



la
CIENCIA
en el
AULA

Lo que nos
dice la ciencia
sobre cómo
enseñarla

Gabriel
Gellon
Elsa
Rosenvasser Feher
Melina
Furman
Diego
Golombek

 siglo veintiuno
editores

colección
educación que aprende

Introducción

Este libro está dirigido a docentes de ciencia, específicamente a profesores de física, química y biología de nivel medio, pero también a aquellos educadores, directivos y científicos interesados en la educación en ciencias. Las propuestas de esta obra provienen de la experiencia de los autores en su trabajo como científicos de diversas disciplinas (física, genética, neurobiología) y como educadores y formadores docentes de variados niveles y formatos (inicial, primario, secundario, universitario, en museos, al aire libre).

El propósito de este libro es discutir formas de mejorar la enseñanza de las ciencias en el nivel secundario. Esto supone que la enseñanza actual, o al menos la tradicional, no cumple efectivamente con su objetivo educativo. ¿Cuál es este objetivo y qué evidencias tenemos de que la educación tradicional no logra alcanzarlo? ¿Cuáles son las propuestas recientes para resolver este problema? ¿Cómo se encuadran las propuestas del presente libro dentro de las visiones actuales de la educación en las ciencias? Estas son las preguntas que intentaremos explorar en la presente introducción.

La tesis central de este libro es que las ideas que produce la ciencia están indisolublemente ligadas con la forma en que son producidas. Sostenemos que esta conexión es tan profunda que resulta imposible (o muy arduo) establecer una comprensión acabada de los conceptos científicos fundamentales sin un entendimiento más o menos cabal de cómo se arriba a esos conceptos a través de la investigación.

Las ideas producidas por la ciencia tienen sentido para los científicos porque estos entienden cómo se ha manejado la evidencia, hasta qué punto las aseveraciones parten de observaciones o de modelos teóricos, qué tipo de críticas y restricciones se han hecho a determinada línea argumental, qué significa el apoyo de la co-

munidad científica o el valor de una publicación, e incluso en qué contexto histórico o político se ha generado una idea. Es decir, los científicos están embebidos en el proceso de la creación científica. Por el contrario, la educación tradicional en el aula ignora casi por completo el proceso de generación de las ideas y enfoca su atención de forma casi exclusiva en el producto final de la ciencia. Esto hace que los alumnos lleguen a comprensiones superficiales y frágiles, cuando no francamente erróneas, de las ideas científicas. Es posible y, a nuestro criterio, imperativo generar una educación en las ciencias cuyo foco sea el proceso de construcción de las ideas, a fin de que los estudiantes comprendan a fondo el significado del conocimiento científico.

Debemos aclarar que, en este libro, cuando decimos “ciencia” nos referimos a las ciencias naturales, que incluyen disciplinas como la física, química, biología, geología, meteorología y astronomía. No consideramos entre ellas aquellas disciplinas que no estudian fenómenos de la naturaleza, como la matemática y las ciencias sociales. Por ende, cada vez que usemos las palabras “ciencia” o “ciencias” deberá entenderse que nos referimos a las ciencias naturales, a menos que se aclare lo contrario.

Una educación centrada en el proceso de construcción de las ideas científicas

Tradicionalmente, la educación ha consistido en la transmisión de un cuerpo de conocimientos, lo que supone que el profesor es el custodio del saber y los alumnos son *tabulas rasas* que, como un disco a grabar o un cesto vacío, deben llenarse de contenido. La educación en ciencias en el nivel secundario ha girado en torno a un programa de contenidos “canónicos” impartidos en clases teóricas magistrales, clases de laboratorio “confirmatorias” en las que el alumno se familiariza con aparatos, drogas y procedimientos y comprueba las ideas formuladas en la clase teórica y clases de resolución de problemas, para practicar los razonamientos y aplicaciones del tema en una serie de ejercicios. Aunque como concepción pedagógica este enfoque se considere hoy anticuado, las investigaciones muestran que en la práctica se sigue usando extensamente (Valverde y Näslund-Hadley, 2010; Furman, 2017). Posiblemente, porque

no les resulta claro a muchos docentes cómo encarar la enseñanza de otra forma. De esto, en parte, trata este libro.

El enfoque actual de la enseñanza de las ciencias, alineado con el gran paradigma conceptual del constructivismo y avalado por décadas de investigación académica, sostiene que los alumnos, lejos de ser recipientes vacíos, llegan al aula con ideas que son fruto de sus experiencias previas. Sobre la base de estas ideas y de sus interacciones con la realidad física y social del aula, los alumnos construyen nuevos conocimientos. Desde esta perspectiva, una de las tareas del docente debería ser ayudar al alumno a tomar conciencia de sus propias ideas preexistentes, dándole oportunidad para confrontarlas, debatirlas, afianzarlas o usarlas como andamiaje para llegar a ideas más sofisticadas. En suma, el alumno elabora o construye en forma activa su conocimiento y deja de ser un recipiente pasivo a la espera de material que le llega de afuera. Y el docente debe convertirse en facilitador y guía de este aprendizaje activo de sus alumnos.

Esta visión actual de la enseñanza cobra fuerza a partir de la década del setenta. En esos años aparecen, en forma independiente pero paralela, tres movimientos que buscan formas novedosas de comprender cómo los alumnos construyen su propio entendimiento, y de poner en práctica los resultados. Revisemos brevemente estos movimientos. Por un lado, las sociedades científicas abrieron nuevas secciones en sus congresos, en especial dedicadas a la presentación de trabajos de investigación sobre las dificultades de los alumnos para aprender conceptos científicos. Estas investigaciones diferían de manera fundamental de los trabajos educativos tradicionales que se centraban en análisis estadísticos del desempeño de los alumnos en pruebas y exámenes. Los nuevos trabajos, más bien, eran estudios cualitativos que buscaban precisamente el detalle que se esfuma en los tratamientos estadísticos. Las metodologías se importaban de las ciencias sociales: algunos eran estudios de casos discretos; otros usaban entrevistas abiertas al estilo de Piaget; otros comparaban las estrategias de novicios y de expertos para resolver problemas. Los investigadores no eran ya educadores interesados en la enseñanza de la ciencia, sino científicos interesados en cuestiones de aprendizaje.

En esta época también nace la “ciencia de la cognición”, un campo interdisciplinario en la intersección de la biología, la inteligencia artificial, la psicología y la filosofía (Gardner, 1996). Esta ciencia busca entender cómo los seres humanos pensamos, resolvemos pro-

blemas, formamos conceptos. El surgimiento de la ciencia cognitiva representó una verdadera revolución ya que, previamente, los conductistas (también llamados “behavioristas”) sostenían que sólo era posible estudiar las respuestas a estímulos de un organismo que aprende y, desde esa perspectiva, la mente del estudiante o “aprendedor” permanecía como una incógnita, una caja negra de la que nada podía inferirse (recordemos, por ejemplo, los estudios en los que se mide el aprendizaje mediante la toma de pruebas a los alumnos preenseñanza y posenseñanza de un módulo académico, en las que no se evalúa el proceso de pensamiento). Por el contrario, para los científicos de la cognición lo verdaderamente interesante es lo que sucede dentro de la cabeza del que aprende y la disciplina reúne una gran variedad de formas de encarar el problema.

Al mismo tiempo en que nace la ciencia cognitiva y surgen los trabajos de investigación sobre los procesos de aprendizaje de las ciencias, aparecen, también, los primeros museos de ciencia participativos. La base pedagógica de estos museos, sin duda articulada en el Exploratorium de San Francisco, en los Estados Unidos, es que para aprehender un fenómeno de la naturaleza es necesario tener la oportunidad de experimentar y explorar cómo se manifiesta. O sea que un estudiante necesita involucrarse total y activamente con el fenómeno para llegar a comprenderlo a fondo. Estos museos novedosos (y muy exitosos por la cantidad de público que los visita) permiten, a niños y adultos por igual, una exploración libre de los fenómenos naturales que es inusual (o inexistente) en las aulas.

Más recientemente, la investigación en educación de las ciencias se ha centrado en las prácticas de enseñanza y su impacto en los aprendizajes. Así, la investigación en didáctica de las ciencias toma en cuenta las representaciones de los docentes acerca de la naturaleza de las ciencias como objeto de enseñanza, las prácticas de los docentes de ciencias en ejercicio y, en especial, la relación entre los enfoques y las estrategias de enseñanza y los aprendizajes que se logran en los estudiantes, contemplando tanto el aprendizaje conceptual como el desarrollo de capacidades o competencias científicas.

El saldo de los más de cuarenta años en los que estos enfoques han prosperado y nos han enriquecido es el legado de importantes conocimientos sobre cómo los alumnos aprenden ciencia. Y la certeza de que la enseñanza tradicional deja importantes huecos en el proceso de comprensión de los estudiantes.

Los estudios pormenorizados de la adquisición de conceptos científicos sugieren, en muchos casos, formas de abordaje, secuencias de ideas o tipos de actividades que promueven la comprensión de dichos conceptos. De manera general, para que los estudiantes construyan un edificio de conocimientos sólido, la experimentación, las preguntas frecuentes, el diálogo socrático,¹ los razonamientos rigurosos, lógicamente consistentes y carentes de circularidades, el debate de ideas y la reflexión sobre el propio proceso de aprendizaje resultan necesarios. Todas estas son facetas del buen pensar en la clase de ciencias. Pero también son características distintivas del pensamiento de los científicos cuando hacen investigación. O sea, sostenemos que para lograr una verdadera comprensión del conocimiento científico es indispensable saber cómo se adquiere ese conocimiento, no sólo de manera teórica sino experimentando la construcción del conocimiento en carne propia, de manera colaborativa y acompañada de una reflexión posterior que haga consciente lo aprendido. De ahí deriva nuestra tesis central: la construcción del conocimiento científico en el aula debe reflejar de alguna manera la construcción del conocimiento científico por parte de los investigadores profesionales. La cuestión clave, entonces, es cómo promover en el aula la construcción por parte de los alumnos de los conceptos que deseamos enseñar.

La ciencia y el aula

Hemos hablado de “construcción de ideas científicas” utilizando dos acepciones diferentes. Por un lado, nos referimos a la construcción social del conocimiento científico, es decir, a la manera en que la humanidad, a través de la actividad científica, construye un cuerpo de conocimientos. Por otro lado, nos referimos a la tarea individual que cada alumno realiza para incorporar los nuevos conocimientos a su esquema de saberes previos. Estas dos actividades, si bien

1 Se le atribuye a Sócrates la técnica de enseñar mediante la formulación de preguntas. Por ello se dice que una técnica educativa es “socrática” cuando el docente induce la aparición o el desarrollo del conocimiento mediante preguntas, en lugar de explicitar dichos conocimientos al alumno.

son descriptas ambas como “construcción de ideas científicas”, comprenden procesos cognitivos y sociales muy distintos.

La diferencia más significativa entre ellas es que la comunidad científica genera nuevo conocimiento en las fronteras de lo que se conoce, mientras que en el aula los alumnos construyen conceptos que, si bien son nuevos para ellos, han sido previamente validados por la ciencia.

¿Cómo podemos acercar el proceso de aprendizaje de ciencias en el aula al proceso de indagación científica de los científicos? Hay aspectos fundamentales de la actividad científica que pueden ser incorporados al aula y que, según nuestra experiencia, mejoran y enriquecen el aprendizaje y la enseñanza de las ciencias. De primerísima importancia en el aula, a nuestro criterio, son los aspectos *empírico, metodológico, abstracto, social y contraintuitivo* de la ciencia, que elaboramos a continuación.

Para empezar podemos reconocer que la investigación científica busca producir descripciones y explicaciones de la realidad o, dicho de otro modo, dar cuenta de lo que percibimos con nuestros sentidos. Esta es una diferencia sustancial con otras disciplinas como la lógica (donde lo que importa es la consistencia interna), la ética o la literatura. En ciencias, el árbitro final de nuestras aseveraciones es lo que observamos (al margen de las limitaciones inherentes a cualquier observación). En el aula, la fuente última del saber es tradicionalmente el docente o el libro de texto. Pero un estudiante que nunca puede apreciar hasta qué punto las ideas científicas derivan del estudio de una realidad externa a nosotros, tendrá una concepción distorsionada del valor de un enunciado científico. Si en nuestras clases de ciencia la respuesta siempre está en los libros y nunca en los resultados de los experimentos, estamos proveyendo una visión mutilada o falsa de la ciencia. Esta conexión indisoluble entre las ideas científicas y lo que experimentamos con nuestros sentidos es lo que llamamos el “aspecto empírico de la ciencia”. Ahondaremos en este aspecto en el capítulo 1, y en los capítulos 2 y 3 daremos ejemplos concretos de cómo incorporarlo a nuestras actividades en el aula.

¿Debemos concluir de lo antedicho que hay que desterrar las clases expositivas tradicionales e instituir únicamente clases de laboratorio? ¿Es el problema principal de la educación en ciencias la falta de experimentos en el aula? Podríamos pensar que si hacemos expe-

rimentos el aspecto empírico tiene que estar presente, pero esto no es así. Es totalmente posible realizar experimentos y experiencias de laboratorio de forma mecánica, repitiendo recetas; y, si bien en una clase práctica los estudiantes pueden familiarizarse con aparatos y procedimientos, esto no garantiza la comprensión conceptual. La genuina actividad mental consiste en hacerse preguntas, indagar, compartir las ideas propias, ser capaz de defenderlas y cuestionar las de otros. Si hablamos del rol activo del estudiante nos referimos a la actividad cognitiva y no al mero hacer. Una clase teórica puede hacer referencia clara y sin ambigüedades a la evidencia empírica que sostiene una idea o determinado modelo. Esta actitud, sin experimento alguno, es ya un enorme paso hacia la incorporación del aspecto empírico de la ciencia en el aula.

Además de su estrecha relación con la realidad a estudiar, la ciencia se caracteriza por el conjunto de herramientas del pensamiento y la indagación conocidas bajo el nombre general de “método científico”. Se trata de un cúmulo de procedimientos, estrategias y técnicas que llamamos el “aspecto metodológico de la ciencia”. Como discutiremos en el capítulo 4, el método científico no es una receta única e infalible que puede aplicarse paso a paso en todos los experimentos. Pero si queremos que los alumnos entiendan cómo se hace ciencia y cómo llegamos a saber lo que sabemos, la metodología científica en sus distintas formas (en especial la indagación y el debate de ideas a partir de evidencias) tiene que ser protagonista permanente de la clase de ciencias. En los capítulos 5 y 6 ilustraremos la incorporación de esta dimensión de la ciencia al aula.

A estos dos aspectos fundamentales de la ciencia –su conexión rigurosa con la realidad de los sentidos y su elaborado arsenal de métodos de indagación– debemos agregar otros, igualmente característicos y definitorios, que limitan y contextualizan a los primeros dos. Muchas de las ideas más importantes en ciencia no se derivan de manera directa de la observación de la realidad, sino que son el fruto de la imaginación humana. En general, estas ideas impuestas sobre la realidad desde la mente humana se denominan “modelos teóricos”, “teorías” o “construcciones teóricas”. Las nociones de gen, átomo o energía han sido grandes actos de creación, ideas inventadas para explicar la realidad, pero no derivadas directamente de la simple observación. Las nociones teóricas tienen un rol central dentro del pensamiento científico, no sólo por su alcance explicativo,

sino porque además moldean aquello que consideramos o juzgamos relevante en una observación. Es por lo tanto crucial que los estudiantes de ciencia en un aula aprecien cómo surge y se valida una idea teórica, y cómo cambia con el tiempo por una combinación de evolución interna, fuerzas sociales y evidencia empírica. Estas ideas abstractas que se inventan para explicar la evidencia empírica constituyen lo que llamamos el “aspecto abstracto de la ciencia”. Si un estudiante no logra distinguir con claridad entre una idea derivada de la observación directa y otra inventada para acomodar observaciones, no sólo no podrá entender de manera cabal la dinámica interna del proceso científico, sino que tendrá una visión frágil y caricaturizada de conceptos científicos importantes.

Así como las teorías moldean nuestras observaciones, también las fuerzas sociales dentro y fuera de la comunidad científica determinan lo que conocemos y cómo lo conocemos. Tanto la formulación de ideas por parte de los científicos como la construcción de conocimiento por parte de los estudiantes son procesos sociales en los que los participantes interactúan unos con otros para poner a prueba sus ideas y verificar si encajan con las de los demás. En la actualidad se reconoce que el aspecto social del aula es un instrumento importante para una educación eficaz, un instrumento que está ausente de las clases en que el profesor expone los contenidos y los estudiantes toman nota y resuelven problemas sin interactuar entre sí. El “aspecto social de la ciencia” difiere de su contraparte en el aula, y es necesario resaltar esa diferencia para poder hacer al aula más “científica”. Mientras que en el aula puede existir un árbitro con autoridad, como puede ser el docente o el libro de texto, la actividad científica construye sus conocimientos mediante el consenso informado de una gran multitud de participantes, ninguno de los cuales es depositario a priori de la verdad. El proceso de crítica y mutua corrección por pares es característico de la ciencia y aparece en los sistemas de referato para la publicación de artículos en revistas profesionales y para la evaluación de proyectos de investigación. Las ideas o explicaciones a las que la ciencia arriba no resultan “ciertas” mediante criterios objetivos, infalibles y externos al grupo que debate sobre ellas; más bien se aceptan cuando la vasta mayoría de los participantes está convencida más allá de toda duda razonable.

A veces los estudiantes (o el público lego en general) miran con aprehensión este aspecto de la ciencia, como si negara todos los

demás. Si todo depende de consensos y no hay criterios “objetivos”, definitorios, ¿entonces la ciencia es un mero juego subjetivo en el que cualquier respuesta es válida? Para comprender que no es así, los estudiantes deben de alguna manera participar de la generación de conocimiento en grupo, a través de discusiones e intentos de persuasión, en los cuales la evidencia empírica y la lógica interna cumplen un papel central. Este tipo de experiencia lleva a los alumnos a entender que muchas veces los contextos culturales e históricos afectan a –y son afectados por– las ideas científicas en boga, y que tabúes culturales o personalidades intimidantes pueden determinar qué problemas se investigan y qué descubrimientos son viables.

Todo esto parece sugerir que la base de una eficaz y rica educación científica consiste en reproducir en el aula las condiciones de producción de conocimiento que encontramos en el laboratorio o equipo de investigación, es decir, permitir que los estudiantes se sumerjan en el libre juego de hacer ciencia como los científicos. Una posibilidad sería exponer a los estudiantes a un problema o serie de problemas reales, o a una colección de fenómenos desafiantes, y dejar que ellos mismos generen las ideas y descubran las leyes científicas. Este método de “jugar con las cosas y ver qué es lo que sucede”² puede ser estupendo en la escuela primaria, pero no se puede pretender que niños o adolescentes descubran por sí mismos las ideas sutiles y poderosas de la ciencia.

Ocurre que muchas de las ideas importantes del conocimiento científico son profundamente contraintuitivas, y no se llega a ellas mediante las formas naturales de pensamiento del común de la gente. En otras palabras, podemos apostar que librados a su propio “descubrimiento” los estudiantes no siempre llegarán a las ideas y comprensiones buscadas por el docente. Con frecuencia la ciencia es un desafío al sentido común. No sólo las ideas científicas suelen ser difíciles, sino que la forma de pensar que caracteriza a la investigación científica debe ser enseñada y aprendida. A este aspecto crítico del pensamiento científico lo denominamos el “aspecto contraintuitivo de la ciencia”. Lo trataremos en detalle en el capítulo 13, y en los capítulos 14 y 15 daremos ejemplos de las formas en que el pensamiento

2 Llamado “enfoque por descubrimiento espontáneo”, o *discovery learning* en la literatura en inglés.

cotidiano, basado en el sentido común, dificulta el acceso a ciertas ideas científicas, y de cómo se puede allanar el camino a los alumnos.

En definitiva, la misma investigación que muestra lo inadecuado de la educación tradicional nos alerta sobre esquemas basados en la exploración sin guía por parte de los estudiantes. Es importante que los estudiantes formulen sus propias hipótesis y aprendan de otros más avezados cómo comprobarlas o refutarlas. Es importante que aprendan a realizar observaciones y extraer conclusiones de ellas, a hacer simplificaciones y generar modelos, a identificar los supuestos implícitos y tantos otros trucos del pensamiento científico. Una clase teórica clásica no puede brindar todas estas herramientas, pero tampoco pueden surgir del mero juego. El docente debe crear las condiciones que resulten una guía eficaz para la indagación y el desarrollo de las ideas científicas por parte de los alumnos.

Estructura del libro

Este libro consta de cinco partes, cada una de las cuales examina uno de los aspectos de la ciencia que hemos descripto en esta introducción. Cada parte comienza con un capítulo en el que se discute el aspecto en cuestión, mostrando cómo se expresa en el quehacer científico, cómo se puede llevar al aula y qué prácticas pedagógicas se pueden usar para incorporarlo a la tarea educativa. Cada uno de estos capítulos expositivos va acompañado de dos capítulos ilustrativos en los cuales se dan ejemplos concretos de actividades educativas que incluyen las prácticas pedagógicas sugeridas.

Ofrecemos ejemplos que ilustran una variedad de formatos, desde prácticas de laboratorio y clases altamente centradas en el docente, hasta guías de indagación mediante las cuales los estudiantes pueden construir su propio conocimiento, incluyendo también teatralizaciones y discusiones abiertas. En cuanto al contenido, hemos incorporado ejemplos de varias disciplinas, como la química, biología, física y astronomía, entre otras.

Creemos que los ejemplos sugeridos exploran una cantidad suficiente de temas y formatos como para dejar al lector con la idea de que nuestro enfoque puede usarse en una gran variedad de circunstancias, y que no sólo es posible sino deseable que los docentes experimenten con sus propias actividades. Como en la investigación

científica, la innovación en el aula depende en gran medida de la creatividad individual y también, creemos, de la crítica mutua y la exploración conjunta. Al igual que en la investigación científica, para llegar a buen puerto en la enseñanza no existe un método único o una receta infalible. Pero cuanto más involucrados estemos en el proceso de desarrollo de las ideas, más maravilloso será el resultado.

PARTE I

El aspecto empírico de la ciencia

1. El mundo de los fenómenos

En este capítulo iniciaremos nuestra discusión acerca de los atributos que caracterizan a la actividad científica y que, de acuerdo con nuestra postura, deberían ser introducidos en el ámbito de la enseñanza. El primero de estos aspectos de la ciencia es quizás uno de los más prominentes pero, a la vez, también uno de los más fáciles de olvidar a la hora de enseñar. Se trata de la indisoluble conexión entre las ideas científicas y el mundo de los fenómenos que esas ideas buscan explicar.

La estrecha conexión entre el conocimiento científico y el mundo físico a nuestro alrededor es consecuencia del propósito fundamental de la actividad científica. Las ciencias naturales constituyen un intento de lograr descripciones precisas y explicaciones comprensivas del mundo que nos rodea y esto supone la existencia de una realidad que aprehendemos con nuestros sentidos. El conocimiento científico se corrobora mediante la repetición de observaciones de –y experimentos sobre– esta realidad, y por lo tanto lo que afirmamos *científicamente*³ está conectado en última instancia con nuestra experiencia sensorial. Esto es lo que llamamos el “aspecto empírico de la ciencia”.

Como veremos a lo largo de este capítulo, existen varias características de la enseñanza tradicional que producen un cortocircuito con este aspecto de la ciencia. El uso del libro de texto como fuente última de autoridad, la ausencia de clases prácticas o de laboratorio,

3 Afirmar científicamente implica que la afirmación cumple con varios requisitos que iremos dilucidando a lo largo de este libro. Hay otros tipos de afirmaciones, por ejemplo, las que se basan en una doctrina o fe religiosa, en un sistema legal o en un credo artístico. Estas no tienen por qué ser menos válidas que las científicas, pero pueden ser muy diferentes.

o la introducción prematura de terminología científica, es decir, antes de la comprensión de las ideas que le dan origen, son ejemplos de las numerosas prácticas en el aula que nos alejan de la ciencia como realmente es y nos conducen a clases que no reflejan la lógica o la filosofía de una mente de veras “científica”. En este capítulo queremos discutir con cierto detalle en qué consiste el aspecto empírico de la ciencia, cómo se manifiesta en el quehacer del investigador científico y cuándo y de qué maneras está ausente en las actividades del aula. Por último, analizaremos qué tipo de actividades o actitudes por parte del docente pueden reforzar este aspecto de la ciencia en el trabajo con los estudiantes.

El aspecto empírico de la ciencia

Para un científico, las respuestas a sus preguntas deben estar avaladas por observaciones o experimentos. El conocimiento científico no es exclusivamente una construcción del pensamiento:⁴ los productos del pensamiento puro, por más bellos que sean, no constituyen conocimiento científico si no dan cuenta de la realidad que buscamos explicar o describir. Por supuesto, parte de la actividad cotidiana de los investigadores radica en la construcción de modelos teóricos acerca de los más diversos tópicos, tema que abordaremos en el capítulo 7. Pero esos modelos sólo serán considerados válidos en tanto y en cuanto se ajusten a observaciones y resultados experimentales.

Una de las diferencias fundamentales entre la investigación científica y la enseñanza de las ciencias es que la primera busca producir ideas nuevas y, por lo tanto, el territorio que el científico explora es desconocido. Esto no es necesariamente así en la enseñanza de las ciencias: si bien el conocimiento a adquirir es desconocido por el alumno, el docente sabe por lo general muy bien adónde hay que ir, cuál es el rumbo del “descubrimiento” y su meta final. Es más, el alumno sabe que el docente conoce ese camino y espera, por lo tanto, que le sea revelado o, por lo menos, ser guiado hacia él.

4 En el sentido en que lo es la matemática, disciplina en la que, dados los axiomas, lo demás son deducciones que no necesitan una ratificación empírica.

Como el camino está trazado, es fácil olvidar en el aula los orígenes empíricos de las ideas científicas y quedarse con el resultado final, sin tener en cuenta cómo esas ideas se conectan con evidencias en el mundo de los fenómenos (o, incidentalmente, olvidando también sus bases históricas y las posibles controversias que hubieran aparecido en el trayecto). Esto se da en extremo si se utiliza una forma declarativa de enseñanza de las ciencias, en la que el docente (o el libro de texto) les cuenta a los alumnos cómo “es” la realidad. En este caso, la fuente fundamental del saber no es la observación o el experimento, sino la palabra consagrada en el libro de texto o en la autoridad del docente.

Si queremos, por lo tanto, llevar adelante clases de ciencias con espíritu científico, deberemos volcar gran parte de nuestros esfuerzos en basar el aprendizaje en los fenómenos y evitar la palabra revelada (en un sentido didáctico, no religioso) como fuente de conocimiento. Por otro lado, sabemos que es imposible que los estudiantes descubran nuevamente, por sí mismos, aquello que las mentes más brillantes de la humanidad tardaron siglos en develar. Estamos por lo tanto ante un complejo problema: cómo preservar un aspecto fundamental de la actividad científica en el contexto del aula.

Contacto directo con los fenómenos

Reconocer el carácter empírico de la ciencia en el aula implica, ante todo, poner a los estudiantes en contacto con el mundo de los fenómenos. Thomas Huxley, uno de los primeros científicos en sostener la importancia de introducir la ciencia en las escuelas, sostenía ya a fines del siglo XIX que

la gran peculiaridad del entrenamiento científico [...] es poner a la mente en contacto directo con los hechos, y [...] extraer conclusiones de hechos particulares conocidos a través de la inmediata observación de la naturaleza (cit. en De Boer, 1991).

Es importante reconocer dentro del currículo cuáles son aquellos fenómenos que no les son familiares a los estudiantes e incluirlos de alguna manera en los contenidos a enseñar en clase. ¿Qué sentido

tiene explicarles a los alumnos por qué suceden cosas que ellos ni siquiera saben que suceden? Según nuestra experiencia, por ejemplo, los estudiantes de secundaria tienen poca exposición a fenómenos de cambio de estado. Saben que el agua se congela y evapora, pero rara vez han sido conducidos a observar que otras sustancias también son capaces de estos cambios. Los chicos de hoy muy excepcionalmente han visto fundir un metal. Cuando un trozo de parafina se derrite, con frecuencia llaman “agua” a la cera derretida. Así, cuando hablamos de cambios de estado y su interpretación molecular, nos estamos refiriendo a una teoría alejada de las vivencias de los alumnos. Y por eso consideramos fundamental que, en la medida de lo posible, los alumnos adquieran experiencia “de primera mano” sobre los fenómenos que queremos explicar.

Al observar fenómenos es importante dar a los estudiantes la oportunidad de formar sus propias ideas sobre lo que ocurre y de dar sus propias hipótesis antes de introducir la explicación científica. Es deseable también inducirlos a formular predicciones, en especial aquellas que se puedan verificar experimentalmente. He aquí un ejemplo. En el patio de la escuela cada alumno tiene una tarjeta en la que ha hecho un pequeño agujero redondo y, de espaldas al sol, mira la sombra de la tarjeta en el suelo y la luz en forma de círculo en el medio. Preguntamos: “¿Qué vamos a ver en medio de la sombra de la tarjeta si hacemos un agujero cuadrado pequeño?”. Predicciones: “un cuadrado”, dicen los que opinan que la forma de la imagen es la del agujero; “un círculo”, dicen los que opinan que la imagen es redonda como el objeto luminoso (el sol).⁵ Ahora, y sólo cuando los alumnos están comprometidos con su predicción explicada, se hace la prueba.

Esta es, en parte, la estrategia de los museos de ciencias participativos, que surgieron para contrarrestar la tendencia centrada en los libros, teórica y abstracta, que invadía las escuelas. Los módulos más exitosos en estos centros participativos son aquellos que ponen al visitante en contacto directo con fenómenos básicos de la naturaleza y dan suficiente flexibilidad a las manipulaciones como para que el visitante se haga preguntas del tipo: “¿Qué pasaría si muevo esto acá o si pongo esto otro allá?”, y pueda contestarlas allí, interactuando

5 En el capítulo 14 discutiremos fenómenos parecidos a este con más detalle.

con el módulo. Estos mismos criterios pueden ser usados exitosamente para el diseño de actividades dentro del aula.

Otra estrategia interesante es exponer a los alumnos a fenómenos llamativos para los que no hay una explicación evidente. Por ejemplo, mostrarles una mesa que “levita” sobre cuatro globos inflados, uno debajo de cada pata, sosteniendo el peso de dos alumnos sentados sobre ella. Estos fenómenos *discrepantes* (Harcombe, 2001), llamados así porque no concuerdan con lo que los alumnos esperan ver, generan no sólo curiosidad sino una necesidad genuina de comprender por qué sucede lo que tienen ante sus ojos. Cuando las observaciones resultan difíciles de conciliar con experiencias previas, se convierten en problemas para resolver y desafían a buscar nuevas explicaciones.

Uso y abuso de las palabras

Presentar en clase abundantes experiencias que pongan a los estudiantes en contacto con la realidad que se busca explicar es un buen comienzo para llevar el aspecto empírico de la ciencia al aula. Pero hay que prestar atención al uso de prácticas verbales que puedan interferir, insidiosamente, con este buen comienzo. La instrucción en ciencias está plagada de terminología técnica, y la manera en que introduzcamos esta terminología tendrá un profundo impacto en la idea que los estudiantes se hagan de la ciencia y sus modos de trabajo (Gellon y Furman, 2011).

Tomemos el ejemplo del fenómeno discrepante del apartado anterior (la mesa que “levita” sobre globos inflados). A lo largo de esta investigación, podremos introducir términos técnicos como “presión” y “fuerza” a medida que los alumnos necesiten nombrar los fenómenos que están observando y describiendo. Por el contrario, si ha sido definida desde un comienzo, estaremos poniendo el énfasis en la terminología, no en las ideas asociadas, y, de ese modo, estaremos consagrando a la palabra y no a los fenómenos como fuente de saber. Por ejemplo, un profesor que empieza la clase diciendo: “Hoy abordaremos el tema ‘fuerzas’. Chicos, ¿qué entienden ustedes por ‘fuerza’?”, parece indicar que el conocimiento reside en entender el significado de la palabra “fuerza”, que puede buscarse en el diccionario. El objeto de la física no es develar el significado de la

palabra “fuerza” sino entender cómo interactúan los objetos materiales unos con otros y cómo esas interacciones afectan el movimiento de los objetos. Una clase de ciencias no debe buscar darles significado a los términos. Por el contrario, los términos deben acuñarse justamente para poder referirse a fenómenos presenciados e ideas formuladas que se conocen pero no han sido nombrados todavía.

Con frecuencia los estudiantes creen que nombrar un fenómeno es entenderlo, que comprender radica en nombrar algo o referirse a terminología sofisticada. “¿Por qué caen las cosas?”, pregunta, por ejemplo, el profesor.

“Por la gravedad”, contestan los estudiantes, sin agregar ninguna claridad al asunto. Decir “gravedad” no explica el fenómeno, simplemente lo nombra. Será importante entonces exponer a los estudiantes a las formas en que las ideas se desarrollan y evolucionan en ciencia, y tener un especial cuidado en cómo, cuándo y por qué se introducen en clase los términos técnicos, poniendo el énfasis en los fenómenos y conceptos involucrados y no en las palabras que los denotan.

Richard P. Feynman, un físico que fue galardonado con el Premio Nobel en 1965, cuenta que su forma de pensar (¡que era poderosísima!) fue muy influida por su padre, quien lo llevaba a caminar cuando era chico y le mostraba los pájaros y las plantas. El padre le decía: “No importa cómo se llama. Lo que importa es que es marrón con el pecho amarillo y del tamaño de un gorrión y vive en clima frío y...”. En otras palabras, lo importante eran las características físicas y el comportamiento del pájaro. Así, en otro lugar, en otro país y con otro idioma, se podía individualizar al pájaro sin tener que saber su nombre (claro está que a los efectos de la comunicación con otra gente, conocer el nombre del pájaro no está de más, pero esa es otra cuestión).

Al ceñirnos lo más estrictamente posible a esta secuencia *fenómeno-idea-terminología*, estamos utilizando la secuencia lógica que sigue la investigación científica. Comenzando por la introducción de una serie de fenómenos, y permitiendo que los estudiantes se familiaricen con ellos mediante el juego y la exploración, se podrán desarrollar las ideas fundamentales de la unidad que se está estudiando. Pero será importante concentrarse en los conceptos y en las ideas sin darles nombres particulares sino usando palabras de todos los días que permitan describir lo que se ve. Recién cuando las ideas hayan sido

comprendidas diremos: “Bueno, a esto que vemos aquí los científicos lo llaman”. El uso de esta secuencia puede hacerse explícito a los estudiantes de modo que se sumen conscientemente al esfuerzo de pensar las ideas primero y disponer de los términos técnicos cuando sea adecuado.

Veamos, como ejemplo, una estrategia que hemos usado con éxito para introducir el tema de las fuerzas balanceadas. Les damos a los estudiantes globos inflados con helio y ganchitos para papel. Los ganchitos son para colgar del hilo que sujeta el globo y así agregarle peso. Les pedimos a los alumnos que traten de lograr, con ayuda de los ganchitos, que los globos no suban ni bajen sino que queden suspendidos a una determinada altura en el aire. Durante esta actividad se discute en qué condiciones los globos suben, en cuáles bajan y en cuáles alcanzan un equilibrio. En sucesivas clases se expone a los alumnos a otros objetos en flotación y a los efectos balanceadores de los resortes. A partir de estas experiencias, hablamos luego de la cancelación de efectos, de la flotación, de cómo las superficies sólidas ejercen una fuerza contra los objetos que descansan en ellas... y todo ello sin introducir ningún término técnico. Al final, ponerle nombre (fuerza neta, fuerza normal, fricción, etc.) a esos fenómenos que ellos ya conocen bien por su propia experiencia resulta la parte más sencilla del proceso.

Definiciones operacionales y definiciones de corte teórico

La incorporación del aspecto empírico de la ciencia en el aula no involucra solamente fenómenos, experimentos, prácticas de laboratorio u objetos reales. La manera misma en que definimos un término técnico tiene impacto en cómo y hasta qué punto incorporamos los aspectos empíricos de la ciencia en el aula. Así, si definimos un término mediante una receta de operaciones prácticas a seguir, estamos dando lo que se llama una “definición operacional” (Hempel, 1973). Una definición operacional incluye formas de medición y criterios inequívocos. Por ejemplo, si decimos que “velocidad” es “el cociente entre la distancia recorrida por un objeto en movimiento y el tiempo que le tomó a ese objeto recorrer esa distancia”, está claro que la velocidad de un objeto se define mediante las siguientes operaciones: medir la distancia que recorre, determinar el tiempo

que le lleva recorrerla y dividir el primer número por el segundo. Si contrastamos esta definición con otras “estilo diccionario”, como “cuán rápido se mueve un objeto” o “celeridad en un movimiento uniforme”, veremos claramente la base empírica de la definición operacional (Bateson, 1990; Maturana y Varela, 1984).

Existe otro tipo de definiciones muy importantes en ciencia y que no son operacionales: son las definiciones de corte teórico en las cuales un término se define dentro de un marco teórico determinado. Por ejemplo, la teoría atómica provee un marco de referencia para definir toda una serie de términos. Una “sustancia” es un “sistema compuesto de sólo un tipo de molécula”. Un “elemento” es un “sistema compuesto de sólo un tipo de átomo”. Estas definiciones no son operacionales, ya que se basan en conceptos teóricos previos y no en operaciones a realizar. Una definición operacional de “elemento” es: “un sistema que no puede ser descompuesto mediante reacciones químicas en otros sistemas con propiedades distintas”.⁶ En otras palabras, si nos dan un frasco con un líquido desconocido y nos preguntan si se trata de un elemento, sólo tendremos que tratar de descomponerlo químicamente: si lo logramos, el líquido no es un elemento; si no lo logramos, el líquido es un elemento.

Los diferentes tipos de definiciones promueven distintos aspectos del conocimiento científico si son introducidos en el orden adecuado (Gellon y Furman, 2011). La definición operacional, por su naturaleza, evoca nuestra experiencia sensorial y el espacio donde se realizan las operaciones (laboratorio, campo, etc.), y de esa manera nos fuerza a un punto de vista empírico. Las definiciones teóricas, en cambio, surgen como fruto de los cuerpos de teoría, los cuales por lo general son elaborados a fin de dar sentido a una vasta gama de observaciones o fenómenos primarios. Es decir que el orden natural en la construcción de las ideas científicas por parte de los investigadores va desde observaciones crudas a edificios cada vez más complejos de teorías que buscan aunar dichas observaciones. La introducción demasiado temprana de definiciones de corte teórico viola esta secuencia propia de la

6 Esta definición asume que tenemos también definiciones operacionales de los términos “reacción química” y “descomposición”, pero ambas definiciones son posibles sin utilizar el término “elemento”.

ciencia y redundante en la mistificación de los términos usados. Introducir términos basados en edificios teóricos que aún no han sido levantados por los estudiantes es forzarlos a aceptar un conjunto de ideas sin fundamento racional, como conocimiento revelado en vez de construido. Las definiciones operacionales, por el contrario, refuerzan la idea de que los términos son usados para describir cosas concretas del mundo real. Ahondaremos en el tema de las construcciones teóricas al discutir los aspectos abstractos de la ciencia en la tercera parte de este libro.

Evolución de la terminología científica

La terminología científica es dinámica: los términos se definen y redefinen a lo largo de la historia a medida que los científicos aprenden más sobre los fenómenos que estudian. Será interesante exponer a los estudiantes a esta vivencia de que los términos científicos evolucionan junto con nuestra comprensión de la realidad. Por ejemplo, una clase de dinámica puede comenzar usando una definición simple del concepto de fuerza, basada en la sensación física de nuestros músculos. Luego puede introducirse una definición dentro del marco aristotélico de pensamiento, como “aquello que mueve las cosas” o “sin fuerzas no se puede sostener el movimiento”. Esta puede evolucionar a tiempos galileanos aceptando el principio de inercia: “una fuerza es aquello que inicia o detiene el movimiento pero no es necesaria para mantenerlo”. Así, a través de refinamientos puede llegarse a una definición que introduzca las leyes segunda y tercera de Newton y haga referencia a la aceleración. Normalmente los cursos de la escuela secundaria se detienen en esta definición como la correcta, pero un estudiante acostumbrado a percibir que las definiciones van cambiando a medida que refinamos nuestras ideas no se sorprenderá si en el futuro es necesario cambiarla una vez más para introducir nuevos refinamientos teóricos (por ejemplo, “fuerza es aquello que cambia la cantidad de movimiento de un objeto, considerando a la masa como función de la velocidad”).

Mostrar que los términos evolucionan en su significado es otra manera de bajar a las palabras de su pedestal de autoridad y convertirlas de a poco en nada más ni nada menos que herramientas de pensa-

miento y comunicación. Nuestros alumnos deberán apreciar que las palabras están al servicio de nuestro pensamiento y no al revés.

Las experiencias de laboratorio

Hemos dicho que la secuencia que usamos para desarrollar una idea puede tener impacto en cuán ajustada estará la clase a los aspectos empíricos de la ciencia. Esto es especialmente cierto en el caso de las prácticas de laboratorio. Una práctica de laboratorio en la cual sólo se verifica lo que se estudió antes en la clase teórica no promueve un pensamiento empírico. Por el contrario, sugiere que la verdad está en los libros o en la cabeza del profesor y que los experimentos son simplemente maneras de comprobar una de esas verdades, no una forma de descubrirlas. Una buena práctica en el aula es la de desarrollar ideas a partir de experiencias o prácticas de laboratorio y no al revés; en otras palabras, no utilizar las prácticas de laboratorio para demostrar o confirmar ideas desarrolladas en el pizarrón. Esta forma de proceder tiene la virtud de desterrar del aula la frase: “El experimento me dio mal”. ¿Cómo puede “dar mal” un experimento? Sólo si se sabe de antemano cuál “debería” ser la respuesta. Y aun así: si el experimento no dio el resultado esperado, se necesita hacer comprender al alumno que se obtuvo lo que tenía que dar *en las condiciones imperantes*. Quizás había un circuito mal armado –es decir, armado en forma distinta de la deseada– o tal vez la sustancia química usada no era pura como se creía sino que estaba contaminada. Buscar la fuente de la discrepancia entre el resultado real y el esperado es parte del hacer buena ciencia.

Más allá del experimento

El experimento no lo es todo y no todo es experimento. Esta palabra evoca cosas diferentes para alumnos y docentes y para científicos. Para un científico, un experimento es una manipulación deliberada de la realidad que se hace a fin de obtener una respuesta concreta a una pregunta o de poner a prueba una idea o hipótesis. En el contexto escolar, un experimento es algo manual que se hace en un laboratorio, en general usando materiales e instrumental específico.

Caen en esta categoría clases que, en realidad, son demostraciones y que muchas veces no movilizan la cognición de los chicos. Por suerte muchas de las tareas que se hacen en los laboratorios escolares pueden ser transformadas en un experimento de verdad o, al menos, en una actividad educativa que involucre a los estudiantes, los desafíe mentalmente y esté mucho más en sintonía con el aspecto empírico de la ciencia. En cambio a veces consiste simplemente en no dar la respuesta final antes de hacer la actividad, sino dejar que los alumnos se enfrenten, aunque sea por un momento fugaz, con la sorpresa y la necesidad de interpretar sus resultados. Furman (2007) propone varias formas de transformar lo que ella denomina “recetas de cocina” en buenas prácticas educativas para el aula de ciencia. Varios ejemplos de este tipo de propuestas pueden encontrarse en las secuencias didácticas del proyecto Escuelas del Bicentenario.⁷

Además, existe un sinfín de actividades que no son experimentos pero sí herramientas totalmente válidas del arsenal empírico de los investigadores científicos. Muchas ciencias –como la astronomía o áreas enteras de la geología, la biología y las ciencias de la atmósfera– trabajan sin hacer experimentos y sólo con observaciones. Las descripciones, clasificaciones, mediciones, los estudios de correlación son todas actividades de orden empírico que no son experimentales y cuya implementación en el aula es mucho más sencilla que un experimento (Gellon, 2008).

Construyendo ideas “desde cero”

Si quisiéramos respetar el aspecto empírico al máximo posible, deberíamos desarrollar actividades en las que las ideas se construyeran “desde cero”. En un programa de este tipo, los estudiantes empiezan usando sólo sus sentidos y su experiencia cotidiana, dejando conscientemente de lado conceptos y términos científicos escuchados o aprendidos con anterioridad. Por ejemplo, una investigación sobre el movimiento de la Tierra y el Sol puede introducirse así: “In-

7 Escuelas del Bicentenario: material para docentes de ciencias naturales, vols. de 1° a 6° grado, Buenos Aires, IIPE-Unesco, 2011. Información disponible en <educacion.udesa.edu.ar/ciencias/?page_id=14>.

tentemos olvidarnos de lo que conocemos sobre cómo se mueven la Tierra y el Sol, y vamos a tratar de explicarlo a partir de lo que nos dicen nuestros sentidos, como si fuéramos antiguos exploradores del cielo”. A partir de allí se desarrollan investigaciones o discusiones que van construyendo un tejido de conceptos: se suceden las observaciones, hipótesis y la construcción de modelos hasta desarrollar las ideas buscadas. En este esquema no existe un texto “verdadero” y la información que brinda el docente es muy limitada.

En este tipo de trabajo los estudiantes avanzan por un proceso de descubrimiento guiado, altamente digitado por el diseño del programa de enseñanza. En este abordaje, igual que en la investigación científica real, los conceptos se construyen sólo por lo que la experiencia requiere o permite: no se usan fórmulas del estilo “esto ha sido probado por otros científicos” o “esto es así porque lo digo yo”.

Existe un interesante programa de este tipo de abordaje “desde cero” que desarrolla todos los conceptos fundamentales de circuitos eléctricos (Steinberg y otros, 2004). Pero debe reconocerse que la creación de un programa de este tipo conlleva un trabajo formidable y supone múltiples evaluaciones con estudiantes. En los campamentos científicos organizados por Expedición Ciencia la mayor parte de las actividades parten “desde cero”. Esta tradición ha dado origen a materiales utilizables en el aula que incluyen actividades sobre circuitos eléctricos, carga electrostática, células y herencia, o destilación de madera.⁸

Uso de proxis y datos ajenos

Los científicos no siempre desarrollan sus ideas a partir de sus propios resultados experimentales u observaciones. Con mucha frecuencia analizan material ajeno y sacan de él sus propias conclusiones. Georges Cuvier, el padre de la paleontología, describió la anatomía del megaterio y, a partir de un dibujo del esqueleto que se encontraba en Madrid, determinó que se trataba de un animal extinto. Cuvier jamás vio los huesos originales, pero esto no le im-

⁸ Las actividades se pueden descargar desde el sitio web <www.expedicionciencia.org.ar>.

pidió publicar una interpretación seminal y revolucionaria de su significado. Muchas veces los paleontólogos recurren a calcos, fotos y dibujos para sus estudios.⁹ Este material, que no es el original o verdadero, funciona como un sucedáneo; con frecuencia se usa el término “proxi” para referirse a estos sucedáneos.

Si los propios investigadores pueden usarlos como si se tratara de la fuente primaria de información, bien pueden hacerlo nuestros alumnos en las aulas. Dibujos bien realizados, fotos y modelos pueden ser una fuente enorme de datos frescos a partir de los cuales los estudiantes pueden construir ideas en pleno ejercicio del aspecto empírico de la ciencia y sin haber realizado un experimento. Por ejemplo, para trabajar la estructura celular es posible recurrir a una multitud de imágenes de microscopía óptica y electrónica como las que hay en muchos atlas histológicos (ejemplos muy bellos pueden encontrarse en el trabajo clásico de Porter¹⁰ y Bonneville, 1968, o en Hammersen, 1982). También se pueden usar fotos o dibujos de huesos, picos, estructuras anatómicas y videos que muestren el comportamiento, la forma y el color de animales y plantas. El sitio BioInteractive de la prestigiosa Howard Hughes Medical Institute posee un repositorio de videos de altísima calidad fílmica y académica sobre la evolución biológica.

Muchos científicos se han destacado por arribar a conclusiones valiosísimas a partir de los datos de otros. James Watson y Francis Crick elaboraron la estructura en 3D de la molécula de ADN a partir de las imágenes de difracción de rayos X de Rosalind Franklin y de los datos de composición y estructura de bases nitrogenadas de Erwin Chargaff y otros. Ellos no hicieron ni un experimento o medición. John Dalton (1766-1844) enunció su ley de Proporciones Múltiples (uno de los verdaderos hitos fundacionales de la Teoría Atómica) usando los datos ya publicados por muchos otros químicos. Nuestros alumnos también pueden llevar adelante razonamien-

9 La técnica de cámara lúcida se usaba frecuentemente para obtener dibujos precisos de fósiles muy pequeños (Gould, 1989).

10 Keith Porter, junto con George Palade, fue uno de los pioneros del uso del microscopio electrónico en el estudio de la estructura celular. Además de ser quien puso a punto las técnicas, es el descubridor del retículo endoplasmático.

tos a partir de datos de “otros” y esto los pondrá en un contacto mayor con el aspecto empírico de la ciencia que si uno les da la conclusión ya digerida. Gellon (2009a) presenta un ejercicio de esta naturaleza con los datos históricos reales que obtuvo A. L. Lavoisier cuando investigaba el problema de la transmutación del agua en los inicios de su carrera científica. El sitio web BioInteractive, al que nos referimos más arriba, contiene una sección de datos extraídos de trabajos científicos listos para ser usados en el aula; a veces son tablas, otras veces gráficos o esquemas; en todos los casos van acompañados de guías de preguntas para el aula. Es un verdadero tesoro de oportunidades para traer el aspecto empírico de la ciencia al aula sin necesidad de experimentos en el laboratorio.

Otra técnica de enorme utilidad para nuestras clases consiste en narrar un experimento –con la profundidad y el nivel de detalle que el docente juzgue oportuno y adecuado para sus estudiantes– contando las preguntas, el enfoque, los aparatos o las técnicas que usaron los investigadores y, finalmente, los resultados obtenidos. Expedición Ciencia ha desarrollado una actividad llamada “Células y herencia” en la que se exploran los inicios de la teoría cromosómica de la herencia con experimentos narrados, datos ajenos y fotos (Gellon y Goldweic, 2011).

Análisis del origen de las fórmulas

Las famosas “fórmulas” de la física y la química son expresiones matemáticas que los alumnos usan para resolver problemas numéricos. En el mundo escolar generalmente no son más que herramientas algebraicas, pero estas “fórmulas” son la codificación de importantes leyes derivadas empíricamente. Un excelente ejercicio consiste en recorrer el origen empírico de esas leyes.¹¹ ¿Quiénes determinaron las leyes, con qué mediciones, usando qué tipo de aparatos y dispositivos? ¿Tenemos acceso a los datos originales de esos experimentos para analizarlos nosotros? Las fórmulas de fricción estática y dinámica son fáciles de reconstruir con experimentos mentales y

11 Un ejemplo de este tipo de recorrido para la ley de Coulomb de interacción electrostática puede encontrarse en Gellon (2009b).

muchas veces con experimentos reales, simplemente usando un dinamómetro y diferentes superficies. La conservación del momento lineal (o cantidad de movimiento) se puede deducir del análisis de colisiones astutamente planeadas. Las leyes básicas de la calorimetría son fácilmente medibles en experimentos sencillos, pero también pueden ser descriptas. Lo mismo ocurre con los experimentos de Boyle sobre los gases. Sería interesante que los alumnos supiesen cómo funcionan los barómetros, termómetros, eudiómetros y las balanzas usados originalmente para descubrir estas regularidades fundamentales de la naturaleza. En estos casos se puede explorar no sólo el aspecto empírico de la ciencia, sino también el metodológico (véase el capítulo 4).

La dinámica de la indagación en el aula

Son numerosos los aspectos del trabajo en el aula que promueven la verdad revelada y hacen difícil un acercamiento empírico a la ciencia. Algunos son verdaderamente sutiles. Por ejemplo, el manejo de los tiempos puede tener un impacto considerable en la construcción de ideas de los alumnos. Pensar requiere tiempo, sobre todo en relación con la elaboración de explicaciones y de predicciones a la que nos referíamos más arriba. Y ese tiempo no es uniforme: algunos alumnos necesitan más tiempo que otros. Al trabajar con diálogos y preguntas orales es importante tener en cuenta la labor de la investigadora y docente estadounidense Mary Budd Rowe (1978), quien sostuvo, sobre la base de múltiples estudios, que luego de hacer una pregunta es necesario que el docente espere por lo menos tres segundos antes de volver a hablar y otros tres segundos después de la respuesta del alumno. Estos tiempos de espera mejoran mucho la calidad de los diálogos durante el proceso de indagación ya que le permiten al alumno interpelado elaborar su respuesta y, después de formularla, ampliarla y agregar comentarios. Sin embargo, las investigaciones muestran que muy pocos docentes cumplen con estos tiempos de espera y que, cuando los ponen en práctica, acostumbrados a esperas de menos de un segundo, esos tres segundos les resultan increíblemente largos.

¿Qué pasa con las brevísimas pausas que se les suelen dar a los alumnos para elaborar contestaciones? Sucede que, cuando el

alumno no tiene tiempo para pensar en una respuesta adecuada, la pregunta del docente se vuelve retórica y es seguida por la respuesta que da el propio docente. Así es como, al no dar lugar al proceso de construcción por parte del alumno, las ideas toman el carácter de verdades reveladas. Esto muestra hasta qué punto la dinámica de la relación entre alumno y docente desempeña un papel importante en el aprendizaje.

¿Cómo respetar el aspecto empírico de la ciencia en el caso de fenómenos que no se pueden observar en el aula?

No siempre es posible exponer a los alumnos a los fenómenos naturales, sobre todo cuando tratamos los aspectos más modernos de la ciencia. Los fenómenos que buscan entender los científicos no son sólo aquellos que podemos ver, tocar u oír, sino también todos los que detectamos mediante instrumentos que extienden nuestros sentidos (por ejemplo, telescopios para detectar lo que está muy lejano, microscopios para detectar lo que es muy pequeño, termómetros para detectar temperaturas muy altas o muy bajas). La ciencia actual describe la naturaleza de galaxias lejanas, el inicio del universo, temperaturas impensables, velocidades inauditas, cosas que pasan dentro de nuestras células y que no podemos ver, y fuerzas que somos incapaces de experimentar con nuestro cuerpo. Sabemos ahora que la luz tiene colores (como el ultravioleta) que no somos capaces de distinguir con los sentidos, porque nuestras investigaciones, teorías e instrumentos nos dicen que así es. El docente de ciencias debe ser extremadamente ducho (y al mismo tiempo cauto) para proveer la evidencia suficiente a fin de convencer al estudiante de que esas “cosas invisibles” existen.

¿Cómo respetar el aspecto empírico de la ciencia en el caso de fenómenos que no podemos observar en el aula? El hecho de que no podamos observarlos no significa que no podamos describirlos. Ya hemos mencionado el uso de proxis como dibujos, fotos y videos y también el de experimentos narrados y resultados ajenos. En todos estos casos, deberemos siempre hacernos estas sencillas preguntas: “¿Cómo sabemos que esto es así?” y “¿Cuál es la evidencia que sostiene esta o aquella afirmación?”. A veces las evidencias empíricas de las ideas que afirmamos son fáciles de evocar o de

imaginar, pero otras no. Por ejemplo, explicamos los fenómenos que vemos en circuitos eléctricos diciendo que se deben a un flujo de electrones dentro del cable. ¿Cómo sabemos que son electrones los que fluyen dentro del cable (o, para el caso, cómo sabemos que hay “algo” que fluye)? Una excelente práctica para todo docente de ciencias es tratar de indagar cuáles son las evidencias empíricas de cada concepto que se quiere enseñar. Esto muchas veces nos llevará a analizar en detalle los hechos históricos que condujeron a esas ideas.

La historia de la ciencia brinda ejemplos riquísimos acerca de cómo las ideas científicas se construyen a partir de la observación y exploración de fenómenos. Estos ejemplos históricos le dan vida al tema y muestran el drama y la pasión del descubrimiento. Por supuesto, no basta con decir que Boyle vivió en tal época y descubrió esto y aquello sobre los gases. Tendremos que ver cuáles eran las preguntas que se hacía, por qué eran relevantes, qué sabía y qué no podía saber, qué decían sus contemporáneos, qué mostraron sus experimentos, qué cosas sus experimentos *no* mostraron pero eran en principio posibles. Esto ayudará a mostrar que los científicos no consiguen las respuestas simplemente pensando: de alguna manera deben obtenerlas de la realidad.

En suma, para poder aprender a pensar científicamente los estudiantes deben comprender cómo los investigadores formulan ideas para explicar la realidad que percibimos. No basta con decirles que la ciencia es empírica; es necesario modelar ese “empiricismo” en cada paso que demos en el aula. Al mismo tiempo, deberemos estar alertas acerca de qué tipo de conductas del docente contradicen el espíritu empírico de la labor científica. Hemos identificado algunas de esas actitudes y hemos propuesto, a lo largo de este capítulo, formas de crear actividades y ambientes en el aula que promuevan tal espíritu.

Para finalizar, resumiremos en el siguiente apartado estas sugerencias, a las cuales cada docente podrá agregar las propias. En los capítulos 2 y 3 discutiremos en detalle dos ejemplos concretos de cómo introducir el aspecto empírico en el aula de ciencias. El capítulo 2 gira en torno del mundo de los fenómenos en la clase de química. En el capítulo 3 se brinda una guía de preguntas para enmarcar actividades destinadas a construir el concepto de carga eléctrica.

Prácticas pedagógicas sugeridas para destacar el aspecto empírico de la ciencia

- Brindar la oportunidad a los estudiantes de observar fenómenos y de formar sus propias ideas sobre ellos.
- Usar la secuencia “fenómeno-idea-terminología” al explorar un tema.
- Utilizar preferentemente definiciones operacionales en lugar de definiciones de corte teórico.
- Modificar o refinar conceptos y definiciones de términos sobre la base de nuevas observaciones o ideas.
- Desarrollar ideas a partir de experiencias o prácticas de laboratorio.
- Convertir “recetas de cocina” en actividades de indagación.
- Usar proxis o sucedáneos de la experiencia directa: fotos, videos, descripciones, dibujos.
- Usar narraciones de experimentos.
- Plantear experimentos imaginarios e interpretar resultados.
- Explicar el origen empírico de “fórmulas” tradicionales (como las de fricción, calorimetría, leyes de los gases, etc.).
- Usar actividades de exploración guiadas que arranquen “desde cero”, es decir, que fomenten que los estudiantes construyan sus ideas de acuerdo con lo que perciben.
- Realizar actividades empíricas sencillas como observar objetos y fenómenos, hacer descripciones, dibujos y mediciones.
- Prestar atención a la dinámica del aula; por ejemplo, brindar suficiente tiempo a los alumnos para que piensen y elaboren sus respuestas a las preguntas del docente.
- Poner especial atención en indagar la evidencia empírica que lleva a formular conceptos cuando se trata de fenómenos no observables en el aula.
- Considerar casos históricos, analizando la secuencia de desarrollo de una idea a partir de las observaciones y experimentos e incluyendo la definición y redefinición de términos.

Índice

Este libro (y esta colección)	13
Introducción	15
Una educación centrada en el proceso de construcción de las ideas científicas	16
La ciencia y el aula	19
Estructura del libro	24

PARTE I

El aspecto empírico de la ciencia

1. El mundo de los fenómenos	29
El aspecto empírico de la ciencia	30
Contacto directo con los fenómenos	31
Uso y abuso de las palabras	33
Definiciones operacionales y definiciones de corte teórico	35
Evolución de la terminología científica	37
Las experiencias de laboratorio	38
Más allá del experimento	38
Construyendo ideas “desde cero”	39
Uso de proxies y datos ajenos	40
Análisis del origen de las fórmulas	42
La dinámica de la indagación en el aula	43
¿Cómo respetar el aspecto empírico de la ciencia en el caso de fenómenos que no se pueden observar en el aula?	44
2. Reacciones químicas: una exploración lúdica	47
¿Cómo definir una reacción?	47
Disoluciones y reacciones químicas	48

Actividad 1. ¿Cuál es la mezcla?	49
Actividad 2. ¿Qué va a pasar cuando mezcle estos líquidos?	52
Conclusión	54

3. Carga electrostática: una secuencia de actividades guiadas	57
Breve historia del concepto de “carga”	58
Concepciones previas de los estudiantes	60
Actividad 1. Observaciones básicas	62
Actividad 2. Dos tipos de carga	66
Actividad 3. Síntesis grupal	69
Actividad 4. Repaso de lo aprendido	72
Reflexiones finales	73

PARTE II

El aspecto metodológico de la ciencia

4. Gajes del oficio	77
El aspecto metodológico de la ciencia en el aula	81
Las preguntas	83
Las hipótesis	84
Las observaciones	85
Las descripciones	87
Los experimentos	88
Mediciones y errores	89
Los resultados	90
5. Popurrí metodológico: preguntas, sistemas, controles y variables	95
Ejemplo 1. A la caza y el estudio de preguntas	95
Ejemplo 2. El uso de un sistema experimental	99
Ejemplo 3. Experimentos controlados	106
Ejemplo 4. Análisis de variables	112
6. Lavoisier y la calcinación de los metales: diseño e interpretación de experimentos	117
Un resultado sorprendente	117
Una palabra sobre las palabras	119

Las hipótesis	120
Diseño de experimentos	121
Interpretación de los experimentos de Lavoisier	126

PARTE III

El aspecto abstracto de la ciencia

7. Ideas inventadas	131
Conceptos y esquemas conceptuales	131
Los modelos teóricos: un ejemplo	133
Un modelo teórico es una representación mental	134
Los modelos no son ciertos ni falsos	135
Los modelos evolucionan con el tiempo	136
Teorías	139
Validez de los modelos y las teorías	140
Leyes	141
La creación de modelos teóricos en el aula	142
El aspecto abstracto de la ciencia en el aula	143
8. Los astros celestes: el uso de un modelo	147
Observaciones y modelos	149
Predicciones acerca del Sol, la Luna y las estrellas	152
Actividades geocéntricas	154
Actividad heliocéntrica	161
Dificultades de los alumnos	162
La discusión	162
9. Partículas cargadas: la construcción de un modelo	165
Efluvios y fluidos: modelos de atracción y modelos de transmisión	165
Secuencia didáctica: construcción de un modelo de carga	167
La herramienta básica: el electroscopio	168
Actividad 1. Observación de la conducción de la carga	170
Actividad 2. ¿Qué es lo que fluye?	171
Actividad 3. Uso del modelo para explicar fenómenos	173
Actividad 4. Uso del modelo para predecir fenómenos	175
Actividad 5. Práctica y repaso	178
Conclusión	181

PARTE IV
El aspecto social de la ciencia

10. Acuerdos, debates e influencias	185
El consenso en la investigación profesional	186
La ciencia pública y la validez del conocimiento científico	186
Ciencia y sociedad	189
La construcción de herramientas para el debate de ideas científicas	191
La sociología de la ciencia en el aula	194
11. Experimentación con animales: simulación de un juicio	199
Actividad. Juicio a la experimentación con animales	200
12. ¿Vivo o no vivo? Dialogando se aprende	209
Diálogos extraterrestres	210
Actividad. ¿Vivo o no vivo?	212
Ejemplos de diálogo	214
Conclusiones	222

PARTE V
El aspecto contraintuitivo de la ciencia

13. Superando el sentido común	227
Conceptos contraintuitivos	228
Formas de pensar no habituales	231
Fenómenos discrepantes	234
Las preconcepciones de los alumnos	236
¿Cómo promover el cambio en las preconcepciones de los alumnos?	237
14. Sombras e imágenes: explicitación y confrontación de preconcepciones	241
Las ideas contraintuitivas sobre la luz	243
Haciendo explícitas las nociones de los alumnos mediante predicciones	244
Actividades con imágenes y sombras	244

Predicciones y resultados	245
Explicaciones y modelos	246
Fenómenos discrepantes	248
Explicación científica de los efectos observados	249
15. Fuerzas: el resbaladizo camino entre las preconcepciones y el concepto científico	251
Las dificultades de los estudiantes	252
El concepto de fuerza abordado a través de la idea de interacción	254
Un experimento mental	255
De colisión a empuje	257
Un fenómeno discrepante	258
Volver sobre el tema	260
Apéndice. Prácticas pedagógicas sugeridas	265
Lecturas recomendadas	271
Bibliografía	275
Acerca de los autores	281