



Analogías y enseñanza de la genética y la biología evolucionista

Analogies and Teaching of Genetics and Evolutionary Biology

Leonardo González Galli

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

Instituto de Investigaciones CeFIEC, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires,

Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

leomgalli@gmail.com

RESUMEN • En este trabajo se distinguen tres modos de tener en cuenta las analogías en la enseñanza de las ciencias naturales y se discuten algunas implicancias didácticas de la perspectiva, poco mencionada en el ámbito de la didáctica, según la cual algunas metáforas y analogías son una parte no eliminable de las teorías científicas. Tras esto, estos análisis de índole general se ponen en juego en una discusión sobre posibles aportes a la enseñanza de la genética y la biología evolucionista a partir del trabajo sobre la analogía informática, en el primer caso, para contribuir a un aprendizaje tendiente al cuestionamiento del determinismo genético, y sobre la analogía del diseño, en el segundo caso, para contribuir a la regulación metacognitiva del pensamiento teleológico.

PALABRAS CLAVE: Analogías; Metáforas; Enseñanza; Genética; Biología evolucionista.

ABSTRACT • This paper distinguishes three ways of taking analogies into account when teaching natural sciences and discusses some didactic implications of the perspective, rarely mentioned in the field of didactics, according to which some metaphors and analogies are a non-removable part of scientific theories. These general analyses are then brought into play in a discussion of possible contributions to the teaching of Genetics and Evolutionary Biology based on the work on the informatics analogy, in the first case, to contribute to a learning process that throw into questions genetic determinism, as well as on the analogy of design, in the second case, to contribute to the metacognitive regulation of teleological thinking.

KEYWORDS: Analogies; Metaphors; Teaching; Genetics; Evolutionary biology.

Recepción: enero 2022 • Aceptación: enero 2023 • Publicación: marzo 2023

González Galli, L. (2023). Analogías y enseñanza de la genética y la biología evolucionista.

Enseñanza de las Ciencias, 41(1), 63-78.

<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5615>

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de este artículo es presentar los fundamentos teóricos para el uso de las metáforas y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales, enfatizando algunos aspectos poco atendidos en la literatura ya existente sobre el tema. La potencial utilidad de estos fundamentos teóricos se ilustrará analizando algunos casos de analogías importantes para la genética y la biología evolucionista. Aunque no se presentarán actividades de aula concretas, se ofrecerán algunas sugerencias generales para el diseño de tales actividades.

El rol que las metáforas y analogías juegan en la construcción del conocimiento científico ha sido un tema controvertido. Sin embargo, el hecho de que en la ciencia se haya recurrido con frecuencia (por no decir siempre) a las analogías parece innegable. Esto último supone dos problemas epistemológicos: el primero se refiere a qué rol cumplen las analogías en la ciencia; el segundo, a si sería deseable o no que la ciencia prescindiera de ellas. Dado que la epistemología constituye una referencia central para la didáctica de las ciencias naturales (DCN) (Adúriz-Bravo, 2005), es esperable que la discusión epistemológica sobre el rol de las analogías en la ciencia tenga importantes implicancias para la DCN. Así como es un hecho innegable que en las ciencias naturales se utilizan profusamente las analogías, con independencia de lo que en el ámbito de la epistemología se piense al respecto, es igualmente innegable que en la docencia también las utilizamos profusamente, con independencia de lo que se piense al respecto en el ámbito de la DCN. Podría decirse, entonces, que la discusión más interesante no es si este recurso debe o puede utilizarse, sino cuáles serían los modos adecuados de utilizarlo para favorecer el aprendizaje.

El principal objetivo específico de este trabajo es analizar algunas implicancias didácticas de la tesis según la cual algunas metáforas y analogías, que, siguiendo a Palma (2015), llamaré *metáforas epistémicas*, son una parte *no eliminable* de las teorías científicas. Esto ha sido poco tenido en cuenta en el ámbito de la DCN, donde se tendió a considerar las analogías desde un punto de vista más bien instrumental. En este trabajo distinguiré tres modos de tener en cuenta las analogías en la enseñanza, e ilustraré dichos análisis con ejemplos de la enseñanza de la biología. En las secciones siguientes discutiré brevemente qué son las analogías, y abordaré sus aspectos psicológicos y epistemológicos. Allí concluiré que algunas analogías son una parte *no eliminable* de las teorías científicas y, al mismo tiempo, que el pensamiento analógico constituye un aspecto fundamental de la cognición humana. Luego exploraré las implicancias de esta conclusión para la discusión sobre el rol de las analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. En esa sección, distinguiré tres modos de tener en cuenta las analogías. Finalmente, intentaré mostrar cómo el trabajo sobre ciertas *metáforas epistémicas* de la genética y la biología evolucionista puede contribuir a una mirada crítica sobre el determinismo genético, en el primer caso, y a la regulación del pensamiento teleológico, en el segundo.

METÁFORAS Y ANALOGÍAS

Existen en la literatura diferentes distinciones entre «metáfora» y «analogía» (Gentner, 1999); pero, en general, la distinción se basa en que en la metáfora se comparan dos entidades de modo implícito, mientras que en la analogía dicha comparación es explícita (Aubusson y otros, 2006; Linares e Izquierdo Aymerich, 2006). En el ámbito de la DCN, Adúriz-Bravo (2005, p. 28) define *analogía* como «un recurso común del lenguaje y del pensamiento, que consiste en buscar semejanzas entre dos situaciones, una conocida y otra novedosa, con el fin de dar sentido a la última por medio de la primera». Los «escenarios» comparados están asociados a ciertos «campos semánticos», de modo que el «campo fuente» sirve de punto de partida conocido para facilitar la comprensión del «campo blanco». En general, hablaré de *analogías*, y solo utilizaré el término *metáfora* cuando esté citando o reseñando

la obra de alguna autora o autor que utilice dicho término, pero, en cualquier caso y a los fines de este trabajo, *metáfora* y *analogía* pueden considerarse sinónimos.

La psicología cognitiva ha puesto en evidencia que los razonamientos analógicos son una parte constitutiva y principal de la mente humana (Glucksberg, 1999; Hofstadter y Sander, 2018; Lakoff y Johnson, 2012; Pinker, 2007). Tal vez, el principal aspecto de la analogía que explica su rol central en el pensamiento es que permite la categorización. Es más, resulta difícil distinguir claramente ambos procesos (Hofstadter y Sander, op. cit.). Una vez construida una categoría, luego, mediante la analogía, extendemos esa categoría, de modo que ante una nueva situación nos permita identificar similitudes que nos ayudarán a lidiar adecuadamente con esa nueva situación. En la actualidad, existe un amplio consenso sobre este rol central del pensamiento analógico en la mente humana (Gentner, 1999).

En relación con lo epistemológico, en la ciencia siempre se ha recurrido a las analogías con diversos fines: retóricos, heurísticos y epistémicos o teóricos (Aubusson y otros, 2006; Bradie, 1999; Keller, 2000; Ruse, 1994; Thagard, 1995). Más allá de este reconocimiento, han existido diferentes posturas en relación con la legitimidad y conveniencia de la utilización de analogías (Hoffman, 1980; Palma, 2015). Las perspectivas en relación con esta cuestión dependen de cuestiones epistemológicas más generales tales como la concepción de teoría que se tenga. Simplificando, podemos decir que la filosofía de la ciencia clásica (el empirismo lógico y la concepción heredada) tendió, desde una perspectiva normativista, a condenar el uso epistémico de las metáforas. En el mejor de los casos, se reconocía el valor heurístico, estético o retórico de este recurso, pero se negaba que tuviera una relevancia propiamente teórica (Bradie, 1999; Hoffman, 1980). Desde este punto de vista, lo que se dice analógicamente podría, e idealmente *debería*, decirse de un modo literal (Bradie, 1999; Ortony, 1993; Palma, 2015).

Más tarde, la nueva filosofía de la ciencia puso en evidencia las limitaciones de la concepción heredada, y, en ese contexto, se puso en cuestión la pretensión de excepcionalidad epistémica de la ciencia. En un extremo relativista, la ciencia era un discurso sobre el mundo como cualquier otro, y dada la omnipresencia de las analogías en todas las formas del discurso humano, su presencia en la ciencia sería inevitable. Sin embargo, este reconocimiento de la inevitabilidad de las metáforas en la ciencia se utilizó, en cierta medida, para rebajar el estatus epistemológico de toda la ciencia. Así, muchas veces se reconoce la omnipresencia inevitable de las analogías en la ciencia, pero se sigue negando que dicho recurso tenga un rol epistémico específico y relevante y, menos aún, deseable (Palma, 2015).

Aquí adoptaré una tercera perspectiva, defendida por varios autores (Bradie, 1999; Palma, 2015; Ruse, 2008, 2003, 2000), que reconoce en las analogías una función epistémica central, inevitable e insustituible. En palabras de Palma (2015, p. 16): «las metáforas que utilizan los científicos dicen algo por sí, y no como meras subsidiarias de otras expresiones consideradas literales y, por tanto, tienen una función cognoscitiva y epistémica legítima y, sobre todo, insustituible». Más específicamente, desde la denominada «teoría cognitiva de la ciencia», desarrollada por Ronald Giere (véase Adúriz-Bravo y Ariza, 2014; Giere, 1999a, 1999b, 1992; Izquierdo Aymerich y Adúriz-Bravo, 2021), el rol de las analogías resulta aún más central. Esta teoría forma parte de la llamada «concepción semántica» de las teorías científicas (Díez y Moulines, 2008), que considera que lo principal de una teoría científica es qué dice sobre el mundo, y no tanto cómo lo dice. Los principales componentes de una teoría son, desde este enfoque, los modelos que la conforman (Giere, 1992). Desde el semanticismo (en la versión de Giere, al menos), los modelos se entienden como objetos abstractos que guardan una relación de *semejanza, analógica*, con los sistemas reales que representan. Es decir, el modelo *es como* el sistema real que representa *en ciertos aspectos y grados*. De hecho, podemos considerar que los modelos científicos no son más que un tipo especial de analogías (Palma, 2007). Por lo tanto, desde esta perspectiva epistemológica, la analogía resulta ser un aspecto fundamental de la ciencia. Así, resultará evidente que una de las principales herramientas cognitivas con las que en las ciencias se construyen modelos es el razonamiento analógico (Nersessian, 1992; Schuster, 2005). En síntesis, el razonamiento analógico

constituye uno de los procesos cognitivos más importantes con los que las científicas y los científicos construyen el conocimiento y, además, los productos de ese proceso, los modelos científicos, tienen una naturaleza intrínsecamente analógica.

Aquí adoptaré esta última perspectiva, y asumiré, además, que, tal como señalan autores como Palma (2015), las teorías científicas en general, de hecho, implican analogías con funciones epistémicas no eliminables, *metáforas epistémicas*, y exploraré algunas de las implicancias de esta perspectiva para la enseñanza en el caso de biología.

ANALOGÍAS EN LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS NATURALES

En la DCN se ha discutido la conveniencia, las ventajas y las desventajas de utilizar las analogías en la enseñanza (Linares e Izquierdo Aymerich, 2006; Oliva, 2004; Taylor y Desbury, 2018; Venville y Treagust, 1997). Por ejemplo, se ha sugerido que pueden facilitar los procesos de cambio conceptual, pero también que pueden generar aprendizajes erróneos. Sin embargo, esta discusión está en gran medida ligada a las discusiones epistemológicas y psicológicas esbozadas en los apartados anteriores. Si la ciencia implica la existencia de analogías en un sentido epistémico fuerte (son parte de las propias teorías), y si el pensamiento consiste en buena parte en razonamientos analógicos, entonces la pretensión de evitarlas en la enseñanza carecería de fundamentos. Uno de los pilares de la DCN de orientación constructivista es que los conocimientos ya presentes condicionan fuertemente el proceso de aprendizaje. En gran medida, esa interacción entre lo ya sabido y el nuevo conocimiento consiste en un proceso de evidente naturaleza analógica (González Labra, 1997; Hofstadter y Sander, 2018). Más allá de estos análisis, la investigación muestra que, de hecho, en la docencia utilizamos profusamente las analogías, y esto vale incluso para quienes tienen una baja estima por este recurso (Dagher, 1995; Linares e Izquierdo Aymerich, 2006). Es por eso por lo que actualmente la discusión se centra en cómo utilizar adecuadamente las analogías, más que en si deben o no ser utilizadas (Aubusson y otros, 2006; Brown y Clement, 1989; Clement, 1993; Clement y Rea-Ramirez, 2008; Galagovsky y Adúriz-Bravo, 2001; González Labra, 1997; Linares e Izquierdo Aymerich, 2006; Oliva, 2004; Oliva y otros, 2001; Oliva Martínez y Aragón-Méndez, 2009).

La literatura sobre el uso didáctico de las analogías ofrece diversas sugerencias prácticas (Brown y Clement, 1989; González Labra, 1997; Linares e Izquierdo Aymerich, 2006). Mencionaré solo dos que luego recuperaré en la discusión de los casos particulares a analizar. La primera de estas sugerencias consiste en favorecer la discusión explícita acerca de cuál de entre varias analogías específicas es más adecuada en relación con ciertos aspectos del modelo científico estudiado (De Vecchi y Giordan, 2006). La segunda se refiere a la utilidad de identificar los componentes específicos de las entidades comparadas y analizar cuáles tienen (o no) su equivalente en el otro campo semántico (González Labra, 1997). Esto permite hablar de los *alcances* de la analogía (aquellos componentes del campo blanco que tienen sus equivalentes en el campo fuente) y de sus *limitaciones* (aquellos componentes del campo blanco que no tienen sus equivalentes en el campo fuente) (Galagovsky y Adúriz-Bravo, 2001). Ambas estrategias sirven para facilitar la explicitación de las concepciones de las y los estudiantes y para prevenir el establecimiento de relaciones espurias entre ambos campos semánticos.

Para finalizar esta sección, diferenciaré tres modos (no excluyentes) en los que se pueden tener en cuenta las analogías en la enseñanza. El primer modo (modo 1), el más usual, consiste en utilizar una analogía meramente como un medio para facilitar el aprendizaje de un modelo. El segundo (modo 2) trata de introducir en la enseñanza el tópico metacientífico del rol histórico o psicológico de las analogías en la construcción del conocimiento científico. Es importante notar que se pueden utilizar analogías de acuerdo con los modos 1 y 2 sin asumir que las analogías analizadas son parte intrínseca

de alguna teoría científica. El tercero (modo 3), rara vez considerado, consiste en analizar una analogía en cuanto que parte no eliminable de una teoría que se va a enseñar, es decir, en cuanto que *metáfora epistémica* (Palma, 2015). Si la analogía A1 es parte de la teoría T1, esta propuesta supone la necesidad de analizar este hecho explícitamente con las y los estudiantes. Dado que el modo 1 es el más frecuentemente utilizado y analizado, agregaré algunos comentarios sobre los modos 2 y 3.

De acuerdo con el modo 2, se podría analizar con las y los estudiantes el rol que una analogía jugó en el desarrollo de una teoría (véase, por ejemplo, Noguera Solano, 2013 y Sterrett, 2002, para el caso de la analogía entre selección artificial y selección natural en Darwin). Estos análisis tienen un gran potencial para una buena enseñanza de la *naturaleza de la ciencia* (Adúriz-Bravo, 2005) por dos razones. En primer lugar, las metáforas son un vehículo privilegiado mediante el cual la cultura general, y, por lo tanto, los llamados «valores no epistémicos», influyen en la actividad científica, cuestionando así la imagen de ciencia ahistórica y neutral. En segundo lugar, la discusión sobre el razonamiento analógico da pistas sobre lo que se ha llamado el «contexto de descubrimiento», sobre cómo en la ciencia se crean nuevas hipótesis (Nersessian, 1992; Schuster, 2005). Estos aspectos contextuales y creativos del proceso científico son poco atendidos en la educación en comparación, por ejemplo, con el rol de la experimentación. Así, el recurso a las analogías en el sentido del modo 2 podría contribuir a cuestionar ciertas «visiones deformadas» de la ciencia (Fernández et al., 2002).

En relación con el modo 3, si una teoría que se va a enseñar implica una *metáfora epistémica*, entonces ese hecho también debería ser objeto de enseñanza. Las y los estudiantes deberían comprender que pensar y explicar fenómenos con cierta teoría implica *necesariamente* pensar con cierta analogía. Nótese que, aunque los modos 2 y 3 están muy relacionados, no son lo mismo: se podría enseñar qué rol jugó una analogía en la creación de una teoría, pero asumir que la teoría, en cuanto que producto, no implica la analogía en cuestión, ya que esta ha cumplido un papel de mero andamiaje temporal durante el proceso creativo. Inversamente, de acuerdo con el modo 3, uno podría analizar una teoría, mostrando cómo pensar con esa teoría implica *necesariamente* echar mano de cierta analogía, sin hacer referencia al proceso histórico de creación de dicha teoría.

A continuación, ilustraré estos análisis proponiendo algunas formas posibles de tener en cuenta las *metáforas epistémicas* en la enseñanza de algunos contenidos centrales de la biología, señalando en cada caso cuál de los tres modos antes mencionados está en juego.

ANALOGÍAS Y ENSEÑANZA DE LA BIOLOGÍA

En el caso de la enseñanza de la biología se han llevado a cabo reflexiones de índole general sobre el uso de analogías (Venville y Treagust, 1997) y algunas en relación con la enseñanza de ciertos contenidos particulares (González Galli, 2016; González Labra, 1997). Tal vez, el tópico más explorado sea el rol de las analogías en la biología evolucionista (Archibald, 2014; Evans, 1984; Gildenhuys, 2004; González Galli, 2019, 2016; Shelley, 1999; Theunissen, 2012) y las implicancias educativas de tales análisis (Pramling, 2008). En las siguientes secciones exploraré dos *metáforas epistémicas* específicas y discutiré las potenciales contribuciones de su análisis en relación con algunos problemas centrales de la enseñanza de ciertos contenidos centrales de biología y con la *naturaleza de la ciencia*.

Analogías para cuestionar el determinismo genético

Las ideas de sentido común sobre los genes suelen implicar alguna forma de determinismo genético según el cual el fenotipo de un organismo se debe totalmente a su constitución genética (Dar-Nimrod y Heine, 2011; Puig y Jiménez Aleixandre, 2015). Esta idea es, en primer lugar, científicamente insostenible (Dawkins, 2017), ya que el fenotipo resulta siempre de una compleja interacción entre

genes y entorno. En segundo lugar, se trata de una idea que tiene implicancias ideológicas negativas, ya que, por ejemplo, puede ser utilizada para apuntalar ideas eugenésicas. Por estas razones, uno de los principales objetivos de la enseñanza sería dar a las y los estudiantes las herramientas conceptuales necesarias para analizar críticamente el discurso del determinismo genético (Ageitos y Puig, 2021; Castéra y Clément, 2012; Jiménez Aleixandre, 2012; Puig y Jiménez Aleixandre, 2015). Para tal fin deberíamos enseñar adecuadamente los modelos de la biología pertinentes y, además, provocar una revisión explícita del discurso determinista recurriendo a dichos modelos. A continuación, propondré que el análisis de ciertas analogías sobre el rol de los genes en el desarrollo de los organismos puede contribuir a estos objetivos.

Partiré de asumir que la analogía informática (tal vez sería más correcto hablar de una «familia de analogías informáticas», ya que, según el contexto, se habla del genotipo como plano, como programa, como código, etc.) constituye una parte constitutiva (una *metáfora epistémica*) de los modelos de la genética. Este hecho se evidencia en la terminología estándar utilizada en esta ciencia («traducción», «transcripción», «programa», «código», etc.). Por ejemplo, Dawkins (2005, p. 132) afirma que «El ADN lleva información de un modo muy semejante al de un ordenador, y también podemos medir la capacidad del genoma en bits (...)». Por supuesto, quienes tienden a negar un valor epistémico a las analogías cuestionan este uso que en genética se hace del lenguaje informático (Mahner y Bunge, 2000). En cualquier caso, desde una epistemología naturalista (no normativista) asumiré que la analogía informática es, de hecho, una parte importante de la genética como ciencia (Keller, 2002, 2000).

La pregunta central en relación con este tema es qué rol cumplen los genes en el proceso de desarrollo del organismo, ya que la comprensión de las respuestas que la biología ofrece es una condición necesaria para comprender el carácter falaz del determinismo genético. Y dichas respuestas están plagadas de terminología informática. Según Keller (2000), fueron James Watson y Francis Crick quienes introdujeron esta analogía en su artículo clásico de 1953. La noción de «programa genético» habría sido introducida en la biología molecular por Francis Jacob y Jaques Monod en 1961 (Keller, 2002). Los actuales textos de biología sugieren que, de algún modo, el ADN contenido en la cigota contiene la *información* necesaria para construir el organismo. Sin embargo, y contra el determinismo genético, esta información solo resulta útil en cierto entorno. La biología de las últimas décadas ha tendido a enfatizar la importancia de la regulación de la actividad génica, y esos mecanismos de regulación (AA. VV., 2015) dependen en última instancia del entorno (entendido como todo aquello que no es el ADN). Así, el desarrollo es producto de la interacción entre la información genética y la influencia ambiental, que, al menos en parte, también podría concebirse en términos informáticos. Así, la información para el desarrollo estaría *distribuida* entre el ADN y el ambiente.

Pero esta perspectiva no debe hacernos olvidar que los genes sí influyen en el fenotipo (el determinismo ambiental es tan falso como el genético), lo que nos lleva de nuevo a la pregunta en relación con cómo ejercen dicha influencia, y lo dicho anteriormente sugiere como respuesta que lo hacen aportando *parte de* la información necesaria para el desarrollo. Podemos pensar esta primera respuesta como basada en una familia de analogías asociadas a la noción de información. A continuación, analizaré (siguiendo en parte a Dawkins, 2009) algunas de las analogías que forman parte de esta «familia» de analogías informáticas, centrándome en la comparación entre las analogías del genoma como un plano y el genoma como una receta.

¿Es el plano una buena analogía para comprender el rol que el genotipo juega en el desarrollo? La respuesta es negativa por varias razones. Lo más importante es que, entre un plano y el objeto que se va a construir, existe una relación de *isomorfismo*. Por ejemplo, el plano de un edificio cuya planta tiene una sección circular incluirá la representación gráfica de un círculo. Esto supone una relación de reversibilidad: podemos construir el objeto utilizando el plano, pero también podemos reconstruir el plano observando el objeto. En el caso del ADN y el fenotipo, la ausencia de isomorfismo y reversibilidad

resultan evidentes. La relación entre un plano y el objeto para cuya construcción dicho plano aporta información es mucho más rígida que la relación, extremadamente compleja y flexible y modulada por el ambiente, que existe entre el genotipo y el fenotipo. Así, el análisis de esta limitación de la analogía del plano ayuda a explicitar que el ADN no contiene *toda* la información necesaria para el desarrollo, lo que, a su vez, ayuda a evidenciar las falencias del determinismo genético.

¿Qué sucede con la analogía del genotipo como receta o programa informático? Estas analogías ayudan a poner en evidencia el carácter *inerte* del ADN, una idea fundamental para cuestionar el determinismo. La cuestión del carácter químicamente inerte del ADN es importante porque las ideas de sentido común sobre el rol de los genes suelen corresponderse con lo que Keller (2000) ha denominado el «discurso de acción de los genes». Este discurso se basa en otra analogía según la cual los genes *son como* agentes (Keller, 2002). Según Keller (2002), esto supone atribuir a los genes: 1) materialidad (en forma de partículas) y permanencia, 2) agencia (capacidad de acción), 3) reproducción (una capacidad que otorga «vitalidad» al gen) y 4) capacidad de dirección y control del desarrollo. Así, las personas suelen creer que, de algún modo, los genes *nos hacen ser* como somos. Por el contrario, de acuerdo con el modelo científico, el ADN es un tipo de sustancia especialmente inerte. Sin embargo, y por supuesto, influye en el desarrollo.

Aquí es donde la analogía informática de genotipo como receta entra en juego sugiriendo una respuesta clara y sencilla a la pregunta «¿qué hacen los genes?»: lo único que hacen es aportar información que otras entidades (las enzimas, por ejemplo), esta vez sí con capacidad de acción, utilizarán para realizar el trabajo de construcción orgánica. Consideremos las implicancias de las siguientes observaciones básicas en relación con la analogía del genotipo como una receta culinaria: a) las recetas no hacen pasteles, solo aportan información que alguien utiliza para hacerlos, y b) las recetas influyen en el producto final (el pastel), pero no lo determinan porque existen muchos otros factores ajenos a la propia receta (tales como la temperatura del horno) que influyen significativamente en el resultado final. Así, las recetas, como los genes, no construyen por sí mismas el producto final, pero influyen en –no determinan– las características de dicho producto. En ambos casos, la influencia se ejerce indirectamente, aportando información a un proceso de construcción ejecutado por otros agentes y sensible a los factores ambientales.

Un posible modo para trabajar en el aula a partir de la analogía entre el genotipo y las recetas culinarias consiste en, en una primera instancia, trabajar a partir de preguntas sobre el rol de los genes en el desarrollo para hacer explícitas las ideas intuitivas deterministas. Tras ello, se les propondría reflexionar a partir de preguntas sobre el rol de las recetas en el proceso de producción de un pastel. En una tercera instancia, se les sugeriría explicitar la analogía con preguntas tales como «¿Qué sería, en la genética, el equivalente a la receta de cocina?», «¿Qué sería equivalente a las variaciones en la temperatura del horno y sus efectos en el pastel?», etc. La discusión de este tipo de preguntas permitiría expresar los *alcances* y las *limitaciones* de la analogía. Luego, en una cuarta instancia de naturaleza metacognitiva, se les podría proponer comparar sus respuestas con las preguntas planteadas en la primera y segunda instancias de trabajo. En este momento, las y los estudiantes podrían tomar consciencia de que en el caso del desarrollo de los organismos produjeron explicaciones unicasuales deterministas (basadas solo en la influencia de los genes), mientras que en el caso de la cocina fueron capaces de tomar en cuenta dos grandes conjuntos de factores causales (la receta y «todo lo demás»). Para explicitar el carácter inerte de los genes se puede preguntar al estudiantado «Si los genes –como la receta– no hacen el trabajo, ¿quién o qué lo hace?», cuestión que permitirá introducir la importancia del complejo sistema molecular que «lee» el ADN (Keller, 2002). Esta última cuestión podría abordarse introduciendo nociones de epigenética (Zudaire y Freile, 2021), pero lo central, más en general, es la idea de que el ambiente también influye en el desarrollo.

Aunque tanto la comparación entre el genotipo con un programa informático (que, por razones de espacio, no desarrollaré aquí) como con una receta culinaria pueden ser de utilidad, sugiero que esta última analogía es más adecuada debido a que comprender en qué consiste un programa informático puede resultar difícil para las y los estudiantes, y uno de los supuestos del uso didáctico de las analogías es que el «campo fuente» sea familiar y comprensible para quien aprende. En este sentido, considero que la analogía con la receta culinaria es más adecuada.

Los análisis y las discusiones precedentes se corresponderían principalmente con el modo 1 de tener en cuenta las analogías. Luego, además, podríamos discutir en las clases cómo, por qué, con qué intenciones y consecuencias, las investigadoras e investigadores introdujeron y adoptaron la analogía informática en la genética (modo 2). Finalmente, podríamos analizar con el estudiantado que la analogía informática constituye una *metáfora epistémica*, es decir, una parte no eliminable de la actual teoría genética, por ejemplo, analizando explícitamente la naturaleza informática del lenguaje técnico estándar, que por su ubicuidad (aún en los textos más técnicos) se interpreta aquí como la expresión del modelo y no como un mero recurso retórico (modo 3). Mientras que el modo 1 contribuiría a aprender en qué consisten los modelos de la genética, los modos 2 y 3 ayudarían, además, a aprender aspectos de naturaleza de la ciencia.

Analogías para regular el pensamiento teleológico

En la filosofía de la biología existe un debate sobre la naturaleza de las explicaciones basadas en el *modelo de evolución por selección natural* (MESN) (Allen y Neal, 2020; Caponi, 2003). El desarrollo de las filosofías de las ciencias específicas llevó a comprender que cada ciencia tiene aspectos idiosincráticos (Adúriz-Bravo y Erduran, 2003), y esto permitió pensar que existe una diversidad de estilos explicativos.

En relación con esta cuestión, existe otro debate sobre el rol y la legitimidad de las explicaciones teleológicas en biología. Desde la revolución científica se cuestionó la validez de las explicaciones teleológicas (Allen y otros, 1998; Díez y Moulines, 2008; Estany, 1993). Sin embargo, este tipo de explicaciones persistieron en la biología, ligadas sobre todo a las nociones de adaptación y función (Allen y otros, 1998; McLaughlin, 2003; Rosenberg y McShea, 2008). Así, al mismo tiempo que las biólogas y los biólogos, así como las y los docentes, en general niegan la validez de las explicaciones teleológicas (e insisten en que «no se dice *para*»), no dejan de utilizar expresiones y explicaciones teleológicas en sus discursos (Jacob, 1986; Mahner y Bunge, 2000). Esta situación ambigua dio lugar a un complejo debate sobre el rol y legitimidad de este tipo de explicaciones (véase Ayala, 1970; Allen y Neal, 2020; Allen et al., 1998; McLaughlin, 2003).

En este contexto, diversos análisis convergen en la conclusión según la cual el MESN implica *cierta forma de teleología científicamente legítima* (Ayala, 1970; Brandon, 1981; Caponi, 2003; Dennett, 1995; Depew, 2008; Lennox, 1993; Ruse, 2008, 2003, 2000; Short, 2002; Sober, 1996 y Walsh, 2000). Considero especialmente útil, a los fines didácticos y en relación con el tema central de este artículo, la propuesta de Ruse (2008, 2003, 2000), quien sugiere que la biología retiene cierta forma de teleología porque las explicaciones de los rasgos adaptativos basadas en el MESN implican *necesariamente* el recurso a la metáfora del diseño. Así, para Ruse, la metáfora del diseño sería una *metáfora epistémica*. De acuerdo con este autor, para construir una explicación basada en el MESN que dé cuenta de la evolución de un rasgo primero debemos observar dicho rasgo *como si* fuera producto del diseño deliberado y preguntarnos qué utilidad tiene, qué problema resuelve mejor que las versiones alternativas del rasgo. Todas estas preguntas tienen evidentes connotaciones teleológicas. Así, aunque las versiones más técnicas de la explicación no incluyan términos teleológicos, solo es posible construir dichas explicaciones porque antes se analizó el organismo *como si* fuera un producto de diseño.

Por otro lado, la investigación muestra que las y los estudiantes tienen concepciones teleológicas sobre el dominio biológico fuertemente resistentes al cambio (González Galli y Meinardi, 2015, 2011; Kampourakis, 2014; Settlage, 1994). En la mayor parte de la literatura se ha supuesto que dichas concepciones son erróneas, sin matices, porque se asumió el rechazo a toda forma de teleología establecido por la filosofía de la ciencia clásica. Esto, a su vez, llevó en la enseñanza a plantear el objetivo de eliminar las concepciones teleológicas y censurar sus expresiones. Sin embargo, este enfoque ha sido cuestionado en los últimos años por dos razones principales (González Galli, Pérez y Gómez Galindo, 2020). En primer lugar, desde el punto de vista psicológico, los razonamientos teleológicos son una parte central, funcional y constitutiva de la cognición humana (Kelemen, 2012). En segundo lugar, desde una perspectiva epistemológica –y por las razones expuestas en los párrafos precedentes–, no es cierto que los razonamientos teleológicos no cumplan un rol importante y legítimo en la biología actual.

Por supuesto, muchas ideas del alumnado son erróneas, *además de* teleológicas. Pero el reconocimiento de que el propio MESN es, en algún sentido, teleológico obliga a distinguir diversas formas de teleología y a preguntarnos cuáles son compatibles con el modelo científico y cuáles no. Este análisis ha llevado a proponer que el pensamiento teleológico funciona como un obstáculo epistemológico (González Galli y Meinardi, 2011) y que el principal objetivo didáctico sería el desarrollo por parte de las y los estudiantes de una «vigilancia metacognitiva» sobre dicho modo de pensar (González Galli, Pérez y Gómez Galindo, 2020). Esta capacidad consiste en saber qué es un razonamiento teleológico, en poder reconocer sus múltiples y diversas expresiones, y en saber evaluar en qué casos es adecuado recurrir a dicho razonamiento. Con respecto a esto último, la o el estudiante debería ser capaz de evaluar la adecuación de cada expresión teleológica en relación con la consistencia con el MESN.

Para ayudar al conjunto de los alumnos a autorregular sus intuiciones teleológicas, se puede realizar un trabajo que incluya los siguientes momentos: 1) una explicitación de las concepciones teleológicas (a partir, por ejemplo, de una pregunta sobre el origen de alguna adaptación, del tipo: «¿Cómo podrían explicar el origen del notable parecido entre la coloración de un saltamontes y el del entorno en el que vive?»); 2) un trabajo explícito sobre la teleología (para este objetivo se puede ofrecer al estudiantado una definición sencilla y algunos ejemplos claros); 3) la identificación en sus respuestas a las primeras preguntas de expresiones teleológicas (para tal fin, deberían utilizar las ideas consensuadas en el segundo momento); y 4) una discusión de la «corrección científica» de sus ideas teleológicas (aquí se trata de pedirles explícitamente que analicen en qué medida esas ideas son o no compatibles con el MESN). Los momentos 3 y 4 son de naturaleza metacognitiva, y es ese tipo de trabajo didáctico el que puede favorecer una autorregulación del obstáculo epistemológico que facilite un buen aprendizaje del modelo científico (Astolfi y Peterfalvi, 2001; González Galli, Pérez y Gómez Galindo, 2020). Ahora bien, ¿cómo entra en juego en este esquema de trabajo el recurso a la metáfora del diseño? La propuesta es que, en algún momento, se puede introducir la idea de que cuando pensamos sobre los seres vivos tendemos a producir explicaciones teleológicas porque, intuitivamente y de un modo no consciente, pensamos en los organismos y sus partes *como si* fueran objetos de diseño, *como si* fueran artefactos producto del diseño humano. En otros trabajos (González Galli, 2019, 2016), hemos sugerido que la explicitación de este aspecto de nuestra cognición podría ayudar a las y los estudiantes a tomar conciencia de sus sesgos teleológicos, lo que, a su vez, contribuiría al desarrollo de la mencionada «vigilancia metacognitiva». La principal razón por la que esta toma de conciencia podría ayudar a un buen aprendizaje del MESN es que el *campo fuente* de la analogía (el diseñador y sus obras) implica un componente intencional ausente en el *campo blanco*, lo que obliga a analizar el modelo científico para pensar cómo es que tanto el proceso de diseño como la selección natural producen entidades complejas y funcionales, aunque este último proceso carezca de todo componente intencional.

Es importante destacar que, contra las propuestas que tienden a censurar el lenguaje y el pensamiento teleológicos en el aula, el tipo de trabajo didáctico propuesto implica fomentar su uso y explicitación (González Galli, 2019; González Galli, Ginnobili, Ariza, 2022; González Galli, Pérez y Gómez Galindo, 2020). Esta estrategia supone el riesgo de que se concluya, erróneamente, que «no hay ningún problema con la teleología». Sin embargo, el desarrollo de la «vigilancia metacognitiva» incluye la evaluación crítica –basada en los modelos científicos– de qué formas de teleología son científicamente aceptables y cuáles no lo son. Específicamente, en relación con la teoría de la evolución, las y los estudiantes deberían comprender claramente que –contra lo que muchas personas creen– las mutaciones no se producen preferentemente en sentido adaptativo, que el proceso evolutivo como un todo no está dirigido a ciertos fines predeterminados, y que los procesos evolutivos no están guiados por ninguna forma de intencionalidad (para analizar este último punto es útil abordar la analogía entre la selección natural y la selección artificial, ya que en este último caso el proceso de cambio sí es orientado por la intención humana) (véase González Galli, 2019, 2016; González Galli, Pérez y Gómez Galindo, 2020). Así, por ejemplo, el estudiantado debería comprender que la expresión «las bacterias mutaron para resistir al antibiótico» es teleológica y, además, incorrecta por ser incompatible con el modelo científico (en este caso el MESN). Por el contrario, debería comprender que la expresión «Los osos polares son blancos porque el color blanco sirve para camuflarse en un ambiente nevado» es tan teleológica como la anterior, pero, a diferencia de aquella, podría ser correcta (por ser compatible con el MESN). En general, podrían considerarse aceptables aquellas expresiones teleológicas que se refieran a las razones por las cuales cierta variante de un rasgo fue seleccionada. Estas cuestiones deben ser explícitamente abordadas en las clases para prevenir confusiones acerca del rol de la teleología en la biología.

Estos análisis serían un ejemplo del modo 1 de tener en cuenta la metáfora del diseño en la enseñanza de la biología evolucionista. Con respecto a los otros modos de considerar esta analogía, por ejemplo, el análisis de los textos de Darwin permitiría además discutir el rol que esta analogía ha jugado en la historia de la biología, lo que contribuiría a enriquecer la imagen de la ciencia (modo 2) (véanse Ginnobili, González Galli y Ariza, 2021; González Galli, 2014). Finalmente, se podría discutir con el alumnado el hecho de que la analogía del diseño no constituye solo un recurso al que Darwin (y las biólogas y biólogos desde entonces) echó mano en el proceso de creación científica, o de comunicación de la teoría, sino que dicha analogía forma parte de la teoría, es decir, la metáfora del diseño de la que habla Ruse (2000) constituye lo que Palma (2015) denomina una *metáfora epistémica*: aún en la biología actual, no se puede utilizar la teoría sin recurrir (en general de un modo implícito) a dicha analogía (modo 3). Al igual que en el caso de la genética, estos análisis contribuirían tanto al aprendizaje de un modelo científico como de aspectos de naturaleza de la ciencia.

CONCLUSIONES

En este trabajo partí de la perspectiva epistemológica según la cual las analogías son parte intrínseca de la ciencia. Esta conclusión (junto con algunas consideraciones psicológicas) basta para afirmar que la enseñanza de las ciencias naturales no puede pretender evitar completamente el recurso a las analogías. Quise mostrar también que un análisis más detallado del rol de las analogías en la ciencia puede darnos pistas más específicas acerca de cómo tener en cuenta esta cuestión en la enseñanza. Luego distinguí tres modos de tener en cuenta las metáforas y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. En la literatura sobre DCN suele mencionarse la utilidad de las analogías como recurso didáctico para un mejor aprendizaje de los modelos científicos (modo 1). Pero esto es aún compatible con una mirada epistemológica totalmente adversa en relación con las analogías: el recurso a la analogía podría ser simplemente una herramienta para, finalmente, alcanzar un ideal de conocimiento literal, con lo que las analogías quedan como un mero andamiaje temporal. Sin embargo, el creciente reconocimiento

del rol de las analogías en las ciencias ha llevado a que en la DCN se valore también el análisis de dicho rol en la ciencia, por ejemplo, como un elemento central en relación con los aspectos creativos de la ciencia o en relación con los modos en los que la cultura general influye en la ciencia (modo 2). Luego he defendido la perspectiva según la cual algunas analogías o metáforas (*metáforas epistémicas*) constituyen una parte no eliminable de los propios modelos científicos. De esto último se infiere otra implicancia importante para la didáctica: aprender una teoría supone aprender también qué analogías la integran y qué rol cumplen en los análisis y explicaciones derivados de la teoría en cuestión (modo 3). Finalmente, ilustré de qué modo estos análisis pueden contribuir a la enseñanza, e indiqué cómo tener presente la analogía informática puede ayudar a repensar la enseñanza de la genética para tender a una mirada crítica sobre el determinismo genético, así como la manera en que tener presente la analogía del diseño puede contribuir a una mejor enseñanza de la biología evolucionista en relación con el problema de la teleología. Aunque en este artículo, por cuestiones de espacio, no se profundizó en este aspecto, quisiera destacar el valor de estas propuestas en relación con los aprendizajes sobre la naturaleza de la ciencia, al destacar que las analogías son centrales en la ciencia como proceso y como producto, al ayudar a comprender cómo se crean nuevas hipótesis científicas (¿mediante un proceso cognitivo que todas las personas utilizamos habitualmente!) y, finalmente, al mostrar cómo la cultura en general influye en la ciencia (ofreciendo ciertos «campos fuente» que, mediante las analogías, influyen en la creación de nuevas hipótesis científicas).

La experiencia y algunas de las investigaciones citadas aportan señales alentadoras en relación con las propuestas que aquí ofrezco. Sin embargo, se necesitan análisis epistemológicos detallados que ayuden a dilucidar el rol que ciertas analogías juegan en teorías específicas, así como estudios empíricos para evaluar los resultados de la implementación de actividades basadas en este marco teórico. Espero que este texto aporte algunos elementos útiles a la discusión y contribuya a motivar nuevas investigaciones.

REFERENCIAS

- AA. VV. (2015). Epigenética. La herencia más allá de los genes. *Investigación y Ciencias*, 81.
- Adúriz-Bravo, A. (2005). *Una introducción a la naturaleza de la ciencia*. Fondo de Cultura Económica.
- Adúriz-Bravo, A. y Ariza, Y. (2014). Una caracterización semanticista de los modelos científicos para la ciencia escolar. *Bio-grafía. Escritos sobre la Biología y su Enseñanza*, 7(13), 25-34.
<https://doi.org/10.17227/120271034.vol.7num.13bio-grafia25.34>
- Adúriz-Bravo, A. y Erduran, S. (2003). La epistemología específica de la Biología como disciplina emergente y su posible contribución a la didáctica de la Biología. *Revista de Educación en Biología*, 6(1), 9-14.
- Ageitos, N. y Puig, B. (2021). Análisis del determinismo en una tarea de Genética sobre una enfermedad animal. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 39(1), 33-50.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3315>
- Allen, C. y Neal, J. (2020). Teleological Notions in Biology. En E. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2020 Edition)* (página web). Recuperado el 6 de enero de 2022 de <https://plato.stanford.edu/archives/spr2020/entries/teleology-biology/>
- Allen, C., Bekoff, M. y Lauder, G. (Eds.). (1998). *Nature's purposes. Analyses of Function and Design in Biology*. MIT Press.
- Archibald, D. (2014). *Aristotle's ladder, Darwin's tree. The evolution of visual metaphors for biological order*. Columbia University Press.

- Astolfi, J. y Peterfalvi, B. (2001). Estrategias para trabajar los obstáculos: dispositivos y resortes. En A. Camilloni (Ed.), *Los obstáculos epistemológicos en la enseñanza* (pp. 191-223). Gedisa.
- Aubusson, P., Harrison, A. y Ritchie, S. (2006). *Metaphor and analogy in science education*. Springer.
- Ayala, F. (1970). Teleological explanations in evolutionary biology. *Philosophy of Sciences*, 37(1), 1-15.
- Bradie, M. (1999). Science and metaphor. *Biology and Philosophy*, 14(2), 159-166.
<https://doi.org/10.1023/A:1006601214943>
- Brandon, R. (1981). Biological teleology: Questions and explications. *Studies in History and Philosophy of Science*, 12(2), 91-105. [https://doi.org/10.1016/0039-3681\(81\)90015-7](https://doi.org/10.1016/0039-3681(81)90015-7)
- Brown, D. y Clement, J. (1989). Overcoming misconceptions via analogical reasoning: abstract transfer versus explanatory model construction. *Instructional Science*, 18(4), 237-261.
<https://doi.org/10.1007/BF00118013>
- Caponi, G. (2003). Darwin: entre Paley y Demócrito. *História, Ciências, Saúde. Manguinhos*, 10(3), 993-1023.
<https://doi.org/10.1590/S0104-59702003000300010>
- Castéra, J. y Clément, P. (2012). Teachers' Conceptions About the Genetic Determinism of Human Behaviour: A Survey in 23 Countries. *Science & Education*, 23(2), 417-443.
<https://doi.org/10.1007/s11191-012-9494-0>
- Clement, J. (1993). Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with student's preconception in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(10), 1241-1257.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660301007>
- Dagher, Z. (1995). Analysis of analogies used by science teachers. *Journal of Research in Science Teaching*, 32(3), 259-270.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660320306>
- Dar-Nimrod, I. y Heine, S. (2011). Genetic essentialism: on the deceptive determinism of DNA. *Psychological bulletin*, 137(5), 800-818.
<https://doi.org/10.1037/a0021860>
- Dawkins, R. (2005). *El capellán del Diablo. Reflexiones sobre la esperanza, la mentira, la ciencia y el amor*. Gedisa.
- Dawkins, R. (2009). *Evolución. El mayor espectáculo sobre la Tierra*. Espasa Calpe.
- Dawkins, R. (2017). *El fenotipo extendido. El largo alcance del gen*. Capitán Swing.
- De Vecchi, G. y Giordan, A. (2006). *Guía práctica para la enseñanza científica*. Díada.
- Dennett, D. (1995). *Darwin's dangerous idea: Evolution and the meanings of Life*. Simon and Schuster.
- Depew, D. (2008). Consequence etiology and biological teleology in Aristotle and Darwin. *Studies in History and Philosophy of Biology and Biomedical Sciences*, 39, 379-390.
<https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2008.09.001>
- Díez, J. y Moulines, U. (2008). *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. Ariel.
- Else, M., Clement, J. y Rea-Ramirez, M. (2008). Using Analogies in Science Teaching and Curriculum Design: Some Guidelines. En J. Clement. y M. Rea-Ramirez (Eds.), *Model Based Learning and Instruction in Science* (pp. 215-232). Springer.
- Estany, A. (1993). *Introducción a la filosofía de la ciencia*. Grijalbo-Mondadori.
- Evans, L. (1984). Darwin's Use of the Analogy between Artificial and Natural Selection. *Journal of the History of Biology*, 17(1), 113-140.
[https://doi.org/10.1016/S1369-8486\(01\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S1369-8486(01)00039-5)
- Fernández, I., Gil, D., Carrascosa, J., Cachapuz, A. y Praia, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 20(3), 477-488.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3962>

- Galagovsky, L. y Adúriz-Bravo, A. (2001). Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 19(2), 231-242.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4000>
- Gentner, D. (1999). Analogy. En R. Wilson y F. Keil (Eds.), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences* (pp. 17-20). The MIT Press.
- Giere, R. (1992). *La explicación de la Ciencia*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Giere, R. (1999a). Del realismo constructivo al realismo perspectivo. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, número extra, 9-13.
- Giere, R. (1999b). Un nuevo marco para enseñar el razonamiento científico. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, número extra, 63-70.
- Gildenhuys, P. (2004). Darwin, Herschel, and the role of analogy in Darwin's origin. *Studies in History and Philosophy of Biology and Biomedical Sciences*, 35(4), 593-611.
<https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2004.09.002>
- Ginnobili, S., González Galli, L. y Ariza, Y. (2021). Do What Darwin Did. *Science & Education*.
<https://doi.org/10.1007/s11191-020-00186-8>
- Glucksberg, S. (1999). Metaphor. En R. Wilson y F. Keil (Eds.), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences* (pp. 535-537). The MIT Press.
- González Galli, L. (2014). «Darwin teleólogo» y «el eclipse del darwinismo»: dos casos para repensar la historia del evolucionismo. En M. Quintanilla Gatica, S. Daza Rosales y H. Cabrera Castillo (Comps.), *Historia y filosofía de la ciencia. Aportes para una «nueva aula de ciencias», promotora de ciudadanía y valores* (pp. 266-284). Bellaterra / Sociedad Chilena de Didáctica, Historia y Filosofía de la Ciencia.
- González Galli, L. (2016). El problema de la teleología y la metáfora del diseño en Biología: cuestiones epistemológicas e implicancias didácticas. *TED (Tecné, Episteme y Didaxis)*, 40.
<https://doi.org/10.17227/01203916.6151>
- González Galli, L. (2019). Permitido decir «para»: el problema de la teleología en la enseñanza de la Biología. *Revista Científica*, 34(1).
<https://doi.org/10.14483/23448350.13710>
- González Galli, L., Ginnobili, S. y Ariza, Y. (2022). Los estudiantes como teleólogos predarwinianos: una propuesta para abordar el problema de la teleología en la enseñanza de la Biología. *Revista de Investigación en Educación*, 20, 188-203.
<https://doi.org/10.35869/reined.v20i2.4225>
- González Galli, L. y Meinardi, E. (2011). The Role of Teleological Thinking in Learning the Darwinian Model of Evolution. *Evolution: Education and Outreach*, 4(1), 145-152.
<https://doi.org/10.1007/s12052-010-0272-7>
- González Galli, L. y Meinardi, E. (2015). Obstáculos para el aprendizaje del modelo de evolución por selección natural en estudiantes de escuela secundaria de Argentina. *Ciencia y Educação*, 21(1), 101-122.
<https://doi.org/10.1590/1516-731320150010007>
- González Galli, L., Pérez, G. y Gómez Galindo, A. (2020). The self-regulation of teleological thinking in natural selection learning. *Evolution Education & Outreach*, 13(6).
<https://doi.org/10.1186/s12052-020-00120-0>
- Glucksberg, S. (1999). Metaphor. En R. Wilson y F. Keil (Eds.), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences* (pp. 535-537). The MIT Press.
- González Labra, M. (1997). *Aprendizaje por analogía. Análisis del proceso de Inferencia Analógica para la adquisición de nuevos conocimientos*. Editorial Trotta.

- Hoffman, R. (1980). Metaphor in Science. En R. Honeck y R. Hoffman (Eds.), *Cognition and Figurative Language* (pp. 393-423). Routledge.
- Hofstadter, D. y Sander, E. (2018). *La analogía. Motor del pensamiento*. Tusquets.
- Izquierdo Aymerich, M. y Adúriz-Bravo, A. (2021). Contribuciones de Giere a la reflexión sobre la educación científica. *ArtefaCToS. Revista de Estudios sobre la Ciencia y la tecnología*, 10(1), 75-87.
<https://doi.org/10.14201/art20211017587>
- Jacob, F. (1986). *La lógica de lo viviente*. Salvat.
- Jiménez Aleixandre, M. (2012). Determinism and Underdetermination in Genetics: Implications for Students' Engagement in Argumentation and Epistemic Practices. *Science & Education*, 23(2).
<https://doi.org/10.1007/s11191-012-9561-6>
- Kampourakis, K. (2014). *Understanding evolution*. Cambridge University Press.
- Kelemen, D. (2012). Teleological minds: How natural intuitions about agency and purpose influence learning about evolution. En K. Rosengren, S. Brem, E. Evans y G. Sinatra (Eds.), *Evolution challenges. Integrating research and practice in teaching and learning about evolution* (pp. 66-92). Oxford: Oxford University Press.
- Keller, E. (2000). *Lenguaje y vida. Metáforas de la Biología en el siglo XX*. Manantial.
- Keller, E. (2002). *El siglo del gen. Cien años de pensamiento genético*. Península.
- Lakoff, G. y Johnson, M. (2012). *Metáforas en la vida cotidiana*. Cátedra.
- Lennox, J. (1993). Darwin was a teleologist. *Biology and Philosophy*, 8, 409-421.
<https://doi.org/10.1007/BF00857687>
- Linares, R. e Izquierdo Aymerich, M. (2006). El rescate de la princesa encerrada en lo más alto de la más alta torre. Un episodio para aprender sobre analogías, símiles y metáforas. *El Hombre y la Máquina*, 27, 24-37.
- Mahner, M. y Bunge, M. (2000). *Fundamentos de Biofilosofía*. México D. F.: Siglo XXI.
- McLaughlin, P. (2003). *What Functions Explain. Functional Explanation and Self-Reproducing System*. Cambridge University Press.
- Nersessian, N. (1992). How Do Scientists Think? Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science. En R. Giere (Ed.), *Cognitive Models of Science* (pp. 3-44). University of Minneapolis Press.
- Noguera Solano, R. (2013). The metaphor of the architect in Darwin: Chance and free will. *Zygon*, 48(4), 859-874.
<https://doi.org/10.1111/zygo.12045>
- Oliva, J. (2004). El pensamiento analógico desde la investigación educativa y desde la perspectiva del profesor de ciencias. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 3(3), 363-384.
- Oliva, J., Aragón, M., Mateo, D. y Bonat, M. (2001). Una propuesta didáctica basada en la investigación para el uso de las analogías en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 19(3), 453-470.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3994>
- Oliva-Martínez, J. y Aragón-Méndez, M. (2009). Contribución del aprendizaje con analogías al pensamiento modelizador de los alumnos en ciencias: marco teórico. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 27(2), 195-208.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3731>
- Ortony, A. (Ed.). (1993). *Metaphor and thought*. Cambridge University Press.
- Palma, H. (2007). *Metáforas en la evolución de las ciencias*. Jorge Baudino.
- Palma, H. (2015). *Ciencia y metáforas. Crítica de una razón incestuosa*. Prometeo Libros.
- Pinker, S. (2007). *El mundo de las palabras. Una introducción a la naturaleza humana*. Paidós.

- Pramling, N. (2008). The role of metaphor in Darwin and the implications for teaching evolution. *Science Education*, 93(3), 535-547.
<https://doi.org/10.1002/sce.20319>
- Puig, B. y Jiménez Aleixandre, M. (2015). El modelo de expresión de los genes y el determinismo en los libros de texto de ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 12(1), 55-65.
https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2015.v12.i1.05
- Rosenberg, A. y McShea, D. (2008). *Philosophy of Biology. A Contemporary Introduction*. Routledge.
- Ruse, M. (1994). *Tomándose a Darwin en serio*. Salvat.
- Ruse, M. (2000). Teleology: Yesterday, today, and tomorrow? *Studies in History and Philosophy of Biological & Biomedical Sciences*, 31(1), 213-232.
[https://doi.org/10.1016/S1369-8486\(99\)00046-1](https://doi.org/10.1016/S1369-8486(99)00046-1)
- Ruse, M. (2003). *Darwin and design. Does evolution have a purpose?* Harvard University Press.
- Ruse, M. (2008). *Charles Darwin*. Katz.
- Sober, E. (1996). *Filosofía de la biología*. Alianza.
- Schuster, F. (2005). Metáfora y analogía en el descubrimiento científico. En Klimovsky, G. (Comp.). *Los enigmas del descubrimiento científico* (pp. 63-80). Alianza.
- Settlage, J. (1994). Conceptions of Natural Selection: A Snapshot of the Sense-Making Process. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(5), 449-457.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660310503>
- Shelley, C. (1999). Multiple analogies in evolutionary biology. *Studies in History and Philosophy of Biology and Biomedical Sciences*, 30(2), 143-180.
<https://doi.org/10.1075/hcp.11>
- Short, T. (2002). Darwin's concept of final cause: neither new nor trivial. *Biology and Philosophy*, 17(3), 322-340.
<https://doi.org/10.1023/A:1020173708395>
- Sterrett, S. (2002). Darwin's analogy between artificial and natural selection: How does it go? *Studies in History and Philosophy of Biology and Biomedical Sciences*, 33(1), 151-168.
[https://doi.org/10.1016/S1369-8486\(01\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S1369-8486(01)00039-5)
- Taylor, C. y Dewsbury, B. (2018). On the Problem and Promise of Metaphor Use in Science and Science Communication. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 19(1).
<https://doi.org/10.1128/jmbe.v19i1.1538>
- Thagard, P. (1995). *Mental leaps: Analogy in creative thought*. Cambridge: MIT Press.
- Theunissen, B. (2012). Darwin and his pigeons. The analogy between artificial and natural selection revisited. *Journal of the History of Biology*, 45(2), 179-212.
<https://doi.org/10.1007/s10739-011-9310-8>
- Venville, G. y Treagust, D. (1997). Analogies in Biology Education: A Contentious Issue. *The American Biology Teacher*, 59(5), 282-287.
<https://doi.org/10.2307/4450309>
- Walsh, D. (2000). Chasing Shadows: Natural Selection and Adaptation. *Studies in History and Philosophy of Sciences*, 31(1), 135-153.
[https://doi.org/10.1016/S1369-8486\(99\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S1369-8486(99)00041-2)
- Zudaire, I. y Napal Fraile, M. (2021). Exploring the Conceptual Challenges of Integrating Epigenetics in Secondary-Level Science Teaching. *Research in Science Education*, 51, 957-974.
<https://doi.org/10.1007/s11165-019-09899-5>

Analogies and Teaching of Genetics and Evolutionary Biology

Leonardo González Galli

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
Instituto de Investigaciones CeFIEC, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
leomgalli@gmail.com

The aim of this article is to review the ways of considering metaphors and analogies when teaching natural sciences and to illustrate the importance of this topic for the cases of genetics and evolutionary biology. Drawing on the analysis of the literature in epistemology and history of science, as well as on cognitive psychology and didactics of natural sciences, it is proposed to distinguish three ways of teaching natural sciences by means of metaphors and analogies. According to the first mode, metaphors and analogies are understood as a mere resource to facilitate the understanding and learning of a certain scientific model. The second mode, related to the nature of science, consists in analyzing the role of metaphors and analogies in the history of science. This second mode involves, for example, working in the classroom how scientists have used metaphors and analogies for different purposes, including as a way of creating new hypotheses. The third mode, also related to the nature of science, explicitly analyzes in the classroom the role which certain analogies –the so-called *epistemic metaphors*– play as an intrinsic and non-removable part of certain theories. While the first two teaching modes –especially the first one– have been addressed extensively in the didactic literature, the third mode has hardly been mentioned. These general analyses are then brought into play in a discussion of possible contributions to the teaching of genetics and evolutionary biology. In relation to the teaching of genetics, it is argued that classroom work based on informatic analogies, which consist in comparing the genotype with a recipe, an architectural plan or a computer program, can be useful for students to develop a critical view of genetic determinism. This is mainly because such analogies make it clear that the information necessary for the development of an organism is distributed between the genotype and the environment, as well as highlighting the inert nature of genes. With regards to teaching evolutionary biology, the usefulness of analogies and metaphors based on design, which contribute to the metacognitive regulation of teleological thinking, is analyzed. The tendency of people to produce teleological explanations is well documented both in research on cognitive psychology and in the didactics of biology. Against didactic proposals that assume teleology has no legitimate role in evolutionary biology and, therefore, teaching should seek to make students abandon this type of reasoning, this paper draws on certain analyses of the epistemology of biology to argue that, in fact, certain forms of teleology are part of biology and, more specifically, of the model of evolution by natural selection. One way to account for the latter is to understand that in order to produce explanations with the model of evolution by natural selection one must necessarily resort to the metaphor of design, which consists of looking at living beings and their parts as if they were objects of design. Assuming that the elimination of students' teleological thinking is neither possible nor desirable, it is argued that the main didactic objective is to encourage students' metacognitive regulation of this type of reasoning. In relation to the latter objective, it is suggested that explicit discussion in class of the role that the design metaphor plays in the model of evolution by natural selection could contribute to the development of such metacognitive capacity. In both cases, for genetics and for evolutionary biology, the chosen analogies constitute «epistemic metaphors», which allows us to illustrate the three different ways of teaching with metaphors and analogies in mind.