre— en la historia de la vida? Entre ellas podemos mencionar el registro fósil, la unidad de la vida, la evolución observada, las estructuras vestigiales, los estudios de anatomía comparada y la distribución espacial de los organismos. A continuación las describiremos brevemente:

El **registro fósil**: algunos fósiles muestran estadios intermedios entre grupos afines. Por citar un caso, las hormigas y las avispas están emparentadas. Los científicos propusieron un eslabón teórico de características intermedias entre ambos grupos. Años después de que se hiciera esta propuesta se descubrió en una piedra de ámbar una hormiga fosilizada con las características predichas.^{7 8}

La **unidad de la vida**: la mayoría de las formas vivientes son similares en muchos aspectos y ello es particularmente sorprendente en el campo de la bioquímica. De los virus al hombre, la herencia se codifica en solo dos macromoléculas químicamente relacionadas: el ADN y el ARN. El código genético es tan simple como universal: hay tan solo cuatro nucleótidos —adenina, guanina, timina y citosina— en el ADN; en el ARN la timina es reemplazada por el uracilo. La evolución ocurrió, y ocurre, a partir de nuevas combinaciones de esos nucleótidos. Estas similitudes sugieren que la vida surgió solo una vez y que todos los organismos, en toda su diversidad, conservan las características básicas de esa vida primigenia.

La **evolución observada**: es aquella que el hombre ha podido documentar, pues sucede a una tasa tal que nos permite ser testigos de estos cambios evolutivos. Existen dos ejemplos emblemáticos de evolución observada: la resistencia de las bacterias a los antibióticos y la resistencia de las malezas a los herbicidas. A los tres años del surgimiento y uso extendido del antibiótico penicilina, se hallaron tres especies de bacterias resistentes a ella. Cada nuevo antibiótico, desarrollado por el hombre en respuesta a la disminución de la eficacia de los antibióticos anteriores, ha provocado la evolución de bacterias resistentes al nuevo producto. Lo mismo sucedió con la peligrosísima cepa MRSA de *Staphylococcus aureus* que generó —y aún continúa generando— numerosas muertes por infección hospitalaria. Esta bacteria ha evolucionado constantemente en formas resistentes a la mayoría de los antibióticos con los que se la ha combatido. Es importante destacar que ni los antibióticos ni los herbicidas generan las mutaciones que otorgan resistencia; esas resistencias existían en unos pocos individuos quienes, al sobrevivir, proliferaron, al mismo tiempo que, por selección natural, disminuían los no resistentes.

Las **estructuras vestigiales**: representan aquellas características que tuvieron una función en algún ancestro, pero ya no tienen tal función en las especies descendientes. Por ejemplo, hay abejas no voladoras que poseen alas rudimentarias.

Los estudios de **anatomía comparada**: estos han demostrado que las características de los organismos casi siempre evolucionan de formas preexistentes presentes en sus ancestros. Los huesecillos del oído medio de los mamíferos evolucionaron a partir de los huesos de la mandíbula de los reptiles, pasando de una función alimenticia a una función auditiva.

La **distribución de los seres vivos**: la biogeografía de América del Sur inspiró a Charles Darwin a proponer, en 1859,⁹ una teoría de la evolución por selección natural. La genealogía de la vida fue justificada en la sucesión espacial, en áreas adyacentes, de especies ligadas por sus afinidades morfológicas, por ejemplo, las dos especies de ñandúes de América del Sur austral. La idea de selección natural le fue inspirada a Darwin por la distribución de un grupo de pájaros de las islas Galápagos y su pico adaptado al tipo de alimento que ofrecía cada una de las islas.¹⁰

LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA COMO NARRATIVA

Al considerar cómo llevar a cabo la enseñanza tenemos dos problemas que resolver. Uno es un problema de ingeniería; el otro es metafísico. El primero es esencialmente técnico: es el problema de los medios con los cuales el estudiante será educado. Aborda las cuestiones de dónde y cuándo se harán las cosas y, por supuesto, se pregunta cómo se supone que ocurrirá el aprendizaje. El problema no es simple, y cualquier proyecto educativo respetable tiene que ofrecer algunas soluciones para esto. Nuestro mapa de conceptos es un intento en esa dirección técnica.

Pero convertirse en una persona diferente a partir de algo que se ha aprendido; apropiarse de una idea, de un concepto, de una visión de tal manera que esto origine un cambio en nuestro mundo: eso es un problema diferente.

Para que esto suceda, se necesita una razón. Y ese es un problema metafísico. Una razón, como usamos la palabra aquí, es algo distinto de una motivación. Dentro del contexto de la enseñanza, la motivación se refiere a un evento psíquico temporario por medio del cual se despierta la curiosidad y se atrae la atención del alumno. No es nuestra intención menospreciarla. Sin embargo, no debe ser confundida con tener una razón para estar en un aula, para escuchar a un maestro, para hacer un examen, para hacer las tareas, para estar al día con la escuela, aun cuando no se esté motivado. Este tipo de razón es algo abstracto, no siempre presente en nuestra conciencia, no siempre fácil de describir. Pero, por sobre todo esto, sin ella la enseñanza no funciona.

Para que la escuela tenga sentido, los jóvenes, sus padres y sus maestros tienen que tener un relato o, mejor aún, varios relatos. Si no tienen ninguno, la escuela no tiene sentido. El famoso aforismo de Nietzsche es aquí relevante: “El que tiene un por qué para vivir puede soportar casi cualquier cómo”. Esto se aplica tanto a vivir como a aprender.

Entendemos por relato una historia; no cualquier tipo de historia, sino una que nos habla de los orígenes y que imagina un futuro, una historia que construye ideales, prescribe reglas de conducta, genera fuentes de autoridad y, sobre todo, da un sentido de continuidad y propósito. En el sentido en que empleamos la palabra, es el nombre de un gran relato, uno que tiene suficiente credibilidad, complejidad y poder simbólico como para permitirnos organizar nuestra vida alrededor de él. Un relato unificador sobre cómo es la vida, cómo las cosas llegaron a ser de la forma que son y qué se avecina.

Un relato que contiene suficiente resonancia y poder para ser la razón de enseñar biología es la evolución biológica. La evolución biológica, como relato, es una narración inspiradora de la vida en nuestro planeta y del origen del hombre en ella. Habla de la fragilidad humana e invoca nuestro sentido de custodios de la diversidad biológica.

Jorge Luis Borges (1899-1986), el gran escritor argentino, se hizo una pregunta cuya respuesta refleja en su totalidad el tema de la evolución como razón para enseñar biología:

A un chico lo llevan por primera vez al jardín zoológico. Ese chico será cualquiera de nosotros o, inversamente, nosotros hemos sido ese chico y lo hemos olvidado. En ese jardín, [...] el chico ve animales vivientes que nunca ha visto; ve jaguares, buitres, bisontes y, lo que es más extraño, jirafas. Ve por primera vez la desatinada variedad del reino animal, y ese espectáculo, que podría alarmarlo u horrorizarlo, le gusta. Le gusta tanto que ir al jardín zoológico es una diversión infantil, [...]. ¿Cómo explicar este hecho común y a la vez misterioso?

[...] el niño mira sin horror a los tigres porque no ignora que él es los tigres y los tigres son él o, mejor dicho, que los tigres y él son de una misma esencia [...]¹¹

En su respuesta Borges nos dice que el niño percibe, inconscientemente, que compartimos el precioso momento del origen de la vida con el resto de los seres vivos.

La enseñanza de la evolución nos lleva a aquel extraordinario momento, 3500 millones de años atrás, con el objeto de concientizar y fomentar en nuestros niños, y en todos nosotros, un sentido de pertenencia a la naturaleza y de hermandad con ella.

CUADRO 1. MÉTODO CIENTÍFICO: CONCEPTOS TRANSVERSALES Y PRÁCTICAS

CONCEPTOS TRANSVERSALES

- Causa y efecto (o mecanismo y explicación). Suele ser el siguiente paso luego de la búsqueda de patrones. Los eventos tienen causas que pueden ser, a veces, simples y, otras veces, multifacéticas. Una actividad importante en ciencia es investigar y explicar las relaciones causales y los mecanismos que las median. Tales mecanismos pueden después ponerse a prueba a través de determinados contextos y utilizarse para predecir y explicar eventos en contextos nuevos.

- Escala, proporción y cantidad. Al considerar fenómenos, es crítico reconocer los conceptos de escala, proporción y cantidad, ya que constituyen evaluaciones fundamentales de las dimensiones de las observaciones realizadas.

- Sistemas y modelos de sistemas. Debido a que el mundo es complejo, resulta útil aislar un único sistema y construir un modelo simplificado de él. Definir el sistema en estudio, especificando sus límites y elaborando un modelo explícito de él, proporciona las herramientas para comprender y poner a prueba ideas que pueden ser empleadas en biología y en otras disciplinas.

- Estructura y función. Son propiedades complementarias: la manera en que un objeto o un ser viviente están formados y su subestructura determinan muchas de sus propiedades y de sus funciones.

PRÁCTICAS

- Desarrollar y utilizar modelos. Los modelos se utilizan para representar un sistema o partes de un sistema en estudio. Incluyen diagramas, maquetas físicas, representaciones matemáticas, analogías y simulaciones en computadoras. Aunque los modelos no se corresponden exactamente con el mundo real, son aproximaciones y suposiciones que limitan la gama de validez y capacidad de predicción, por lo que es importante que los estudiantes reconozcan sus limitaciones.

- Planear y desarrollar una investigación. Se deben diseñar investigaciones que generen datos que aporten pruebas para respaldar las afirmaciones que se hacen sobre los fenómenos. Pueden llevarse a cabo para describir un fenómeno o para probar una teoría o modelo. Es importante señalar cuál es el objetivo de una investigación. Los datos no son pruebas hasta que se usen en el proceso de apoyar una hipótesis.

- Analizar e interpretar datos. Una vez recogidos los datos, estos deberán ser representados de modo tal que puedan revelar algunos patrones y relaciones, ya que los datos en bruto tienen poco sentido. Por ello es importante organizar e interpretar los datos a través de la tabulación, la representación gráfica o el análisis estadístico. Así, los datos podrán ser utilizados como evidencia en las hipótesis planteadas.

- Utilizar las matemáticas y el pensamiento computacional. La matemática es una herramienta clave para la comprensión de la ciencia. Es útil para representar magnitudes físicas y sus relaciones, y para hacer predicciones cuantitativas. Las computadoras y herramientas digitales pueden mejorar el poder de las matemáticas mediante la automatización de los cálculos o el análisis de grandes conjuntos de datos disponibles para identificar patrones significativos.

- Construir explicaciones y diseñar soluciones. El objetivo de la ciencia es construir explicaciones y teorías de las causas de los fenómenos observados en el mundo. Una teoría es aceptada cuando tiene múltiples líneas de evidencia empírica y una mayor capacidad explicativa de los fenómenos que las teorías anteriores.

- Debatir y argumentar evidencias. El argumento (proceso basado en la evidencia) y el razonamiento conducen a explicaciones aceptables y son esenciales para identificar la mejor explicación de un fenómeno natural.

- Obtener, evaluar y comunicar información. Es necesario desarrollar en los estudiantes la capacidad para leer, interpretar y producir textos de dominio específico.

APÉNDICE 1

Ejemplo de una actividad para el cuarto, quinto y sexto año del colegio secundario, con la aplicación de las ideas centrales de la evolución, los conceptos transversales y las prácticas mencionados en el texto. Al final se incluye la resolución de cada ítem.

Ideas centrales que se aplican en esta actividad: Diversidad biológica, evolución, adaptación, filogenia, árbol filogenético, principio de simplicidad.

Conceptos transversales que se aplican en esta actividad: Patrones, sistemas, causa y efecto: ítems 1 y 5. Causa y efecto, estructura y función: ítem 7.

Prácticas que se aplican en esta actividad: Delimitar el problema y formular preguntas: ítem 1, ítem 8. Analizar e interpretar datos: ítem 3, ítem 1, ítem 6, ítem 8. Construir explicaciones y diseñar soluciones: ítem 1, ítem 7. Debatir evidencias: ítem 7, ítem 8. Evaluar información: ítem 1, ítem 4, ítem 5, ítem 7, ítem 8.

ACTIVIDAD

Conceptos que el alumno debe conocer antes del desarrollo del trabajo práctico: los grandes grupos vegetales: generalidades de musgos, helechos, gimnospermas, angiospermas. Función de ciertos órganos y estructuras: cutícula, tejido vascular, semilla, flor. Concepto de evolución, árbol filogenético, ancestro, adaptación, principio de simplicidad.

1) Construye un árbol filogenético con los siguientes elementos: bicicleta, patineta, automóvil, motoneta. Ubica en el árbol una sola vez (principio de simplicidad) las siguientes características (novedades evolutivas): techo, motor, ruedas, asiento. ¿Podrías haber construido otros árboles donde los medios de transporte se relacionen entre sí de distinta manera? En ese caso, ¿los caracteres se ubicarían una sola vez o más de una vez en esos árboles? ¿Los árboles tendrían más pasos, pues las novedades evolutivas aparecerían más de una vez en el árbol? ¿Por qué deberías seleccionar el árbol donde aparecen las novedades evolutivas una sola vez?

2) Recolecta plantas que incluyan: musgos, helechos, gimnospermas y angiospermas.

3) Separa las plantas recolectadas en los cuatro grupos, reconociendo sus características.

4) De acuerdo con tu criterio, ordena las siguientes novedades evolutivas, según su aparición cronológica, desde las más antiguas a las más modernas: presencia de flores, presencia de cutícula, presencia de semilla, presencia de tejido vascular.

5) Sobre la base de los ítems anteriores, construye el árbol filogenético que refleje la evolución de las plantas, utilizando los grupos y los caracteres de los ítems 2 y 3.

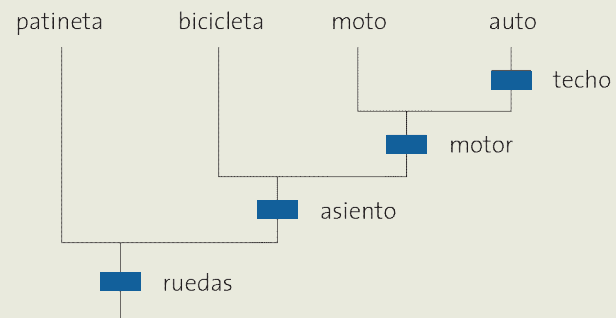
6) ¿Qué ventaja adaptativa les dio cada novedad evolutiva (cutícula, tejido vascular, semilla, flor) a los distintos grupos?

7) ¿Puedes explicar, de acuerdo con lo que contestaste en el ítem anterior, por qué los musgos son plantas pequeñas de lugares húmedos, mientras que los helechos son más grandes pero, generalmente, habitan también en lugares húmedos?

8) Recorriste un lugar inexplorado y encontraste:

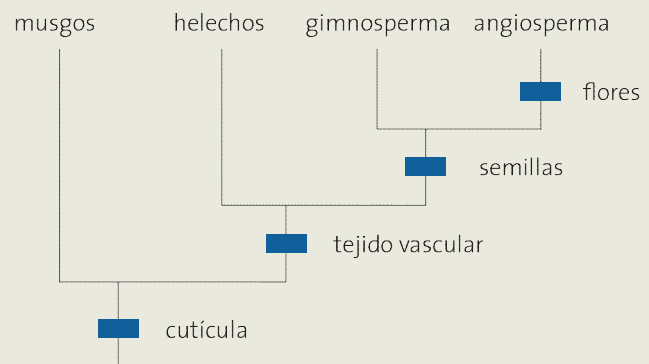
a) una nueva especie que tiene tejido vascular y se reproduce por esporas. ¿En qué grupo de tu árbol la ubicarías?

b) una nueva especie de planta acuática con flores que carece de cutícula. ¿En qué grupo de tu árbol la ubicarías y por qué?

RESOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD**Ítem 1:**

Sí, se podrían haber construido todas las combinaciones de relaciones entre los cuatro medios de transporte. En esos casos, algunos caracteres habrían aparecido independientemente más de una vez en los árboles. Pero esos árboles no se ajustarían al principio de simplicidad, ya que tendrían un mayor número de pasos (número de veces en que se ubican los caracteres en los árboles) que el que se muestra en la actividad (4 pasos).

Ítem 4: Cutícula, tejido vascular, semilla, flores.

Ítem 5:

Ítem 6: Cutícula: adaptación al ambiente terrestre; tejido vascular: circulación interna de sustancias por toda la planta; semilla: independencia del agua en la reproducción, protección del embrión; flor: mayor éxito reproductivo por atracción de polinizadores.

Ítem 7: Los musgos no pueden alcanzar mayor tamaño y habitan en lugares húmedos porque no tienen tejido vascular que lleve el agua a todas las partes de la planta. Si bien los helechos ya tienen tejido vascular y pueden incluso ser arborescentes, todavía necesitan del agua para su reproducción. Por ello, se encuentran comúnmente en lugares húmedos.

Ítem 8 a: Helechos.

Ítem 8 b: Angiospermas. Las plantas tienen adaptaciones a ambientes particulares y pueden perder en forma secundaria ciertas características que son típicas de todo ese grupo de plantas. En este caso, las plantas acuáticas, como no se desecan, generalmente carecen de cutícula.

NOTAS

1. Futuyma D.J. (2013). *Evolution*. Third Edition. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates.
2. "Achieve, Inc. on behalf of the twenty-six states and partners that collaborated on the NGSS" (2013). En *Next Generation Science Standards*. Recuperado de <http://nextgenscience.org/next-generation-science-standards>.
3. Novak J. D. (1998). *Learning, Creating, and Using Knowledge: Concept Maps as Facilitative Tools in Schools and Corporations*. Mahwah, Nueva Jersey: Lawrence Erlbaum Associates,
4. Crisci J. V., Katinas L., McInerney J. D., Apodaca M. J. (2014). "Taking biodiversity to school: Systematics, evolutionary biology, and the nature of science". *Systematic Botany* (39)3, 677-680.
5. Crisci, J. V. (1981). "La especie: realidad y conceptos". SYMPOSIA, VI Jornadas Argentinas de Zoología, La Plata, 21-32.
6. Crisci J. V. y Katinas L. (2009). "Darwin, historical biogeography and the need of overcoming binary opposites". *Journal of Biogeography* (36)6, 1027-1031.
7. Futuyma D. J., *op. cit.* supra, nota 1.
8. Wilson E. O., Carpenter M., Brown Jr. W. L. (1967). "The first Mesozoic ants". *Science* 157(3792), 1038-1040.
9. Darwin C. (1859). *On the Origin of Species: A Facsimile of the First Edition* (1976). Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
10. Katinas L., Crisci J. V. (2009). "Darwin y la biogeografía". *Ciencia Hoy* (19)113, 30-35.
11. Borges J. L. (1984). *Manual de Zoología Fantástica*. México: Fondo de Cultura Económica.

Agradecimientos:

Agradecemos a Julieta Tejeda las ilustraciones de este trabajo, y al Dr. Ángel R. Plastino por el honor de permitirnos publicar este trabajo en la revista que él dirige.

María José Apodaca es licenciada en Biología, docente de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de la Universidad Nacional de La Plata y becaria doctoral del CONICET.

Liliana Katinas es doctora en Ciencias Naturales, profesora de las Facultades de Ciencias Naturales y Museo y de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata e investigadora principal del CONICET.

Jorge V. Crisci es doctor en Ciencias Naturales, profesor emérito de la Universidad Nacional de La Plata, profesor de posgrado de la Universidad Nacional de Quilmes e investigador superior del CONICET (contratado).