

Enseñanza de la evolución: fundamentos para el diseño de una propuesta didáctica basada en la modelización y la metacognición sobre los obstáculos epistemológicos

Gastón Mariano Pérez ^{1,a}, Alma Adrianna Gómez Galindo ^{2,b} y Leonardo González Galli ^{1,3,c}

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Instituto de investigaciones CeFIEC. Buenos Aires. Argentina.

²Unidad Monterrey, Cinvestav. México.

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Buenos Aires. Argentina.

^agastonperezbio@gmail.com, ^bagomez@cinvestav.mx, ^cleomgalli@gmail.com

[Recibido: 31 julio 2017. Revisado: 29 noviembre 2017. Aceptado: 15 diciembre 2017]

Resumen: Numerosas investigaciones en didáctica de la biología muestran que el aprendizaje de la teoría de la evolución biológica es muy complejo. En el presente artículo exponemos los fundamentos teóricos de una propuesta didáctica basada en la modelización y en la metacognición sobre los obstáculos epistemológicos en relación con el aprendizaje de este contenido. Esta propuesta está orientada a que los¹ estudiantes construyan un modelo de evolución por selección natural y de especiación alopátrica, a la vez que reflexionan sobre las estrategias de aprendizaje utilizadas en dicho proceso y sobre los obstáculos epistemológicos que dificultan este trabajo. Además de desarrollar los fundamentos de la propuesta didáctica, ofrecemos algunos ejemplos concretos de actividades.

Palabras clave: Enseñanza de la evolución; Obstáculos epistemológicos; Modelos.

Teaching of evolution: Fundamentals for the design of a didactic proposal based on modeling and metacognition on epistemological obstacles

Abstract: Numerous research in teaching biology shows that learning the theory of biological evolution is very complex. In this paper we present the theoretical foundations of a didactic proposal based on the modeling and metacognition on the epistemological obstacles in relation to the learning of this content. This proposal aimed at students to build a model of evolution by natural selection and allopatric speciation, while reflecting on the learning strategies used in this process and on the epistemological obstacles that make this work difficult. In addition to developing the fundamentals of the didactic proposal we offer some concrete examples of activities.

Keywords: Teaching evolution, epistemological obstacles, metacognition, modeling.

Para citar este artículo: Pérez G., Gómez Galindo, A.A. y González Galli, L. (2018) Enseñanza de la evolución: fundamentos para el diseño de una propuesta didáctica basada en la modelización y la metacognición sobre los obstáculos epistemológicos. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 15(2), 2102. doi: 10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2018.v15.i2.2102

Introducción

La formación ciudadana requiere comprender y explicar diversos fenómenos de gran importancia para la vida cotidiana tales como la resistencia bacteriana a los antibióticos o las plagas agrícolas a insecticidas, las dificultades encontradas en el control de pandemias, como el VIH, y los últimos avances en el conocimiento sobre el genoma, entre otros. Los modelos de la biología evolutiva, además de ser centrales para la biología misma, lo son para permitir tomar decisiones fundamentadas en los tópicos anteriormente mencionados, entre muchos otros. Es por eso que su aprendizaje es central para la educación científica de cualquier ciudadano crítico. No obstante, esto no es tarea fácil, dadas las diversas dificultades que se

¹ Optamos por esta forma de escritura, para una fácil lectura, aunque somos conscientes de que estas formas dejan por fuera muchas expresiones de género.

anteponen: asociadas a las creencias religiosas (Eilam 2013; Smith 2010a), a los marcos de pensamiento que funcionan como obstáculos para la comprensión de los modelos (Gelman y Rhodes 2012; González Galli 2011), a la comprensión de las escalas temporales (Eilam 2013), entre otras. A estos problemas específicos debemos agregar también las dificultades comunes al aprendizaje de cualquier modelo científico contra-intuitivo, tales como la persistencia de concepciones alternativas incompatibles con los modelos científicos (Bermúdez 2015; Jiménez Aleixandre 2002; Smith 2010b), las ideas del sentido común sobre la naturaleza de la ciencia (Smith 2010a; Rivas y González García 2016; Thagard y Findlay 2010) o el uso que dan los medios de comunicación a algunos términos confiriéndoles un significado diferente al que le atribuye la comunidad científica.

Diversas son las propuestas que se han llevado a cabo para abordar la enseñanza de la biología evolutiva- desde aquellas ancladas al modelo de cambio conceptual (Clement 2008; Werth 2012), a las centradas en las utilización de simuladores (Horwitz 2013) o en la naturaleza de la ciencia (Girbau y Pastor 2009; Jensen y Finley 1996)-, pero solo unas pocas desde la perspectiva de la modelización (Passmore y Stewart 2002) o de los obstáculos epistemológicos (González Galli 2011). La mayoría de estas reportan la persistencia de las concepciones alternativas de los sujetos.

Asumimos que las dificultades más importantes, en tanto que son el origen de algunas otras y porque son las que más problemas generan a la hora de comprender los modelos de la biología evolutiva, son los obstáculos epistemológicos y las concepciones sobre la naturaleza de la ciencia que poseen los estudiantes. Por tal razón es que consideramos necesario generar una propuesta didáctica para la enseñanza de los modelos de evolución por selección natural (MESN) y de especiación alopátrica (MAE) fundamentada en la modelización y la metacognición sobre los obstáculos epistemológicos.

El presente artículo tiene como objetivo principal comunicar los fundamentos para la construcción de una propuesta didáctica desde los marcos teóricos de los obstáculos epistemológicos, la metacognición y la modelización. Esta fundamentación se presentará en primera instancia, para luego ser ilustrada con una posible propuesta de trabajo -enmarcada en el trabajo de tesis doctoral del primero de los autores- brindando algunos ejemplos de actividades que permitirán comprender la relación entre la fundamentación y la secuencia didáctica.

Fundamentos desde el marco teórico de los obstáculos epistemológicos

Numerosos investigadores han indagado las concepciones de sentido común que sostienen los sujetos cuando se los enfrenta a problemas de biología evolutiva. Solo por mencionar algunas, pueden encontrarse ideas como las que plantean que el cambio evolutivo está guiado por la necesidad (Evans 2008; Nehm y Ridgway 2011), las características adquiridas durante el desarrollo ontológico se pasan a la descendencia (González Galli 2011; Gregory 2009; Jiménez Aleixandre 2002) o que las especies son inmutables y algunas al no poder adaptarse se extinguen (Samarapungavan y Wiers 1997).

Estas ideas suelen persistir aún después de que las personas hayan atravesado varias instancias de educación formal. Con el fin de comprender cuál es el origen de estas concepciones y trabajar sobre ellas en la escuela, autores franceses de la didáctica de las ciencias como Astolfi (1994) y Peterfalvi (2001), desarrollaron el concepto de *obstáculo* basado en la noción de *obstáculo epistemológico* del epistemólogo francés Gastón Bachelard. Los obstáculos epistemológicos son formas de razonar que subyacen a diversas concepciones alternativas que

sostienen los estudiantes y que funcionan como el «núcleo duro» de las concepciones, por lo que influyen fuertemente en la resistencia al aprendizaje y en los razonamientos científicos.

González Galli y Meinardi (2010) caracterizan estas formas de pensamiento, u obstáculos, por su:

- (1) Transversalidad, en tanto subyacen a concepciones de dominios de conocimiento diferentes,;
- (2) funcionalidad, en tanto poseen un poder explicativo de los fenómenos del mundo; y,
- (3) conflictividad, en tanto que explican lo mismo que pretendemos que los estudiantes expliquen con el modelo científico que les va a ser enseñado.

A continuación comentaremos dos de los obstáculos más representativos e investigados en el aprendizaje de los modelos de la biología evolutiva y que cumplen un rol importante en la propuesta que presentamos.

El obstáculo teleológico

En las clases de evolución los docentes nos encontramos con frases como «los lobos desarrollan un pelaje blanco para camuflarse», «los piojos mutan para hacerse resistentes», «las alas de las aves aparecieron porque las necesitaban para volar». A todas ellas subyace una forma de pensar distintiva denominada pensamiento teleológico o finalista. Esta forma de pensar implica asumir que la producción de los rasgos de los organismos se debe a un propósito o finalidad (González Galli 2011; Kampourakis 2014; Mead y Scott 2010).

Las explicaciones de corte finalista de los estudiantes suponen dos cuestiones: que las variaciones se producen según las necesidades del individuo y que los cambios evolutivos corresponden a ciertos fines predeterminados como la producción de la especie humana (González Galli 2011; Mead y Scott 2010). Esta perspectiva dificulta pensar, entre otras cosas, que los cambios evolutivos obedecen a causas precedentes (y no a fines predeterminados o a necesidades) y que el origen de las variaciones heredables no está ligado a su valor adaptativo.

El obstáculo esencialista

Otras frases que suelen estar presentes en las clases de evolución son «los lobos podrán cambiar más o menos, pero siempre serán lobos», «todos los piojos son exactamente iguales». Podemos interpretar que a dichas frases subyace otro obstáculo epistemológico: el pensamiento esencialista.

A este término se asignan diferentes significados en las diversas investigaciones (para una revisión completa ver Gelman 2004: 405). En este trabajo adoptaremos la definición propuesta por Gelman y Rhodes (2012). Para ellas el esencialismo implica cinco supuestos que impiden la comprensión y aceptación de la teoría evolutiva: (1) Estabilidad e inmutabilidad. Implica suponer que las categorías son estables e inmutables. Esto no niega que los individuos puedan cambiar, sino que se asume que esta variación es superficial con respecto a la esencia subyacente. (2) Intensificación de los límites. Se asume que los límites entre las categorías son estrictos e impermeables. (3) Variabilidad como ruido. Se representa a la categoría en función de un “tipo” y se ignora la variabilidad considerándola superficial en relación con la esencia subyacente inmutable. (4) Las causas residen en el individuo. La esencia interna compartida por los miembros de la categoría es causa de sus características y comportamientos. (5) Noción platónica de ideal. Se asume que la esencia es un ideal al que nunca puede accederse en el mundo real.

Esta serie de supuestos dificulta la comprensión de los modelos evolutivos, ya que no permite pensar en el cambio de las especies a través de las generaciones en tanto se asume una

estabilidad de las categorías biológicas, especialmente la de especie. Además, el considerar la variabilidad como *ruido* desestima su importancia para la evolución.

¿Qué hacer con los obstáculos en la clase de evolución? Fundamentos desde el marco teórico de la metacognición

Anteriormente explicitamos el carácter conflictivo de la teleología y el esencialismo frente a las explicaciones que surgen de la aplicación de los modelos evolutivos. A continuación, haremos hincapié en el carácter transversal y funcional de cada uno de ellos, para comprender su tratamiento didáctico basado en la metacognición.

El pensamiento teleológico es un dispositivo causal que sirve para explicar el mundo, por ejemplo las actitudes de otros sujetos, asumiendo que éstos poseen un determinado objetivo o el comportamiento de artefactos creados por el hombre que implican un propósito en su uso (Inagaki y Hatano 2006). Las expresiones de este tipo tienen también un valor heurístico, transformando largas formulaciones en otras más cortas, ayudando a organizar la información y dirigiendo, por ejemplo, las preguntas de investigación de los científicos en relación a los seres vivos (Zohar y Ginossar 1998).

Por su parte el pensamiento esencialista es la base para realizar nuestras clasificaciones cotidianas y a partir de ellas desarrollar inferencias. Este tipo de categorizaciones permite organizar la información, reduciendo su uso al momento de procesar respuestas. Sin categorías, cualquier experiencia sería nueva e impredecible (Evans 2008; Gelman 2004).

Ambos marcos de pensamiento fueron encontrados en diversas culturas y en diversos dominios de contenido (Evans 2008, Del Río y Strasser 2007).

Considerando lo anterior queda claro que estas dos formas de razonamiento poseen un carácter funcional para la vida cotidiana de los sujetos, así como transversal en tanto dan cuenta de diversas formulaciones cotidianas bajo las que subyacen. Al ser ambas formas de pensamiento constitutivas de la biología intuitiva (Inagaki y Hatano 2006) y además operar constantemente desde los medios de comunicación masiva influenciando a los sujetos (Zohar y Ginossar 1998), pretender evitarlas o eliminarlas con la enseñanza carecería de sentido ¿Qué hacer entonces?

La propuesta, desde el marco teórico de los obstáculos, es pensar estas formas de razonar como un elemento positivo constitutivo de la cognición de los estudiantes y que puede usarse como base para la construcción de los modelos científicos. Surge así la concepción de un trabajo didáctico dirigido a la toma de conciencia y la regulación (*vigilancia metacognitiva*) de los obstáculos (Peterfalvi 2001), implicando generar espacios de aprendizaje que permitan a los estudiantes conocer conscientemente estos obstáculos, estar atentos a sus formulaciones y generar re-elaboraciones de las explicaciones en las que subyacen.

Dicha vigilancia está basada en el proceso de regulación del aprendizaje. Para realizar esta regulación será necesario de antemano conocer qué es lo que se regula (Schraw, Olafson, Weibel y Sewing 2012), lo que nos lleva a considerar, en este caso, que los estudiantes deben conocer explícitamente estas formas de pensamiento, sus posibles manifestaciones y cuándo estar atentos a ellas. Pero, además de poseer este conocimiento metacognitivo, los estudiantes deben ser capaces de regular los obstáculos durante la construcción o el uso del modelo científico de interés. Esta capacidad de regulación implica el monitoreo sobre los obstáculos en la resolución de alguna situación o la evaluación de la solución dada, estando atentos a los obstáculos que podrían haber dificultado o intervenido en la misma.

En las propuestas didácticas centradas en la superación de obstáculos no se explicita cómo, una vez alcanzado el objetivo de *vigilar* los obstáculos, se construyen los modelos científicos,

objetivo último de la enseñanza. De hecho, existe cierta tensión entre ambos criterios (superación de obstáculos y construcción de modelos) al momento de diseñar una unidad didáctica (Astolfi 1994). Frente a esto, creemos que el aporte del marco teórico de la modelización al aprendizaje de los modelos evolutivos radica en pensar una *superación* de los obstáculos más compleja que integre la construcción de los modelos evolutivos mediante la consciencia y regulación de los obstáculos.

Fundamentos desde el marco teórico de la modelización

Para entender de qué hablamos cuando hablamos de modelización es importante primero proponer una concepción de modelo científico. Siguiendo al epistemólogo Ronald Giere (1992, 1999) cuya perspectiva forma parte de la llamada concepción semántica de las teorías científicas, consideramos modelos científicos a aquellas construcciones abstractas que sirven de representaciones del mundo. El modelo se comporta como análogo a la realidad que intenta describir, explicar o predecir. Dado este comportamiento, la relación entre el modelo y la realidad no es una relación de verdad, sino de ajuste. La actividad de los científicos, entonces, no consiste en la eliminación de mentiras o en el descubrimiento de la verdad sino en la construcción de modelos que se ajustan mejor, de acuerdo con ciertos objetivos, al mundo que explican.

Basándonos en esta propuesta, se entiende por modelización escolar al proceso mediante el que los alumnos construyen sus propios modelos, que les permiten explicar y predecir fenómenos.

Desde este enfoque los estudiantes se enfrentan a un fenómeno al cual deben ofrecer una explicación. Este modelo de partida de los sujetos (que incluye sus propias concepciones alternativas) se revisará y re-elaborará para regular su poder explicativo durante el desarrollo de la secuencia didáctica. Esto implica que los diferentes modelos construidos se van ajustando paulatinamente para dar respuesta al fenómeno presentado y pueden ser parciales o incompletos desde la concepción erudita. Lo que se espera es que la propuesta didáctica facilite la complejización de esos modelos dejando ideas de lado, incorporando nuevas entidades y relaciones, más ejemplos, lenguaje, acercándose cada vez más a los modelos eruditos gracias al trabajo en espiral que se realiza durante la secuencia. Esta espiral implica un ir y venir entre las ideas propias y otras nuevas, en la explicitación y el trabajo sobre los obstáculos (García Rovira y Sanmartí 2006; Gómez Galindo 2013).

Para que suceda esta re-elaboración de modelos, consideramos una hipótesis de progresión (García 1998) de lo simple a lo complejo que guíe la unidad didáctica. En este sentido se parte de un fenómeno concreto que tiene sentido para los estudiantes y que tras diversas actividades se re-significa y se convierte en una especie de plantilla que permite pensar nuevos fenómenos de características similares. El fenómeno concreto se convierte entonces en lo que algunos autores llaman ejemplo o hecho paradigmático (Astolfi 1997; Izquierdo Aymerich 2014). Gracias a la construcción de este se propicia un espacio en el que los alumnos abstraen el modelo construido para explicar el fenómeno concreto y lo transforman en un modelo para explicar otros hechos similares (Sensevy, Tiberghien, Santini, Laubé y Griggs 2008).

Una característica distintiva de este proceso de modelización es la comunicación multimodal que implica el reconocimiento de la existencia de diferentes modos de representación (oral, escrito, gráfico) que permiten construir significados de manera conjunta sobre el fenómeno. Cada modo interactúa y contribuye con los otros. Por momentos, el significado que se construye mediante los distintos modos puede ser el mismo mientras que en otras ocasiones cada modo puede aludir a aspectos diferentes del fenómeno que se está modelizando. Esta particularidad implica considerar que el uso de diferentes modos en la construcción de los

modelos permite que aparezcan propiedades del fenómeno representado que en otro modo no se hubiesen rescatado (Kress, Jewitt, Ogborn y Tsatsarelis 2001).

Una propuesta posible

Para mostrar un posible entretrejo entre los tres marcos teóricos, presentamos a continuación una posible secuencia didáctica orientada hacia la construcción de dos modelos: el modelo de evolución por selección natural (MESN) y el modelo de especiación alopátrica (MAE). Dichos modelos se constituyen en aproximaciones a dos importantes interrogantes que busca responder la biología evolutiva: (1) ¿Qué proceso es responsable de la adaptación biológica? y (2) ¿Qué proceso explica el origen de la diversidad biológica? (Dennett 1995; Sterelny y Griffiths 1999).

La propuesta está dirigida a alumnos de entre catorce y dieciséis años. Posee una duración de aproximadamente tres meses, con 120 minutos semanales de clases. En la Tabla 1 se muestra una síntesis de la misma, caracterizada a partir de los momentos definidos por la propuesta de secuenciación de actividades de Sanmartí (2000). Cada uno de estos momentos (tabla 1, primera columna de la izquierda) los tomaremos como eje en lo que resta del artículo para explicar sus particularidades, ejemplificar con algunas actividades y explicitar un posible modo de interrelación entre la modelización, los obstáculos y la metacognición.

Tabla 1. Síntesis de la propuesta para la enseñanza del MESN y el MAE a partir de un trabajo de modelización y metacognición sobre los obstáculos epistemológicos. *Actividad de re-elaboración (se describe en el texto).

Momento	Tipo de Actividad	Act. N°	Propuesta de actividad	Objetivos (en función del rol de los estudiantes)
De exploración	Caracterización de los modelos de partida	1	Explicación de un caso concreto	Expliciten sus modelos de partida sobre el cambio de las poblaciones a través del tiempo.
		2	Introducción a la unidad didáctica	Conozcan mediante una presentación la pregunta que se intentará responder en el desarrollo de la secuencia y los objetivos de aprendizaje que se esperan. Revisen el esquema (ECI) armado por el docente. Expliciten sus preguntas sobre evolución y sus sentimientos sobre el aprendizaje de la misma.
		3	Discusión sobre publicidades	Expliciten sus concepciones sobre los significados de la palabra evolución en su cotidianidad.
De evolución de los modelos iniciales	Construcción de ideas iniciales	4	Observación de un video sobre el fenómeno	Conozcan la existencia de la variabilidad interindividual en los organismos. Comprendan que algunas características son heredables.
		5	Lectura de un texto sobre el fenómeno	Comprendan que el ambiente incluye factores que limitan la supervivencia y la reproducción de los organismos.
		6*	Lectura de un texto y trabajo con imágenes sobre el fenómeno	Comprendan que la probabilidad de reproducirse y sobrevivir en un ambiente dado depende de la interacción entre las características del individuo y las del medio. Comprendan el carácter aleatorio del origen de las variantes heredables.
	Construcción de una primera aproximación al MESN	7*	Analogía entre la selección artificial y la selección natural	Construyan una primera aproximación al modelo de selección natural.
		8	Revisión de respuestas iniciales	Reflexionen sobre las concepciones finalistas que aparecen en sus expresiones.
		9	Armado de criterios	Consensuen los criterios para una buena explicación darwiniana que se tomarán como referencia durante las clases.
	Construcción de una primera aproximación al MAE	10	Resolución de un caso. Lectura de texto de Borges	Comprendan que poblaciones aisladas reproductivamente por una barrera física siguen caminos evolutivos divergentes hasta que, eventualmente, constituyen especies nuevas. Comprendan la definición biológica de especie, sus alcances y limitaciones.
		11*	Discusión de frases populares (sexistas, racistas)	Reflexionen metacognitivamente sobre el obstáculo esencialista.

Tabla 1. Continuación

Momento	Tipo de Actividad	Act. N°	Propuesta de actividad	Objetivos (en función del rol de los estudiantes)
De síntesis y estructuración del conocimiento	Metacognición	12	Armado de fichas de estrategias	Reflexionen metacognitivamente sobre las estrategias utilizadas para aprender.
	Generalización	13	Actividad <i>Thinking Aloud</i> (Resolvedores – Observadores)	Aplican el modelo de evolución por selección natural a dos casos concretos y reflexionen explícitamente sobre las dificultades en su aplicación. Abstraigan el esquema generado.
		14*	Resolución de casos concretos	Aplican el modelo de evolución por selección natural y el de especiación a casos concretos para revisar si la abstracción realizada es útil.
		15	Coevaluación de esquemas	Coevalúen los distintos esquemas abstraídos.
De aplicación y transferencia	Aplicación a nuevos contextos	16*	Discusión de distintos árboles evolutivos	Comprendan la representación en forma de árbol utilizada en biología evolutiva. Reflexionen metacognitivamente sobre la idea de progreso.
	Metacognición	17	Armado de fichas de estrategias	Reflexionen metacognitivamente sobre las analogías como estrategia de aprendizaje.
	Transferencia a otros casos	18	Aplicaciones del modelo construido a diversas situaciones con un orden de complejidad creciente	Aplican el MESN y MAE construido y representado en los diagramas para la resolución de problemas de diversas situaciones. Reflexionen metacognitivamente sobre otras formas de pensamiento (obstáculos) que no han sido tratadas en la secuencia.
		19	Discusión sobre publicidades	Reflexionen sobre su conocimiento en relación con la evolución y lo apliquen a la crítica de imágenes o publicidades.
	Metacognición	20	Analogía entre un viaje y el proceso de aprendizaje	Reflexionen sobre su proceso de aprendizaje durante toda la secuencia.
Actividad post-instruccional		21	Indagación de modelos de llegada	Expliciten sus modelos sobre fenómenos evolutivos.

Momento de exploración

Durante este primer momento se proponen actividades que Sanmartí (2000) llama de exploración. Estas tienen como objetivo familiarizar a los estudiantes con el problema a estudiar, abrir un espacio donde puedan explicitar sus representaciones y comenzar a delimitar su modelo de partida. Es en esta primera etapa donde se explicita el fenómeno que se construirá como paradigmático. Para el caso de esta secuencia se eligió el siguiente: en ambientes nevados los lobos actuales son de color blanco, pero sus antepasados poseían un pelaje oscuro. Durante el recorrido didáctico se construyen modelos que intentan explicar este cambio.

En la actividad 1 (tabla 1) se solicita a los estudiantes que expliquen el cambio de las poblaciones de lobos a través del tiempo. Se les propone que expresen sus ideas en dos modos (escrito y dibujo), con el objetivo de generar un soporte material que será el hilo conductor de esta unidad. Ambos modos de representación nos permiten conocer las interpretaciones que los estudiantes hacen sobre el fenómeno y actúan sinérgicamente durante toda la secuencia brindando información complementaria sobre las ideas de los alumnos.

La información individual que brinda la actividad 1 es utilizada por el docente para armar un esquema conceptual inicial (ECI) único para todo el grupo clase. Dicho esquema busca representar las ideas de todos los estudiantes sobre el fenómeno en cuestión, que se relacionan entre sí mediante flechas con un significado. Este ECI funciona como otra forma de representación que se utilizará recurrentemente durante toda la propuesta en tanto se va retomando y complejizando en diversos momentos (ver más adelante «Actividad de reelaboración»).

Momento de evolución de los modelos iniciales

Durante este momento de la secuencia, las actividades tienen como objetivo promover la evolución de los modelos iniciales, introducir nuevas variables que permitan discutir el fenómeno en cuestión, identificar otras formas de observar y de explicar (Sanmartí 2000) y reformular el caso de la evolución de los lobos.

Para ello, según Johsua y Dupin (2005), se requiere des-sintetizar la dimensión conceptual del modelo. El modelo en sí mismo no es un dato de partida, sino que justamente es el objetivo declarado de la enseñanza. En consecuencia, se realiza una disociación de la dimensión conceptual del mismo en algunos elementos que luego se pondrán en relación. Tomando como base lo que proponen diversos autores (Anderson, Fisher y Norman 2002; González Galli 2011; Nehm y Ridgway 2011) formulamos los siguientes en relación al MESN: (1) los organismos de una misma población difieren entre sí; (2) algunas de esas diferencias son heredables y otras no; (3) el origen de las variantes heredables no está asociado causalmente al efecto fenotípico que eventualmente producirán; (4) el ambiente incluye factores que limitan la supervivencia y la reproducción de los organismos y (5) la probabilidad de reproducirse y sobrevivir en un ambiente dado depende de la interacción entre las características del individuo y las del medio.

Estas ideas se construyen a partir de la resolución de problemas anclados en el fenómeno indicado anteriormente. Para citar un ejemplo, con el fin de poner en discusión y visibilizar el punto número (1) se les ofrece a los estudiantes observar un vídeo de un investigador que convive con lobos. A partir de su observación se les pregunta «¿Cómo hacía el investigador para diferenciar a los distintos lobos que convivían con él?» lo que permite poner en discusión explícitamente la variabilidad intraespecífica que generalmente no es tenida en cuenta o asociada con un *ruido* en la categoría, subyaciendo en estas ideas el pensamiento esencialista. Si bien en esta instancia no se trabajará sobre el obstáculo, queda como antecedente para su trabajo posterior. De esta manera damos cuenta del carácter en espiral que implicaría una propuesta basada en la modelización y la metacognición sobre los obstáculos epistemológicos. Las ideas que se construyen inicialmente vuelven a retomarse, ampliándose y complejizándose.

En este momento de evolución de los modelos iniciales se comienzan a delimitar aproximaciones a los modelos de MESN y MAE. Por ejemplo, para la construcción de una primera aproximación al MAE se les plantea a los estudiantes un fenómeno relacionado con la división fortuita de una población de lobos y su posterior reencuentro sin posibilidad de cruce entre los miembros de las nuevas poblaciones. Nuevamente, el carácter en espiral de los procesos de modelización se hace presente en esta instancia donde se utilizan las ideas de especie que surgieron del pre-test como punto de partida para promover la evolución de los modelos iniciales, introduciendo nuevas formas de pensar y explicar. Por ejemplo, durante la actividad N° 10 se utiliza una adaptación del cuento «Funes, el memorioso» de Jorge Luis Borges (1994). Este cuento habla del encuentro entre un joven de Buenos Aires e Ireneo Funes, un uruguayo que tras un accidente queda postrado y con la particularidad de ser incapaz de clasificar recordando absolutamente todo detalladamente. Este hecho permite crear un espacio en el aula donde se habilita a pensar en las bondades de la clasificación pero también en su conflictividad en relación a la construcción de categorías biológicas y a la fuerza causal inmutable (la esencia) que subyace a las categorías. Esto genera la posibilidad de trabajar explícitamente sobre el obstáculo esencialista. Por ejemplo para discutir la transversalidad de este modo de pensar se propone a los estudiantes analizar, además de las explicaciones en relación a la evolución, otras asociadas al racismo o al sexismo, bajo las cuales se encontraría accionando el esencialismo, así como otros múltiples factores sociales y culturales.

Cuando se realiza el trabajo explícito sobre los obstáculos colocándolos en el foco de atención en la clase, se solicita a los estudiantes poner un nombre a esta forma de pensar y escribirlo en carteles que se cuelgan en las paredes del aula. Los mismos funcionan como objetos que permiten a los estudiantes volver a evocar el obstáculo, los ayuda a estar atentos a sus nuevas manifestaciones (Peterfalvi 2001) y sirven como otro material más para la negociación de significados durante las discusiones grupales.

Momento de síntesis y estructuración del conocimiento

Para Sanmartí (2000) es necesario que en el proceso de enseñanza se incluyan actividades que favorezcan que los estudiantes expliciten qué están aprendiendo, cuáles son los cambios en sus puntos de vista y sus conclusiones. Se trata de actividades que promuevan la abstracción de las ideas importantes, formulándolas de forma descontextualizada y general. Actividades como la N° 13 abren un espacio para que los estudiantes apliquen el modelo construido a dos casos diferentes al de los lobos y reflexionen explícitamente sobre las dificultades en su aplicación. Esto permite generar una abstracción del último esquema conceptual re-elaborado, de tal manera que el fenómeno de los lobos se transforme en un hecho paradigmático que pueda ser recuperarlo para ser utilizado como análogo en otros casos de evolución.

Para realizar esto proponemos una estrategia, tomada de la investigación en metacognición, denominada «pensamiento en voz alta» o *thinking aloud* (Hartman 2001; Pintrich 2002). En este caso los estudiantes trabajan en pares, donde cada uno de los integrantes tendrá un rol asignado: el rol del *resolvidor* y el rol del *observador*. El *resolvidor* debe resolver el problema asignado en voz alta, indicando todo aquello «que le pase por la cabeza». El *observador*, por su parte, toma nota de cómo su compañero resuelve el problema. El potencial didáctico de esta actividad radica en que la escucha del pensamiento en voz alta funciona como disparador de la conciencia sobre las fortalezas y debilidades a la hora de resolver un problema de evolución. Además, la combinación de esta autoconciencia y del *feedback* del que observa permite que el que resuelve pueda monitorear su desempeño y pensar cambios apropiados si se necesitan, capacidades relacionadas con la autorregulación de los aprendizajes.

En esta actividad el esquema conceptual construido con base en el problema de los lobos se convierte en un análogo para dar una respuesta a nuevos problemas como pueden ser el desarrollo de la resistencia de los piojos a los piojicidas o el cambio en el tiempo del patrón de espinas de determinados arbustos frutícolas. Así, tomando las ideas de Verhoeff, Boersma y Waarl (2013), el «modelo de» la evolución de los lobos sirve como base para el desarrollo de un «modelo para» explicar la evolución de otros organismos.

Momento de aplicación y transferencia

Finalmente, en las últimas actividades, se procede a lo que Sanmartí (2000) considera como una actividad de transferencia a otros contextos, de generalización. Este tipo de actividades está orientado a transferir las nuevas formas de ver y explicar a nuevas situaciones más complejas que las iniciales. Un ejemplo de estas actividades es la N° 18, en la que se utilizó la tipología de casos de dificultad creciente para aprender el MESN que propone en su tesis doctoral González Galli (2011). Esta tipología se basa en la naturaleza analógica de los razonamientos humanos. «Así, la capacidad de un estudiante para aplicar un modelo científico aprendido a un nuevo caso suele depender del grado de semejanza entre dicho caso y aquellos utilizados durante el aprendizaje del modelo» (p. 613). Cada caso permite además discutir distintos obstáculos, algunos de los cuales no fueron tratados durante la secuencia (González Galli y Pérez 2014).

Actividad de re-elaboración como eje que sostiene la espiral

En la «Actividad de re-elaboración» se explicita el proceso de aprendizaje en espiral que se propone desde la secuencia y cómo en ella se entretejen la modelización, la metacognición y los obstáculos epistemológicos.

Esta actividad se lleva a cabo durante algunos momentos de la unidad (asteriscos en la Tabla 1) donde se toma como material de trabajo el esquema conceptual inicial (ECI) y se propone a los estudiantes un espacio en el cual los esquemas se reelaboran y complejizan según lo discutido en las actividades que le precedieron. Dada la dinámica grupal, se habilita la negociación social de esta representación, generando una comprensión compartida de los modelos que se están construyendo (Gómez Galindo 2014) y propiciando además una regulación de la tarea y de los obstáculos epistemológicos.

La reelaboración del ECI, y sus esquemas sucedáneos, se convierte entonces en el *hilo conductor* de la secuencia didáctica. Los sucesivos esquemas se van transformando incorporándose nuevos puntos de vista, variables, lenguajes, ejemplos y reflexión sobre los obstáculos.

Hacia el final de la secuencia didáctica el esquema conformado representará los modelos de los estudiantes sobre los fenómenos evolutivos que han construido hasta el momento.

Consideraciones finales

El objetivo principal de este artículo fue comunicar los fundamentos para la construcción de una propuesta didáctica desde los marcos teóricos de los obstáculos epistemológicos, la metacognición y la modelización. La interacción entre estos tres marcos tiene múltiples potencialidades:

- Contribuye a favorecer el aprendizaje de los modelos científicos.
- Contribuye a la construcción de una imagen de ciencia más acorde con lo que está consensuado actualmente por la comunidad de epistemólogos de la ciencia.
- Permite respetar las subjetividades de los sujetos en tanto que los diferentes modelos de partida sirven a la construcción de modelos más complejos.
- Permite la reflexión constante sobre las propias formas de razonar y sobre los modos en que se construyen modelos en el aula.
- Habilita espacios de regulación de los propios aprendizajes y de los aprendizajes de los otros.

La propuesta presentada y su fundamentación abren nuevas preguntas en relación con la investigación en la didáctica de la biología evolutiva: ¿Cómo evaluar los procesos metacognitivos individuales y grupales? ¿Qué tipos de estrategias dominio específicas sirven a la construcción de los MESN y MAE? ¿Cómo salvar la tensión existente entre los marcos de la modelización y los obstáculos epistemológicos, entre la construcción de nuevos modelos y la reflexión sobre los propios obstáculos? Además, esta propuesta ha sido aplicada y actualmente se están analizando los datos y generando nuevas preguntas sobre los procesos de modelización y metacognición sobre los obstáculos epistemológicos.

Referencias bibliográficas

Anderson D., Fisher K., Norman, G. (2002) Development and evaluation of the conceptual inventory of natural selection. *Journal of Research in Science Teaching* 39 (10), 952- 978.

- Astolfi J. P. (1994) El trabajo didáctico de los obstáculos, en el corazón de los aprendizajes científicos. *Enseñanza de las Ciencias* 12 (2), 206-216.
- Astolfi J. P. (1997) *Aprender en la escuela*. Santiago de Chile: Dolmen.
- Bermúdez G. (2015) Los orígenes de la biología como ciencia. El impacto de las teorías de evolución y las problemáticas asociadas a su enseñanza y aprendizaje. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 12 (1), 66-90. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10498/16925>
- Borges J. L. (1944) *Ficciones*. Buenos Aires: Emecé.
- Clement J. (2008) The role of explanatory models in teaching for conceptual change. En S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 417-452). Amsterdam: Routledge.
- Del Río M., Strasser K. (2007) ¿Tienen los niños una teoría esencialista acerca de la pobreza? *Psyche* 16 (2), 139-149.
- Dennett D. (1995) *Darwin's dangerous idea: Evolution and the meanings of Life*. Nueva York: Simon and Schuster.
- Eilam B. (2013) Possible constraints of visualization in biology: Challenges in learning with multiple representations. En C. Tsui, F. Treagust (Eds.), *Multiple Representations in Biological Education* (pp. 55-73). New York: Springer.
- Evans E. (2008) Conceptual change and evolutionary biology: A developmental analysis. En S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 263-294). New York: Routledge.
- García J. E. (1998) *Hacia una teoría alternativa sobre los contenidos escolares*. Sevilla: Díada.
- García Rovira M.P., Sanmarti, N. (2006) La modelización: una propuesta para repensar la ciencia que enseñamos. En M. Quintanilla, A. Adúriz-Bravo (Eds.), *Enseñar Ciencias en el Nuevo Milenio* (pp. 279-297). Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile.
- Gelman S. (2004) Psychological essentialism in children. *Trends in Cognitive Sciences* 8(9), 404-409.
- Gelman S., Rhodes M. (2012) Two-thousand years of stasis. How psychological essentialism impedes evolutionary understanding. En K. Rosengren, S. Brem, E. Evans, G. Sinatra (Eds.), *Evolution Challenges. Integrating research and practice in teaching and learning about evolution* (pp. 3-21). New York: Oxford University Press.
- Giere R. (1992) *La explicación de la ciencia. Un acercamiento cognoscitivo*. México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Giere R. (1999) Un nuevo marco para enseñar el razonamiento científico. *Enseñanza de las Ciencias, Número extra* 63-70.
- Girbau M., Pastor S. (2009) Propuesta de actividades de aula sobre evolución: otros prismas y contextos. *Enseñanza de las ciencias, VIII Congreso internacional sobre investigación en la didáctica de las ciencias* 1148-1153.
- Gómez Galindo, A.A. (2013) Explicaciones narrativas y modelización en la enseñanza de la biología. *Enseñanza de las Ciencias* 31 (1), 11-28.
- Gómez Galindo, A.A. (2014) El uso de representaciones multimodales y la evolución de los modelos escolares. En C. Merino, M. Arellano, A. Adúriz-Bravo (Eds.), *Avances en*

- Didáctica de la Química: Modelos y Lenguajes* (pp. 51-61). Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso.
- González Galli, L. (2011) Obstáculos para el aprendizaje del modelo de evolución por selección natural (Tesis doctoral). Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Buenos Aires.
- González Galli, L., Meinardi, E. (2010) Revisión del concepto de obstáculo a partir de la investigación sobre la enseñanza y el aprendizaje del modelo de evolución por selección natural. *IX Jornadas Nacionales y IV Congreso Internacional de Enseñanza de la Biología, Tucumán, Argentina, 7-10 octubre*.
- González Galli, L., Pérez, G. (2014) Obstáculos para el aprendizaje de la biología evolutiva. *XI Jornadas Nacionales y VI Congreso Internacional de Enseñanza de la Biología, General Roca, Río Negro, Argentina, 9-11 octubre*.
- Gregory T. (2009) Understanding natural selection: essential concepts and common misconceptions, *Evolution: Education and Outreach* 2 (2), 156-175.
- Hartman H. (2001) Developing students' metacognitive knowledge and skills. En H. Hartman (Ed.), *Metacognition in Learning and Instruction. Theory, Research and Practice* (pp. 33-68). Dordrecht: Springer.
- Horwitz P. (2013) Evolution is a model, Why not teach it that way? En C. Tsui, F. Treagust (Eds.), *Multiple Representations in Biological Education* (pp. 129-145). New York: Springer.
- Inagaki K., Hatano, G. (2006) Young children's conception of the biological world. *Current Directions in Psychological Science* 15 (4), 177-181.
- Izquierdo Aymerich M. (2014) Los modelos teóricos en la enseñanza de las "ciencias para todos" (ESO, nivel secundario). *Bio-grafía - Escritos sobre la Biología y su Enseñanza* 7 (13), 69-85.
- Jensen M., Finley F. (1996) Changes in students' understanding of evolution resulting from different curricular and instructional strategies, *Journal of Research in Science Teaching* 33 (8), 879-900.
- Jiménez Alexandre M. P. (2002) Aplicar la idea de cambio biológico: ¿por qué hemos perdido olfato? *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales* 9 (32), 48-55.
- Johnsua S., Dupin J. (2005) *Introducción a la Didáctica de las Ciencias y la Matemática*. Buenos Aires: Ediciones Colihue.
- Kampourakis K. (2014) *Understanding evolution*. New York: Cambridge University Press.
- Kress G., Jewitt C., Ogborn J., Tsatsarelis C. (2001) *Multimodal teaching and learning: the rhetorics of the science classroom*. London: Continuum.
- Mead L., Scott E. (2010) Problem concepts in evolution part I: Purpose and design. *Evolution: Education and Outreach* 3, 78-81.
- Nehm R., Ridgway J. (2011) What do experts and novices "see" in evolutionary problems? *Evolution: Education and Outreach* 4, 666-679.
- Passmore C., Stewart J. (2002) A modeling approach to teaching evolutionary biology in high schools. *Journal of Research in Science teaching* 39 (3), 185-204.
- Peterfalvi B. (2001) Identificación de los obstáculos por parte de los alumnos. En A. Camilloni (Comp.), *Los Obstáculos Epistemológicos en la Enseñanza* (pp. 127-168). Barcelona: Gedisa.

- Pintrich P. R. (2002) The role of metacognitive knowledge in learning, teaching, and assessing. *Theory into Practice* 41 (4), 219-225.
- Rivas M.L., González García F. (2016) ¿Comprenden y aceptan los estudiantes la evolución? Un estudio en bachillerato y universidad. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 13 (2), 248-263. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10498/18287>
- Samarapungavan A., Wiers R. (1997) Children's thoughts on the origin of species: A study of explanatory coherence. *Cognitive Science* 21(2), 147-177.
- Sanmartí N. (2000) El diseño de unidades didácticas. En F. Perales Palacios, P. Cañal de León (Eds.), *Didáctica de las Ciencias Experimentales* (pp. 239-266). Alcoy: Marfil.
- Schraw G., Olafson L., Weibel M., Sewing D. (2012) Metacognitive knowledge and field-based science learning in outdoor environmental education program. En A. Zohar, Y. Dori (Eds.), *Metacognition in Science Education. Trends in Current Research* (pp. 57-77). New York: Springer.
- Sensevy G., Tiberghien A., Santini J., Laubé S., Griggs P. (2008). An epistemological approach to modeling: Cases studies and implications for science teaching. *Science Education* 92 (3), 424-446.
- Smith M. (2010a) Current status of research in teaching and learning evolution: II. Pedagogical issues. *Science and Education* 19, 539-571.
- Smith M. (2010b) Current status of research in teaching and learning evolution: I. Philosophical/Epistemological issues. *Science and Education* 19, 523-538.
- Sterelny K., Griffiths P. (1999) *Sex and Death. An introduction to philosophy of biology*. Chicago: The University Chicago Press.
- Thagard P., Findlay S. (2010) Getting to Darwin: Obstacles to accepting evolution by natural selection. *Science and Education* 19, 625-636.
- Verhoeff R., Boersma K., Waarl A. (2013) Multiple representations in modeling strategies for the development of systems thinking in biology education. En C. Tsui, F. Treagust (Eds.), *Multiple Representations in Biological Education* (pp. 331-348). New York: Springer.
- Werth A. (2012) Avoiding the pitfall of progress and associated perils of evolutionary education. *Evolution: Education and Outreach* 5 (2), 249-265.
- Zohar A., Ginossar S. (1998) Lifting the taboo regarding teleology and anthropomorphism in biology education-heretical suggestions. *Science Education* 82 (6), 679-697.

Agradecimientos

Agradecemos al CONACYT México, por su apoyo a través del proyecto SEP-SEB 2014-01, No. 240192; a la Universidad de Buenos Aires por la beca doctoral del primer autor, incluida en la Programación Científica 2014-2017, UBACyT, 20020130100251BA. También al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.