

del  
**SISTEMA  
SOLAR**

Contar  
historias  
para enseñar

al

las teorías  
científicas en  
la escuela

**ADN**

Gabriel  
**Gellon**

# Índice

[Cubierta](#)

[Índice](#)

[Portada](#)

[Copyright](#)

[Este libro \(y esta colección\), por Melina Furman](#)

[Agradecimientos](#)

[Introducción](#)

[Había una vez...](#)

[Las teorías como relatos](#)

[Señal y ruido](#)

[Las mil y una historias](#)

[1. Teorías científicas en la vida y en el aula. Qué, cómo y por qué](#)

[Qué es una teoría: sobre dinosaurios y átomos](#)

[Observables y nociones teóricas](#)

[Las teorías no encajan con todos los datos](#)

[Teoría mata dato](#)

[Sí hay certezas](#)

Cómo sabemos lo que sabemos: crecimiento y validación de los cuerpos teóricos

Otras características de los cuerpos teóricos

Las teorías científicas en el aula

Historia de la ciencia y narraciones en la enseñanza

Para ir cerrando

**2. El sistema solar pitagórico**

**3. La Era del Hielo**

**4. La tabla periódica**

**5. Dominios magnéticos**

**6. El sistema solar de Ptolomeo**

**7. El ancestro común**

**8. La doble hélice**

**9. El sistema copernicano**

**10. El calor**

**11. La genética de Mendel**

**12. Expandiendo las ideas de Mendel**

**13. Teoría cromosómica de la herencia**

**14. La deriva continental**

**15. La teoría atómica**

## **16. El Big Bang**

### **17. De caracoles y berilio**

Un caracol insólito y la ingenuidad del alumno

Orden: un fin deseable para la enseñanza y la investigación

Un metal misterioso y el ingenio del maestro

Teoría y datos

De alumno a maestro

En el aula

Bibliografía

### **18. Cierre**

El uso de las viñetas para estructurar secuencias de clases

Otros usos de las viñetas

¿Cómo se pueden construir viñetas históricas?

El amigo gurú

Simplemente no te quiere

### **Palabras finales**

### **Referencias**

### **Créditos de las imágenes**

Gabriel Gellon

# DEL SISTEMA SOLAR AL ADN

Contar historias para enseñar las teorías científicas en  
la escuela

 **siglo veintiuno**  
editores

---

Gellon, Gabriel

Del sistema solar al ADN.- 1ª ed.- Buenos Aires: Siglo Veintiuno Editores, 2019.

Libro digital, EPUB.- (Educación que aprende / dirigida por Melina Furman)

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-987-629-937-4

1. Educación. 2. Ciencia. 3. Epistemología. I. Título.

CDD 570.15

---

© 2019, Siglo Veintiuno Editores Argentina S.A.

[www.sigloxxieditores.com.ar](http://www.sigloxxieditores.com.ar)

Diseño de colección y de cubierta: Pablo Font

Digitalización: Departamento de Producción Editorial de Siglo XXI Editores Argentina

Primera edición en formato digital: junio de 2019

Hecho el depósito que marca la ley 11.723

ISBN edición digital (ePub): 978-987-629-937-4

## Este libro (y esta colección)

Creo en la selección natural, no porque pueda probar en cada caso particular que ha transformado una especie en otra, sino porque agrupa y explica bien (a mi entender) un conjunto de hechos de la clasificación, embriología, morfología, órganos rudimentarios, sucesión geológica y distribución de los organismos.

**Charles Darwin**

Las ciencias nos ayudan a entender el mundo. A atraparlo con nuestra mente. A mirarlo con nuevos ojos. Nos abren una ventana para comprender cómo son y, en muchos casos, por qué suceden los fenómenos más simples y también los más misteriosos con que nos encontramos a diario. Desde por qué los hijos se parecen a sus padres hasta cómo se formaron las montañas y los valles o dónde están y cómo se mueven los astros en el universo.

Y para eso cuentan con un arma maravillosa: las teorías científicas, esos cuerpos de conocimientos que dan sentido a numerosísimas observaciones de manera elegante y, claro, bella. Las teorías científicas nos permiten hacer predicciones sobre qué nuevas observaciones deberíamos encontrar. Y nos abren nuevas preguntas, en la frontera entre aquello que conocemos y lo que todavía nos queda por descubrir.

Sin embargo, a menudo las teorías llegan despojadas a las clases de ciencias, como si provinieran de un plato volador. Aterrizan en pizarrones, textos y carpetas como verdades reveladas que nos aclaran aquello que sabemos sobre el mundo natural. Con las mejores intenciones, las aulas se llenan de explicaciones sobre aquello que sabemos. Pero dejan de lado la dimensión más apasionante de la ciencia que es la propia construcción del conocimiento: ese creativo diálogo entre el mundo observable y el de las ingeniosas ideas que concebimos para darle sentido a lo que observamos.

Porque para comprender y disfrutar las ciencias no alcanza con que los estudiantes conozcan qué se sabe. Es igualmente importante (o incluso más,

me atrevería a argumentar) que entiendan cómo sabemos lo que sabemos. Porque es ese particular “cómo” el que hace que las ciencias ofrezcan un aporte tan fundamental a la gran empresa del conocimiento humano.

En este libro Gabriel Gellon nos invita a adentrarnos en el mundo de las teorías científicas. Y lo hace de un modo muy singular: a través de historias que nos llevan de la mano por los caminos de hombres y mujeres que, guiados por su curiosidad y ganas de saber más, se aventuraron hasta los confines de lo conocido en su época.

Con su arte maestro de narrador, Gabriel nos introduce en relatos que ponen de relieve distintos aspectos centrales de las teorías científicas y reflexiona acerca de cómo trabajarlos con los estudiantes. Personajes como Charles Darwin, Dimitri Mendeleev, Rosalind Franklin, Louis Agassiz, Gregor Mendel y John Dalton, entre varios otros, nos van a acompañar para entender el concepto de validez, la diferencia entre los datos y las teorías, la generación de esquemas conceptuales, la acomodación de observaciones, la idealización, la elaboración de modelos alternativos y la formulación de predicciones y nuevas líneas de investigación.

Van a encontrar aquí historias sobre Astronomía, Ciencias de la Tierra, Física, Química y Biología para usar en sus aulas, listas para contar (¡y condimentar con lo que quieran!), seguidas de preguntas y actividades para trabajar con los alumnos, que invitan a seguir explorando y reflexionando.

Los relatos encienden la chispa del deseo de conocer más, de saber cómo termina el cuento. Por eso, cuando contamos historias, el conocimiento cobra vida, y ayudamos a que nuestros estudiantes vean que las ciencias son una aventura profundamente humana, atravesada por pasiones, preguntas intrigantes y el afán de comprender y transformar la realidad.

Este libro forma parte de la colección “Educación que aprende”, pensada para todos aquellos involucrados en la fascinante tarea de educar. Confluyen aquí reflexiones teóricas y aportes de la investigación pero también ejemplos y orientaciones para guiar la práctica. Porque la educación ha sido, desde sus inicios, un terreno de exploración y búsqueda permanente que se renueva con cada generación de educadores, niños y jóvenes. Y porque, para educar, tenemos que seguir aprendiendo siempre.

**Melina Furman**

# Agradecimientos

Desde hace varios años tenemos en Expedición Ciencia una Guía de Diseño Experimental con ejercicios escalonados que ayudan a desarrollar habilidades para plantear experimentos controlados. Por mucho tiempo pensé que sería muy interesante contar con una Guía para la Enseñanza de Teorías, que me parecía el otro gran pilar del pensamiento científico.

Armé las primeras viñetas de este libro para los exámenes de mis alumnos en la Universidad de San Andrés. Dar a esas viñetas la forma de guía no fue fácil, y lo charlé con varios de mis colegas, sobre todo los que me acompañaban en las clases universitarias de introducción a la ciencia. La forma final del libro la discutí con la gente de Siglo XXI: mi agradecimiento a Yamila Sevilla, Marisa García y, en particular, a Melina Furman, quien me acompaña en estas aventuras desde el comienzo.

Agradezco también a mis colegas Pablo Salomón, Eugenia López y Verónica Soifer, y a todos los alumnos de San Andrés, que tuvieron que soportar las versiones menos felices de las viñetas. A mis compañeros de sueños en Expedición Ciencia, que por cada palabra crítica tienen otra de aliento. A mi esposa Emily Maxon, que conoce y defiende cada uno de mis proyectos. A mi hijo Elías, que se atrevió a ayudarme con las ilustraciones. Y a mi hija Mila, que algún día leerá con ojo crítico las páginas de este libro.

# Introducción

## Había una vez...

Hace unos catorce mil millones de años, toda la energía actual de nuestro universo se encontraba en un estado de altísima densidad a enormes temperaturas y presiones. En condiciones tan extremas, es muy probable que las leyes físicas que hoy rigen el universo –o las nociones mismas de “espacio” y “tiempo”– no tuvieran el más mínimo sentido. Pero un proceso de rapidísima expansión hizo que surgiera más y más espacio (pero no más energía), y las temperaturas comenzaron a descender. En pocos instantes, una porción de la energía total se convirtió en partículas. Luego de la primera millonésima de segundo, las temperaturas del universo bajaron tanto que las partículas iniciales empezaron a coalescer en aglomerados más grandes, incluyendo protones y neutrones, y un segundo después de ese momento ya aparecían los primeros electrones. Sin embargo, todavía no podían existir átomos a estas temperaturas, que seguían siendo altas. El universo pasó una inmensa cantidad de tiempo así: tuvieron que transcurrir varios miles de años para que todo se enfriara lo suficiente de manera que aparecieran los primeros átomos de hidrógeno, helio y deuterio. Sobrevino entonces una larguísima época sin cambios: recién cien millones de años más tarde, estos tres tipos de átomos, por atracción mutua, fueron formando las primeras estrellas y, en su interior, surgieron los demás átomos que conocemos y que dieron origen a otras estrellas, galaxias y –más tarde– planetas. Unos diez mil millones de años tras el comienzo, se formó nuestro planeta, la Tierra. Otros mil millones de años después, aparecieron las primeras formas de vida.

Breve y descarnada, esta es quizá la historia más increíble, épica y clave que nos haya dado la ciencia. Parece un mito sobre la creación, pero es más que eso: es la historia del comienzo de todo tal como lo conocemos. ¿Cómo sabemos, sin embargo, que efectivamente sucedió de este modo si, desde

luego, no había nadie para verlo? ¿Cómo hacen los científicos para calcular los tiempos en que ocurrió todo, cómo saben que no sucedió antes o después? ¿Cómo se las ingenian para establecer cuándo surgieron los neutrones y cuándo los electrones, o la temperatura del universo en ese entonces, o qué partículas había a cada temperatura? ¿Cómo determinan el modo en que se forman las galaxias o las estrellas, y lo que ocurre en el interior de estas últimas? Es verdaderamente asombroso que podamos contar una historia de algo que jamás vimos y que, a todas luces, parece en principio imposible de observar, ni con telescopios, ni con máquinas del tiempo, ni con ningún tipo de ojo o instrumento.

Pero lo más increíble es que existen muchísimas otras historias tan asombrosas y reveladoras como esta, que la ciencia nos cuenta antes de irnos a dormir: el inicio de la vida, el de los humanos o cómo se formaron los Andes son algunos de los tantos –y apasionantes– relatos de orígenes; pero también el fin de los dinosaurios, la Era del Hielo o el colapso de la civilización maya: relatos de fines catastróficos. Si lo consideramos de manera más general, casi todo el conocimiento científico es, de un modo u otro, un relato sobre la realidad; quizá no una narración que transcurre en el tiempo, con un comienzo y un final, pero sí una descripción de cómo son las cosas en su forma fundamental. La ciencia hilvana los datos, los fenómenos, los resultados de experimentos, las ideas de muchas personas que se corrigen unas a otras y, con todo eso, zurce un tejido narrativo, una explicación en la que cada parte ocupa su lugar lógico.

Hay narraciones cortas, pequeñas y acotadas. Cuando estaba haciendo experimentos para mi doctorado en biología, mi director de tesis –el jefe del laboratorio– me decía que para armar un *paper* tenía que pensar qué historia quería contar, y que las figuras del trabajo eran como las viñetas de un cómic. Otras historias son más grandes, las que nos dicen cómo funcionan las cosas de manera fundamental: cómo cambian las especies de animales y plantas con el tiempo, cómo es la materia en escala ultramicroscópica, cuáles son las reglas de interacción química entre sustancias, cómo es el interior de la Tierra y cómo se forman las montañas, cuáles son las reglas básicas del movimiento de los planetas y todos los objetos, qué es la luz y qué son los colores, qué son los sueños y la conciencia, por qué nos enfermamos, cómo funcionan nuestros órganos, qué es el sonido, cómo se heredan las características de los progenitores a su descendencia. Todos estos son relatos de cómo funciona la realidad (y por “realidad” entendemos

todo lo que podemos encontrar por allí, ¡incluidos nuestros propios pensamientos!).

Si nos detenemos a reflexionar un poco, es evidente que los relatos sobre el origen del universo tienen que haber sido tejidos luego de un gran trabajo detectivesco, reconstruyendo paso a paso las reglas que rigen qué ocurre con cada átomo, con las estrellas, con la materia a altísimas temperaturas; y también las características del universo, las galaxias y tantísimas cosas más. En efecto, llegar a esta visión en el pasado remoto implicó un esfuerzo mental inmensurable, actos de una imaginación casi descontrolada, experimentos, observaciones astronómicas delicadas y difíciles, cálculos de enorme complejidad, intentos de encajar lo que se sabía en una disciplina científica (como la astronomía) con lo que se conocía en otra (como la física de partículas). Pero en algún sentido la visión final, la síntesis que nos dice cómo fueron las cosas, es un acto de imaginación en el que la ciencia nos regala la oportunidad de mirar con nuestra mente todo aquello que nuestros ojos no alcanzan a vislumbrar. El inicio del universo es un bello ejemplo, pero la ciencia está plagada de cosas que van más allá de nuestros sentidos. El interior de la Tierra, los planetas y soles, los átomos y las partículas que los componen, la naturaleza de la luz como disturbios en un campo electromagnético –y los propios campos electromagnéticos–, las fuerzas, la energía, los genes, los ecosistemas... son todos objetos o fenómenos que escapan a nuestros sentidos inmediatos y tienen que ser comprendidos por nuestras mentes para obtener una imagen general coherente.

## Las teorías como relatos

Las grandes ideas que hilvanan muchas observaciones y les dan sentido a innumerables fenómenos dispares son los relatos fundamentales de la ciencia. Los científicos las llaman “teorías”. Al principio, cuando empiezan a imaginarlas y darles forma, son algo tentativas. Diríamos que tienen un gran carácter conjetural. Con el tiempo –a veces, en plazos largos; otras, muy cortos–, los investigadores van encontrando evidencia de que el relato es plausible. Finalmente, la evidencia es tan abrumadora que nos damos cuenta de que estamos ante una descripción cierta de la realidad, aunque se

trate de aspectos de ella que, como vimos, no son accesibles a nuestros sentidos. Pero esta es la gran belleza de la ciencia: que nos permite visibilizar las cosas fundamentales, esas que son invisibles a los ojos. De todos modos, y aunque ya estemos seguros de ellos, a estos relatos se los sigue llamando “teorías”. O sea que una *teoría científica* es una gran idea, una historia de alto vuelo que explica muchísimas cosas. No se trata de una idea tentativa, sino de una idea general. Las teorías pueden dar sus primeros pasos de manera conjetural, pero gran parte de ellas ya ha superado esa etapa. De hecho, las teorías son las piezas de conocimiento de las que tenemos más certeza en este momento. Nada más seguro en ciencia que un cuerpo teórico, es decir, una teoría: los relatos de los que ya nadie duda.

## Señal y ruido

Los científicos están muy orgullosos de estos relatos hermosos y sin duda merecen estarlo: las visiones que nos han regalado han sido de gigantesca utilidad práctica y de enorme belleza intelectual. Muchos de nosotros nos hemos emocionado (en la escuela, en la universidad o con un documental) al vislumbrar la maravillosa forma en que funciona el universo y cómo personas de carne y hueso han sido capaces de revelar ese funcionamiento. Sin embargo, a veces hay cortocircuitos entre la manera de operar de los científicos y el modo en que el resto de la humanidad entiende esas ideas. Esto es peligroso, porque quienes no somos científicos necesitamos comprender las ideas que la ciencia produce para poder tomar decisiones racionales y captar el mundo como es realmente, sin tergiversaciones. Esta tarea no siempre es sencilla, de ahí que en la escuela tengamos que estudiar muchísimos contenidos científicos, así como la forma en que piensan los investigadores.

Cuando los docentes enseñamos ciencia en el aula, les ofrecemos a nuestros estudiantes los grandes relatos de la ciencia; es decir que lo que enseñamos, más que ninguna otra cosa, son las teorías científicas. Enseñamos esas perlas del conocimiento con la convicción –bien fundada– de que son piedras fundacionales sobre las cuales levantarán un edificio de saber. En efecto, al comprender acabadamente las ideas más poderosas y abstractas que la ciencia ha producido, podremos ver a través de los

accidentes de la realidad y captar el fondo más profundo de los fenómenos a nuestro alrededor. Esto es muy útil y está muy bien.

Pero aquí empieza el ruido. Solemos enseñar estas ideas mezclando las descripciones y observaciones de la realidad con conceptos más profundos que escapan a nuestros sentidos. Hablamos de átomos y de evolución como si fueran equiparables a las sillas y los caballos, aunque, vale aclarar, no son lo mismo. No porque no tengan igual grado de realidad: las sillas existen, y también los átomos. Pero estos últimos no son accesibles a través de ninguna de nuestras capacidades sensoriales. En otras palabras, no podemos constatarlos directamente: la mera observación (como si se tratara de un objeto grande y tangible, por ejemplo, una cafetera) no es suficiente para verificar su existencia. Lo mismo ocurre con la temperatura y composición del universo en los tres primeros minutos del Big Bang: no podemos observar estos fenómenos, tenemos que inferirlos mediante un trabajo detectivesco. Esta afirmación no es extravagante ni debería sorprendernos; tampoco es trivial. Encontrar las visiones más profundas de la realidad no ha sido –ni es– tarea fácil. Para hacerlo, los científicos con frecuencia deben discutir, volver a hacer sus experimentos, imaginar posibilidades descabelladas, diseñar extraños y complicados modos de probar si sus ideas son ciertas o no, pelearse con otros para convencerlos... y muchas veces se equivocan y tienen que dar marcha atrás.

En general, la gente no suele apreciar este carácter no trivial, salvo que se trate de científicos o personas que conozcan la ciencia bastante de cerca. Estamos acostumbrados a que las cosas existen o no existen, y si tenemos dudas al respecto es porque simple y sencillamente no sabemos; tenemos poco lugar para los modelos de trabajo o la prueba indirecta o para el proceso de acercarnos a una idea de a poco, con hipótesis cambiantes y aproximaciones sucesivas. O, al menos, no estamos acostumbrados a que la ciencia nos provea este tipo de respuestas, ya que lo usual en el aula es que nos entreguen las teorías en su versión final como verdades acabadas.

Sin embargo, es importante que podamos comprender y apreciar cómo hace la ciencia para formar sus ideas más osadas sobre el mundo que no podemos percibir, porque, aunque el proceso resulte complejo, esos son los conocimientos más fascinantes que tenemos. Después de todo, lo esencial es invisible a los ojos.

## Las mil y una historias

Cómo fue posible armar la historia inicial del universo, nuestro moderno cuento del inicio, es en sí otro relato apasionante que vale la pena escuchar y que encierra sus propias enseñanzas, no ya sobre cómo es este universo en el que nos tocó vivir, sino cómo es el mundo de los científicos que lo estudian: cómo piensan, descubren, corroboran, descartan, componen, conjeturan, debaten e imaginan. Sorprendentemente (o quizá no tanto) escuchar las historias sobre cómo los científicos y las científicas llegan a elaborar las ideas que produce la ciencia nos sirve para entender esas mismas ideas. En otras palabras: estudiar el origen histórico de las teorías ayuda a comprender su contenido. Y más importante aún, nos posibilita entender la estructura lógica y la textura de los cuerpos teóricos, y ese conocimiento es extremadamente poderoso porque nos permite apreciar los límites de las certezas de los científicos (y también los de sus incertidumbres, porque hay cosas que sí son certeras), cuánto confiar y cuánto no en cada una de las afirmaciones de la ciencia.

Este libro se ocupa de cómo los científicos imaginan, elaboran, discuten, modifican y validan las teorías científicas. Está dirigido sobre todo a docentes de escuela secundaria, con el objetivo de que puedan usarlo en las aulas. Pero también será de interés para todas aquellas personas intrigadas por saber cómo funciona la ciencia y, en particular, cómo se construyen las grandes y más ambiciosas ideas en ciencia.

Los capítulos se organizan a partir de una serie de viñetas históricas. Cada una narra el desarrollo de una idea, de una teoría científica, y pone el acento en diferentes características de las teorías y en el modo en que se construyen y validan. En consecuencia, las particularidades de las teorías son expuestas en el contexto de ejemplos concretos y no como aseveraciones abstractas que flotan en una nube de conceptos. Además de servir como plataforma para reflexionar sobre la naturaleza de los cuerpos teóricos, las viñetas presentan las historias de cada una de esas teorías: los átomos, los cromosomas, las placas tectónicas, el Big Bang y varias otras. El propósito no es brindar explicaciones profundas o completas de esos corpus de ideas, sino presentar someramente su génesis para poder entender y apreciar su carácter teórico. Hay muchísimos libros y videos sobre cada una de estas ideas, aunque pocos tratan de cómo comenzaron o por qué creemos en ellas. Las viñetas son cortas, están escritas de manera concisa y

sencilla para facilitar una lectura rápida de manera que puedan ser usadas en clases de ciencia del nivel secundario. Cada viñeta está seguida de una serie de preguntas o ejercicios sobre los textos, con el objetivo de recuperar las ideas epistemológicas centrales y que los docentes puedan trabajar con sus alumnos. En esencia, el libro puede ser visto como una especie de “manual de ejercicios” de epistemología “para principiantes” sobre teorías científicas. O como una colección de relatos sobre el origen de algunas de las ideas más importantes de la humanidad.

Los textos están armados con un formato que resalta deliberadamente una serie de características clave de los cuerpos teóricos. Claro está que son “claves” desde mi punto de vista, pero creo que muchos filósofos no estarían en desacuerdo. Por supuesto que esto implica un recorte y una concepción acerca de qué es una teoría, pero los lectores encontrarán que las visiones que propongo no son muy extravagantes y trato de usar aquellas que no solo cuentan con bastante consenso entre filósofos, sino que son precisamente las que tienen los científicos que hacen y usan estas teorías todos los días.

Las teorías presentan infinidad de aspectos y es posible que solo unos pocos sean comunes a todas. Es más, habría que analizar si todas las llamadas “teorías” en verdad lo son y si muchas afirmaciones que normalmente no identificamos como cuerpos teóricos en realidad sí lo son. Ahora bien, ¿quién determina si lo son o no? No lo sé; quizá después de hacer estos ejercicios los lectores puedan tomar su propio partido (y disentir conmigo). Lo importante, creo, no es dar una versión última y sin errores, sino comenzar a llevar la discusión al aula. En algún sentido, estoy proponiendo armar un relato acerca de cómo son las teorías científicas, un relato que pueda ser trabajado (más que “contado”) en el aula.

Pero antes de entrar de lleno en las viñetas, les ofrezco por el mismo precio el capítulo 1 para que reflexionemos acerca de qué es y qué no es una teoría científica (prefigurando los conceptos que exploraremos de manera más práctica en el resto del libro) y también sobre dos asuntos más que me parece necesario revisar. Uno, por qué es importante desde el punto de vista educativo ahondar en estas cuestiones. ¿Es necesario que nuestros estudiantes aprendan qué es una teoría? ¿Qué se pierden si no lo hacen? Y el otro, una breve explicación de por qué usamos viñetas históricas como herramienta educativa. Veremos que la historicidad de una viñeta tiene valor porque nos permite tejer narraciones, relatos. Y los relatos son

especialmente útiles porque impactan en una parte muy emotiva de nuestra cognición, y –quizá ligado a lo anterior– nos ayudan a dar sentido a los eventos. Así pues, la historia teje significado en lo que de otro modo sería un conjunto caprichoso de acontecimientos. Los relatos nos ayudan a comprender lo que ocurre. ¡Pero lo mismo puede decirse de las teorías! Ya hemos visto que la función primordial de las teorías es ofrecer sentido a conjuntos de observaciones que, de otro modo, serían incomprensibles, y que por lo tanto constituyen los grandes relatos de la ciencia

Veamos, entonces, qué historias nos cuenta la ciencia sobre el universo y sobre la naturaleza misma del conocimiento científico.

# 1. Teorías científicas en la vida y en el aula

## Qué, cómo y por qué

### Qué es una teoría: sobre dinosaurios y átomos

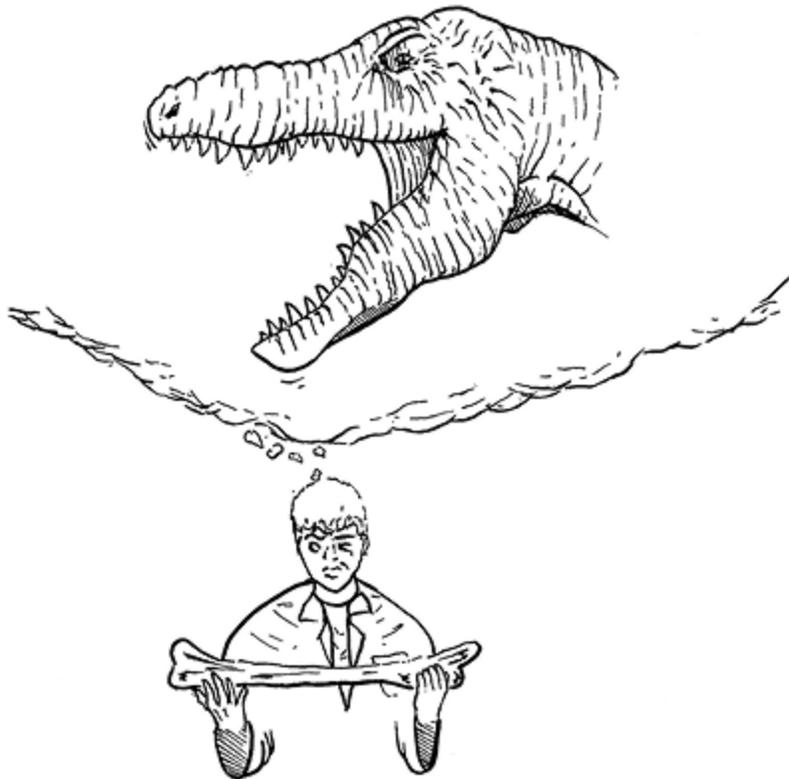
Los dinosaurios –de cuya existencia pasada no tenemos ninguna duda– no son observables. Pero sus restos fósiles sí. A partir del conjunto de huesos que los paleontólogos desentierran en una excavación, una persona avezada y con conocimiento de anatomía, puede reconstruir, *en su cabeza*, el aspecto que probablemente tenía el animal original. Además es posible inferir varios aspectos de su forma de vida por la estructura y disposición de los dientes, las extremidades, el tipo de dedos. No conocemos todo acerca de ellos, pero tenemos una idea bastante cercana de cómo eran, cuándo vivieron, qué comían y muchas otras cosas.

Si nos dijeran, por ejemplo, que acaban de descubrir que los tiranosaurios tenían plumas amarillas en todo el cuerpo, o que se equivocaron respecto de la velocidad a la que corrían, quizá nos resulte llamativo, pero no increíble. Es lógico que las ideas que los científicos tienen de la realidad cambien con el tiempo, sobre todo si aparecen nuevas observaciones o resultados de experimentos que nos obligan a modificar la visión que tenemos de las cosas. De hecho, nuestra concepción de los dinosaurios ha cambiado varias veces a medida que los paleontólogos hicieron nuevos descubrimientos. Las huellas fósiles cambiaron la manera en que comprendíamos cómo caminaban estos animales y, por ende, la postura que asumían e incluso su agilidad. Ahora bien, si una mañana los científicos aparecieran diciendo “Uy, perdón, mala nuestra, nos equivocamos groso y en realidad ahora sabemos que los dinosaurios en verdad nunca existieron”, esto sí nos resultaría absurdo y probablemente falso. Hay cosas todavía en duda, pero otras, no. Como nuestra visión de los dinosaurios es consistente con lo que sabemos sobre la evolución de otras especies y sobre geología y la edad de

la Tierra, confiamos en mucho de lo que conocemos sobre ellos, aunque nunca los hayamos visto.

Esta historia sobre los dinosaurios nos muestra algunas claves fundamentales acerca del conocimiento científico y cómo se construye. Una teoría es un ensamblaje cuidadoso de muchos pedacitos dispersos, como los huesos de un animal extinto. Cuando los juntamos de manera coherente, nos ofrecen una visión lógica de algo que antes no podíamos apreciar y que ahora nos resulta genuina. Pero más importante aún: el dinosaurio no es visible, es una reconstrucción basada en restos de muy diversa índole (huesos, huellas, restos de materia fecal, huevos, comida fosilizada).

**Figura 1.** Imaginando el dinosaurio



La existencia de los átomos está establecida con un grado de certeza comparable a la de los dinosaurios, aunque este hecho y las características detalladas de los átomos han sido más difíciles de investigar que la reconstrucción de restos fósiles. Pero hay puntos en común.

Así como los paleontólogos estudian huesos fósiles y otras pistas del pasado que pueden observar directamente, los químicos estudian muchísimas sustancias y las maneras en que interactúan a través de reacciones que son, como los fósiles, accesibles a nuestros sentidos. Estos fenómenos químicos presentan regularidades muy curiosas, encajan entre sí de una manera coherente –como los huesos en un esqueleto–; pero, a diferencia de las reconstrucciones de dinosaurios, las leyes de la química son más misteriosas. ¿Por qué reaccionan las sustancias de cierta manera? ¿Por qué siempre en proporciones fijas de masa? ¿Por qué algunas sustancias pueden descomponerse y otras no? Resulta que muchas de las observaciones que hicieron los químicos cobraron sentido y esas preguntas comenzaron a tener respuesta cuando empezaron a imaginarse que todo estaba hecho de átomos. Los átomos no se ven, pero si asumimos que existen, mucho tiene sentido. En cambio, si asumimos que no existen, todo eso parece misterioso e incomprensible. Los científicos se imaginan muchas cosas acerca de los átomos, aunque no puedan verlos: su peso, su tamaño, e incluso la forma en que se conectan unos con otros.

El primero en imaginar este esquema fue el inglés John Dalton, pero sus ideas fueron luego ampliadas por otros científicos para elaborar lo que hoy se conoce como la “teoría atómica”: se hicieron más observaciones sobre más sustancias, se notaron otras regularidades, más características fueron imaginadas por otras mentes para acomodar esas observaciones, y nuestra imagen del átomo se fue volviendo cada vez más precisa y detallada, y también más robusta, más certera.<sup>[1]</sup> Igual que si en el registro fósil aparecieran huellas de pisadas o trocitos de piel embebidos en ámbar que nos permitieran crear una imagen más detallada y confiable sobre cómo era el tiranosaurio.

## Observables y nociones teóricas

Dentro del marco de un cuerpo teórico conviven entidades o procesos *observables* y otros que no lo son y están propuestos por la teoría, es decir, son *imaginados* por los investigadores para darle sentido a ese conjunto de observaciones; con frecuencia se denominan “nociones teóricas”. Esta es la primera gran característica que quiero destacar en las viñetas. La distinción

conceptual es básica en la filosofía de la ciencia (o epistemología) y quienes quieran ahondar en este aspecto fundamental pueden consultar textos de esta rama del pensamiento, como *Las desventuras del conocimiento científico. Una introducción a la epistemología*, de Gregorio Klimovsky.

Las observaciones y las nociones teóricas abundan en todas las áreas de la ciencia y es importante que podamos distinguir entre unas y otras. No todo lo que en ciencia creemos o damos por cierto es porque ha sido observado. Los átomos no son observables, y sabemos que existen. Lo mismo pasa con los agujeros negros o con la energía. Hay numerosos conceptos difíciles de aprehender o de usar correctamente si no somos conscientes de su naturaleza teórica (Adúriz-Bravo, 2005; Duschl y otros, 2007; Kuhn, 2010). La noción de energía, por ejemplo, es muy difícil de visualizar o adquirir si no se comprende que se trata de algo que inventamos para darles orden matemático a muy diversas interacciones observables. Y para eso hay que entender bien cuáles son esas interacciones y por qué la idea de energía ayuda a darles coherencia. Poder distinguir entre observables y conceptos teóricos es fundamental más allá de la comprensión de las teorías y su naturaleza. Muchas veces los estudiantes de ciencias no pueden interpretar o diseñar experimentos justamente porque confunden estas dos categorías (Minzi, 2018). Los experimentos manipulan observables, pero los científicos los usan para ahondar en su comprensión de fenómenos y entidades no observables.

Esta distinción entre observación y noción teórica es muy útil pero no absoluta. Hay lugares grises, y existen ejemplos de entidades que son postuladas de manera teórica y que luego, con los desarrollos científicos y técnicos, se vuelven observables. Así, los planetas son observables a simple vista como puntos de luz parecidos a estrellas pero con movimientos algo extraños. Para los griegos, eran estrellas que giraban alrededor de la Tierra en órbitas propias. Copérnico propuso, *sin haberlo observado de forma directa*, que los planetas eran “mundos” como la Tierra. Esto no era observable en la época de Copérnico pero sí lo es ahora y, de hecho, ya hemos enviado máquinas a posarse sobre su superficie. Por otro lado, las observaciones mismas se realizan en mayor o en menor medida a través de la comprensión de nuestras mentes. Esto quiere decir que el acto de observar supone cierta concepción de la realidad. Un ejemplo clásico es la observación de células en el microscopio: si no te dicen qué estás viendo, es casi imposible advertirlo. En cierto sentido, todas las observaciones

contienen o presuponen concepciones teóricas sobre lo que se observa (Chalmers, 2008).

## Las teorías no encajan con todos los datos

Como vimos, las teorías son construcciones en las que las nociones teóricas se introducen para dar sentido a grandes conjuntos de observaciones. Los científicos (y los filósofos de la ciencia, sobre todo) se refieren a esto diciendo que la teoría *acomoda* las observaciones. Y esto quiere decir simplemente que les da sentido. Una idea común –y bastante errada– es pensar que las teorías deben acomodar todos los datos a su disposición. Esto no es cierto. Las teorías acomodan un conjunto grande de observaciones, pero muchas no encajan en la propuesta mental que hace el cuerpo teórico. Los científicos, sin embargo, no se amedrentan si una teoría no da cuenta de todo. La pregunta que se hacen siempre es: “¿Existe alguna teoría alternativa que pueda calzar con más observaciones que la que tenemos ahora?”. Frente a dos teorías alternativas, los científicos prefieren aquella que acomode más observaciones, pero nunca le exigirán perfección absoluta a un cuerpo teórico.

La evolución es una de las teorías científicas más robustas que existen. Acomoda, es decir, le da sentido a una vastísima colección de observaciones muy diversas y dispares. Se ha dicho por ahí que “Nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución”. De modo que es una idea teórica de gran poder explicativo. ¿Eso quiere decir que absolutamente todo lo que sabemos encaja con la idea de la evolución? No. Puede haber y siempre habrá alguna observación, algún bicho o una planta, alguna interacción entre organismos o cierto fenómeno de poblaciones que desafíe nuestras ideas de cómo opera la evolución biológica. Habrá algo que no nos cierre y que requiera que lo investiguemos con más cuidado. ¿Significa que la evolución es una mala teoría o una teoría incompleta y que debemos dudar de ella o descartarla? No, en absoluto. Solo la abandonaremos cuando encontremos otra idea teórica que sea más exitosa en acomodar más observaciones o en acomodarlas mejor. La teoría de la evolución es exitosa en una escala tan grande que es dudosísimo que esto ocurra.

Y esto es cierto para todas las teorías en ciencia. No pensamos si son ciertas o falsas porque lo acomodan todo o no. Nos preguntamos si tenemos alguna alternativa mejor y si, en términos generales, lo que tenemos es lógico y ayuda a entender la realidad.

Es muy importante que como ciudadanos sepamos que esto es así. De lo contrario, corremos el riesgo de comprar argumentos falsos y tontos, como aquellos que atacan la evolución o la idea del calentamiento global, porque en ciertos casos no parece aplicarse del todo bien.

## Teoría mata dato

De manera similar, una visión ingenua del conocimiento científico sostiene que las observaciones, los resultados de experimentos y las mediciones directas tienen una fuerza arrolladora y son nuestro acercamiento fundamental a la “verdad de la cosas”. Con este enfoque, la teoría debe doblegarse ante el dato y cambiar para acomodarse a la realidad.

Pero la realidad de la vida de los científicos es muy diferente. Una teoría viene respaldada por una enorme cantidad de observaciones y datos. Y no es la mera cantidad: es, como ya dijimos, el hecho de que *esos datos están unidos y concatenados unos con otros de manera lógica y coherente*, lo que produce una idea de orden superior. Si de pronto encontramos un dato que no se lleva bien con la teoría vigente, las observaciones o los resultados individuales que entran en contradicción con ella deben contraponerse con los miles de datos que la teoría sí logra adecuar. Generalmente los modelos y las teorías no se descartan porque no encajan con todo (en realidad y como ya vimos, nunca encajan con todo), sino porque se encuentra otro modelo o teoría que explica más fenómenos, o lo hace de manera más económica o elegante.

Esto último es de suma importancia. A veces creemos que porque algo no está accesible a nuestros sentidos de manera directa, lo que sabemos acerca de esto es *irremediamente* conjetural y que más tarde o más temprano vendrá alguna otra idea para reemplazarlo si esperamos lo suficiente. Pero un cuerpo teórico es mucho más sólido que cualquier dato individual. Esta no es una discusión académica irrelevante. El calentamiento global, por ejemplo, es una idea clave de un cuerpo teórico que describe de manera

adecuada el comportamiento de la atmósfera terrestre. Puede existir una observación individual que contradiga ese cuerpo teórico, pero esto no significa que sea incorrecto. Las teorías no cambian por un dato o dos. El proceso es mucho más complejo. Encontrarán una discusión más profunda al respecto en el capítulo 17. Quienes tienen intereses económicos y políticos en este tema con frecuencia usan argumentos que ignoran la naturaleza de las teorías científicas. Es por eso que resulta tan importante que como ciudadanos comprendamos, aunque sea a través de un puñado de ejemplos bien elegidos, qué son, cómo nacen, cómo crecen y a veces cómo mueren las teorías científicas.

## Sí hay certezas

No podemos estar ciento por ciento seguros de que las cosas son como lo suponemos, pero las teorías científicas resultan el mejor acercamiento que tenemos y muchas veces producen una certidumbre tan grande que es casi como si pudiéramos ver las cosas en vivo y en directo. Algunos aspectos de esta visión son más certeros y es probable que no cambien nunca; otros son tentativos. No debería sorprendernos que algunas de estas visiones se transformen con el tiempo, en la medida en que obtenemos más datos. Pero estos cambios no deberían sacudir la estructura más interna y fundamental de las ideas, como vimos más arriba con el caso de los dinosaurios: una pluma más o menos es cuestión de debate, su existencia pasada no lo es.

Hasta hace no mucho tiempo, la escuela tendía a pintar los conocimientos científicos como verdades inamovibles y esto nos llevó a plantear la necesidad de enseñar una visión que recogiese los aspectos más tentativos y cambiantes de la ciencia. Como consecuencia, nos fuimos para el otro extremo y, en el celo por enfatizar lo tentativo, a veces nos olvidamos de que la ciencia brinda un gran cúmulo de certezas y conocimientos que con toda probabilidad no cambiarán nunca. Una buena enseñanza de la ciencia debería lograr que apreciásemos estas sutilezas. Como ciudadanos, debemos ser conscientes de que algunas cosas ya las sabemos más allá de toda duda razonable (la duda absoluta, filosófica –y a mi juicio, totalmente inútil–, esa que cuestiona la existencia de lo más obvio, como sillas y mesas, no es susceptible de ser aplacada; pero a los fines prácticos, poco

importa). Por ejemplo, hay 91 elementos químicos en la naturaleza (otros tantos pueden ser creados por humanos en laboratorios y aceleradores de partículas). Nuestro conocimiento de la naturaleza química del universo es tan completo y profundo que ya sabemos que no existen otros elementos y que nunca encontraremos otros elementos fuera de los que ya están en la tabla periódica. Nos han reiterado tanto que el conocimiento científico es tentativo y que las teorías cambian con el tiempo que aceptamos la noción errónea de que todo está en tela de juicio. No es así: el núcleo central de las grandes teorías científicas está avalado por tantas observaciones independientes, hechas en tantos contextos diferentes, que ya estamos seguros de que son ciertas. Y esto es de máxima importancia en debates públicos. Las vacunas funcionan. No hay dudas al respecto, ni lugar a las opiniones. Sabemos cómo funciona la realidad en muchísimos casos. Es importante que sepamos (y que enseñemos) este aspecto de la ciencia, que está fuertemente enraizado en la naturaleza de las teorías científicas.

### **Cómo sabemos lo que sabemos: crecimiento y validación de los cuerpos teóricos**

Otra de las características centrales de los cuerpos teóricos que quiero destacar en las viñetas es la forma en que se validan, crecen o cambian. En otras palabras, cómo nos aseguramos de que realmente sirven o son ciertas. En general los científicos se cuidan de decir que una teoría es cierta o es falsa, porque para muchos esta no es una cuestión investigable. Es preferible decir que una teoría es válida o no lo es. Su validez puede residir –y en gran medida reside– en su poder, su utilidad, su capacidad para permitirnos manipular la realidad y los datos con mayor comodidad y para guiarnos en nuevas investigaciones. Pero también, para muchos, la validez de una teoría significa que nos acerca más y más a una visión verdadera de la realidad y la comprensión de su sustento material, aunque invisible. O sea que cuanto más válida sea una teoría, creemos que es más cierta y confiamos en que lo que describe es verdadero y real. Pero sea como fuere, existe un consenso muy grande acerca de los mecanismos legítimos para validar los cuerpos teóricos o para asignarles niveles de validez más altos.

Digamos de entrada que las teorías no se prueban de una sola vez y por completo con un gran experimento crucial que cierra la discusión. Por lo general, nacen como una idea muy hipotética acerca de la realidad. En este sentido, es como cuando decimos: “Ah, tengo una teoría de por qué el inodoro siempre pierde, a pesar de que lo arreglamos todos los meses”. Como ya vimos, las teorías tienen en su corazón nociones que provienen de la más desatada imaginación. No se deducen de ningún experimento ni se derivan linealmente de ninguna observación: son propuestas locas sacadas de las galeras de los científicos. Pero no cualquier idea vale. Lo primero y principal que le exigimos a esa hipótesis inicial es que sea consistente con todo lo observado hasta ese momento. Es más, le pedimos que lo ordene y le dé sentido. De lo contrario, la teoría no nos sirve para nada.

Si la teoría más o menos ayuda a entender la realidad de observables, entonces hay que tratar de robustecerla con más y más observaciones que sean explicadas por la teoría. Esto quiere decir que esas observaciones deben encajar lógicamente en la trama de ideas propuesta por la teoría (hablando con propiedad, diríamos que las observaciones deben deducirse lógicamente de los postulados teóricos [Klimovsky, 2005]). A medida que la teoría acomoda más y más observaciones y resultados experimentales, crece en validez y credibilidad. En los capítulos que siguen veremos varios ejemplos que explican esto.

Muchas veces la estructura conceptual de la teoría sugiere una observación que aún no ha sido realizada. Algo así como “Si todo esto es cierto, debería haber un monstruo en ese clóset”. Por supuesto, si abrimos la puerta del clóset y lo encontramos, diremos: “Ajá, te lo dije: mi teoría es cierta” (aunque es muy posible que seamos devorados por el monstruo, lo que pondrá fin a nuestros debates filosóficos). Estas observaciones sugeridas por la teoría suelen denominarse “predicciones” y ejercen una gran influencia sobre los científicos. Cuando se cumplen, resultan altamente convincentes de la validez de la teoría y son mucho más “flasheras” que el hecho de haber acomodado un par de observaciones más. Algunos descubrimientos clave, como la existencia del planeta Urano o del ARN mensajero dentro de las células, no ocurrieron por casualidad, sino porque los científicos salieron literalmente “a la caza” alertados por la predicción de una teoría.

Los científicos añoran una visión coherente y completa de la realidad. Pocas cosas son más gratificantes que cuando dos o más teorías separadas

encajan o confluyen en una sola cosmovisión, o en un par de visiones altamente coherentes. Esto da apoyo a *ambas* teorías. Por ejemplo, la genética clásica se unió con la teoría celular para producir una visión única: la teoría cromosómica de la herencia. Los fenómenos eléctricos y magnéticos (cada uno con su cuerpo teórico) fueron ensamblados en un gran corpus en el siglo XIX: la teoría electromagnética. Cuando esto sucede, la teoría más grande pasa a acomodar un conjunto mucho más vasto de fenómenos y esto nos indica que estamos en el buen camino. Durante el último siglo muchas ideas en la química, astronomía, biología, física y geología han producido visiones cada vez más coherentes de unas con otras, lo que prestó mutua credibilidad e hizo el todo muchísimo más creíble. En algunas áreas, estamos ante edificios de conocimiento de una solidez sin precedentes.

No pensemos que una teoría se queda sentada ganando validez con el tiempo, sin que le pase nada. A medida que las teorías se ponen a prueba con experimentos, nuevas observaciones o predicciones, las ideas iniciales se irán refinando, ajustando, ganarán precisión y, sobre todo, detalles que las hacen más ricas, completas y profundas. Aunque también puede suceder que encuentren obstáculos serios. En esos casos, se hacen algunos ajustes o cambios para que la teoría acomode mejor las nuevas observaciones.

Durante mucho tiempo, imaginamos a los dinosaurios paraditos y con la cola en el suelo, hasta que se descubrieron pisadas fósiles y los científicos se dieron cuenta de que caminaban con la cola en el aire y a gran velocidad. La visión de los dinosaurios, entonces, cambió mucho y rápidamente; la nueva visión era mucho mejor, acomodaba más datos y todavía era exitosa en acomodar todo lo que se sabía hasta ese momento.

Esto nos da la pauta de que una teoría vieja tal vez sea más válida y cierta que una teoría muy joven (más saben por viejas que por diablas). Y sabremos también que una teoría con mucho basamento, que conecta muchas observaciones, es más fuerte que otra que le da sentido a un rango muy acotado de fenómenos. También esto nos dice que la validación de las teorías es indirecta y trabajosa y que tenemos que ser pacientes cuando los científicos se muestran cautos o terminan cambiando alguno que otro detalle de una teoría ya conocida.

## Otras características de los cuerpos teóricos

Hasta aquí, las ideas fundamentales acerca de las teorías que aparecerán en todas o casi todas las viñetas del libro. Resumamos:

- Las teorías son ideas que permiten conectar observaciones que, de otra forma, resultan inconexas, y dotarlas de significado. Muchas veces brindan una manera más profunda de ver la realidad.
- Estas ideas son muy imaginativas y no se desprenden necesariamente de la observación de la naturaleza.
- Las teorías se validan buscando más y más datos que encajen de forma elegante en el esquema propuesto.
- Como las teorías son la síntesis de muchos datos ordenados de manera coherente, tienen una solidez mayor que cualquiera de sus partes. De hecho, las teorías nunca encajan todos los datos, pero no se descartan hasta que no se encuentre una alternativa mejor.

Estas cuatro serían las ideas más importantes. Pero hay muchas otras que muestran a las teorías con vida, aunque quizá no se apliquen a todas con el mismo vigor. Veamos algunas. (Para ahondar en aspectos menos lógicos pero importantes en el proceso de construcción y aceptación de marcos teóricos, les recomiendo el hermoso ensayo del premio Nobel de Química Roald Hoffman [2003]).

Las teorías son objetos bellos y los científicos valoran muchísimo la “elegancia” de una idea. A veces, argumentan que algo debe ser cierto justamente porque es demasiado hermoso como para no serlo (parece ingenuo, pero Galileo sostenía que nuestro sentido estético está en consonancia con la estructura del universo y por eso nos parece lindo algo cuando detectamos intuitivamente su certeza; el argumento, claro está, es peligroso).

Las teorías deben ser frugales y portátiles. Es mejor cuando explican con economía de recursos y más aún si mucha gente las puede entender sin mayor dificultad.

Las teorías se consideran buenas cuando sugieren nuevos experimentos y alumbran el camino por seguir de todo un campo de conocimiento. Con frecuencia, el marco teórico nos señala vacancias en el universo de datos, pero también nos dice cuáles son las preguntas fundamentales, los problemas clave o incluso cuáles son comprensibles y en cuáles no perder el tiempo. También sugiere cómo planear y llevar adelante experimentos o tratamientos. El cóctel de drogas antirretrovirales para el sida, ideado por el médico y biólogo David Ho, por ejemplo, está directamente sugerido por pensar la evolución del VIH en el marco de la selección natural de Darwin. Por supuesto que esto es un arma de doble filo, porque así como una teoría ilumina un camino puede oscurecer otro. Por ejemplo, Dalton tenía una visión muy particular de la constitución microscópica de los gases que lo ayudó a formular la teoría atómica; pero esa misma visión le impidió interpretar de forma correcta los resultados de Louis Gay-Lussac. Fue Amedeo Avogadro, con otra concepción de la naturaleza de los gases, quien logró dar sentido a los resultados de Gay-Lussac (para detalles de este ejemplo, véase Gellon, 2010).

En numerosas ocasiones, los científicos producen ideas que no son tan abarcativas o tan acabadas como el resto de las teorías. Los modelos teóricos, por ejemplo, con frecuencia son más acotados. La estructura de doble hélice del ADN es un modelo teórico (no es directamente observable y acomoda elegantemente muchas observaciones), pero no llega a ser una teoría completa. La tabla periódica no propone una estructura particular de la realidad, pero tiene muchas de las características de las teorías. Otras visiones de la realidad, como las que proponen la biología celular o la biología molecular, no parecen ser teorías, aunque están densamente pobladas de pequeños modelos como los del ADN y propuestas de mecanismos detallados que no son observables de manera directa. Si la biología molecular es o no una teoría, está en discusión. Y este es el tipo de discusiones en las que esperamos que nuestros alumnos puedan participar si conocen un poco mejor el funcionamiento de la ciencia y la forma en que se construyen sus ideas más abstractas.

## Las teorías científicas en el aula

Hasta este momento quise expresar que las teorías son las ideas más fuertes, globales y confiables que tenemos en ciencia, pero al mismo tiempo que no son como otras ideas de todos los días. Esto se debe, en parte, a que poseen tanto aspectos concretos como abstractos o imaginados y también a que la forma de saber si son ciertas o válidas es indirecta y requiere una buena cantidad de trabajo detectivesco. Y estas dos características juntas implican que como ciudadanos debemos conocer un poco acerca de esas teorías, pero además debemos saber cómo se forjan y cuál es la naturaleza de sus partes. Las versiones chatas y simplificadas del conocimiento científico no solamente nos roban la posibilidad de disfrutar de la comprensión profunda, sino que nos dejan desnudos y sin armas en discusiones que pueden ser muy relevantes para nuestras vidas. Hemos visto ya el caso de la evolución o del calentamiento global. Algunas de las manipulaciones o imposturas intelectuales que revisamos son: atacar una teoría porque no lo explica todo, sugerir que las teorías son meras conjeturas sin evidencia, plantear los aspectos abstractos (o teóricos) como observaciones, proponer que un solo dato puede dar por tierra con una teoría, sostener que una teoría no puede cambiar nunca o que está destinada a desaparecer y ser reemplazada por otra. Todas estas insinuaciones son falsas y, a menudo, peligrosas.

Esto quiere decir que no solo debemos enseñar en la escuela los contenidos de las teorías científicas, sino también su estructura y naturaleza, porque no hay otro modo de conocer el contenido de las grandes teorías en ciencia y menos aún cómo hacen los científicos para construirlas. Entonces, ¿cómo se hace para enseñar todo esto en el aula?

La lógica de la estructura interna de las teorías es un conocimiento que entra dentro del terreno de la epistemología o de lo que hoy se llama la “naturaleza de la ciencia” (Nature of Science, o NOS, por sus iniciales en inglés). Sabemos que enseñar esto no es fácil (Saavedra y Opfer, 2012) y que no viene solo, simplemente porque enseñemos el contenido conceptual dentro de cada teoría (Bao y otros, 2009a y b, Ding y otros, 2016). Por supuesto, no basta con mencionar algunos conceptos sobre la naturaleza de la ciencia o presentar un bloque o capítulo inicial sobre “método científico” que resulta corto e incomprensible. Sabemos entonces que la naturaleza de la ciencia debe enseñarse en el aula para que nuestros ciudadanos estén alfabetizados científicamente. Lo que no está del todo claro es cómo hacerlo.

## Historia de la ciencia y narraciones en la enseñanza

James B. Conant fue uno de los primeros pensadores en identificar el problema de la enseñanza de la naturaleza de la ciencia y en proponer una posible solución. Sus ideas siguen siendo un faro en este tema (Conant, 1948, 1951). Conant era un químico, pero estuvo muy involucrado en temas de política científica. Junto con Vannevar Bush lideró el esfuerzo bélico científico de los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. En los años cincuenta planteó que la manera de ofrecer a los estudiantes de ciencia “un sabor de cómo se generan las ideas en ciencia” es introducirlos a estas a través de la historia de la ciencia: relatos relativamente pormenorizados que den cuenta de los problemas con que tuvieron que enfrentarse los científicos en casos particulares, qué rutas tomaron, qué errores cometieron, cómo se las ingenieron para pensar soluciones, plantear experimentos, interpretarlos a la luz de las ideas de la época, cómo se pelearon entre sí y con qué herramientas arribaron a consensos. Sobre la base de esta idea, Conant reunió en la Universidad de Harvard, de la cual fue rector, un equipo de científicos e historiadores de la ciencia para realizar un trabajo fundacional: el Harvard Case Histories in Experimental Science (Conant, 1957). Se trata de una serie elaborada y exquisitamente investigada de historias de casos específicos, un conjunto de relatos sobre cómo se desarrollaron ciertas ideas clave en la ciencia: el descubrimiento del oxígeno, del concepto de carga eléctrica, de la teoría de gérmenes, entre otras. Desde entonces muchos otros han desarrollado este tipo de recursos que van desde relatos más o menos largos a viñetas cortas, con o sin ejercicios para ayudar a quienes los usen a desmenuzar los aspectos científicos, epistemológicos y de la sociología de la ciencia, a mirar la historia con la lupa de la naturaleza de la ciencia. Muchos de estos recursos han sido probados y estudiados, y sabemos ahora que en gran medida son efectivos (Wandersee, 1990; Stinner, 1992; Kubli, 1999; Kenealy, 1989).

Estos recursos (en forma de casos, viñetas), sin embargo, deben estar bien pensados para poder ilustrar los aspectos deseados. No basta con encontrar un evento en la historia de la ciencia y “dejarlo que fluya para que cuente su historia”. Es necesario saber de antemano qué aspectos de la naturaleza de la ciencia se desea resaltar y poder ponerlos de relieve en el relato (Gellon, 2008; Klassen, 2009b). O sea, hay que manipular la historia con un criterio didáctico. Esto puede hacer que se les pongan los pelos de punta a muchos

historiadores, y el riesgo es presentar una visión tergiversada de la ciencia y su historia. Pero no hacerlo también tiene sus riesgos y costos.

Las viñetas históricas tienen dos grandes virtudes desde el punto de vista educativo. La primera es que recogen un montón de información que yace en los eventos y sucesos, por ejemplo, qué imaginaron los científicos, cómo se pelearon, cómo resolvieron las cuestiones, qué errores cometieron. Esta información por lo general está ausente en las presentaciones tradicionales de los contenidos más canónicos y es justamente la que resalta la naturaleza de la actividad científica (ese objetivo que, como mencionamos, es tan importante y a la vez tan complejo de enseñar) (Monk y Osborne, 1996).

La otra gran virtud es que constituyen narraciones o cuentos acerca de lo sucedido. Los relatos encienden una parte muy íntima de nuestra cognición, en palabras más sencillas: nos hablan directo al corazón. Una buena historia nos mantiene cautivos y en vilo, nos emociona, nos intriga, y es muy memorable, con toda la utilidad que esto supone cuando aprendemos algo (Klassen, 2009a; Egan, 1989). Pero además, gran parte del poder educativo del relato radica sobre todo en que da *orden y lógica* a una serie de eventos. No es un mero desarrollo en el tiempo, sino una secuencia de ideas, acciones, intenciones que están vinculadas: una causa la otra, o abre el espacio para que suceda o la contradice o la supera o la resuelve. También en los relatos hay intencionalidad y significado en las acciones. Los personajes sienten cosas y hacen lo que hacen con ciertas razones u objetivos. Parte del aprender es armar y tejer relatos dentro de la propia mente, y el formato relato en la enseñanza ayuda precisamente a construir una narración coherente que dé sentido a lo que se está estudiando. Algo parecido pasa con las teorías en ciencia (Klassen, 2009b; Wandersee, 1992; Martin y Brouwer, 1991).

## Para ir cerrando

La palabra “teoría” tiene un significado muy especial para los científicos, distinto del que se le da a diario, cuando decimos, por ejemplo, “Tengo una teoría sobre qué pasó con los fideos que se pegaron hoy al mediodía”. La distinción es importante, porque en el mundo de la ciencia las teorías son las formas en que están codificadas las ideas más profundas, acabadas e

impactantes, esas justamente que la escuela trata de inculcarnos. Y como vimos, esas ideas se construyen, manipulan, validan y refinan de maneras especiales, a veces complicadas, y no siempre coinciden con nuestras formas cotidianas de pensamiento. Pero como se trata, en efecto, de las ideas más importantes, bien vale la pena conocer cómo se estructuran. Y siguiendo el consejo de Conant y de otros muchos educadores y científicos, nada mejor para familiarizarnos con la idea misma de teoría que zambullirnos de lleno en varios ejemplos vívidos.

En las páginas que siguen los invito a recorrer un puñado de teorías. Cada capítulo presenta una viñeta histórica breve acompañada de algunos comentarios y también de preguntas y actividades. La intención es que los docentes puedan proponer la lectura de la viñeta a sus estudiantes y luego trabajar con las actividades; los comentarios sirven de profundización para el docente y para enriquecer la viñeta y poner de relieve las características de los cuerpos teóricos presentes. Por supuesto que esto es solo una sugerencia que ha servido para ordenar el material; sin duda muchos docentes modificarán las viñetas para adaptarlas a sus propios objetivos y contextos educativos. Y también espero que el libro llegue a lectores que no son docentes pero sienten interés por la ciencia. En el capítulo final veremos algunas formas de usar y construir viñetas. Pero ahora, demos paso a las protagonistas: las teorías científicas en acción.

---

[1] Pueden encontrar esta historia en *Había una vez el átomo*, publicado en la colección Ciencia que ladra (Buenos Aires, Siglo XXI, 2016).

## 2. El sistema solar pitagórico

En esta primera viñeta histórica estudiaremos, de manera muy simplificada, cómo los pensadores de la Antigüedad –particularmente los griegos– llegaron a concebir una visión bastante compleja del sistema solar, según la cual un puñado de astros gira alrededor de una Tierra inmóvil. Puede parecer extraño que empecemos nuestro recorrido por una idea, una teoría, que más tarde fue desechada (a favor de la versión de Copérnico con el Sol en el centro del sistema solar). Podríamos pensar que si el modelo antiguo, geocéntrico, fue descartado es porque estaba mal, y que si estaba mal es porque no era científico. Veremos más adelante cómo y por qué la idea antigua fue reemplazada por nuestra concepción actual y analizaremos entonces qué hacen los científicos cuando tienen que optar entre dos modelos que compiten o cuando una teoría parece no ser adecuada y debe ser cambiada drásticamente. Por el momento, revisemos qué tenían entre manos los antiguos y por qué lo que propusieron, lejos de ser ridículo, era una de las ideas más razonables que se pudiera concebir. Una idea no es más o menos científica porque se la descarte más tarde.

### Mirar el cielo e imaginar el cosmos

---

Los griegos de la Antigüedad no tenían distracciones nocturnas como las que tenemos en la actualidad; sin televisión, luz eléctrica o papel impreso, por las noches se dedicaban a las bacanales y a mirar el cielo estrellado. Eran muy observadores y vieron cosas que ahora nos pasan desapercibidas a pesar de estar fácilmente a nuestro alcance.

Lo primero que observaron es que los astros del cielo nocturno se mueven del mismo modo que el Sol durante el día: salen por el este y se ponen por el oeste. La Luna y todas las estrellas hacen

lo mismo, se mueven aproximadamente a la misma velocidad que el Sol y dan una vuelta entera en 24 horas. Esto es cierto para todas las estrellas, menos una, Polaris, que nunca se mueve. Es más, las estrellas que se encuentran muy cerca de Polaris hacen giros muy pequeños alrededor de esta estrella quieta. De hecho, todo el cielo parece girar como si fuera una esfera hueca con un clavito pinchado justo en ese punto, al que se llama “polo norte celeste”. Por eso hablamos de la “bóveda celeste”. De este modo, si miramos el cielo toda la noche y mentalmente aceleramos ese movimiento, nos da la impresión de que estamos quietos y el cielo rota sobre nuestras cabezas de este a oeste como un gran telón circular. Los griegos especulaban con que la bóveda era opaca y oscura, pero que tenía infinidad de agujeritos que dejaban pasar la luz celestial que había del otro lado.

La Luna, sin embargo, tenía particularidades que la distinguían. Si uno la mira un día cualquiera, se mueve de este a oeste como todo bicho en el cielo, y de hecho tiene un recorrido muy parecido al del Sol. Pero si uno espera un par de días verá que la Luna se desplaza a una velocidad distinta del resto de los astros: sale y se pone todos los días una hora más tarde que el Sol o las estrellas. O sea que se mueve de manera más lenta que el Sol. La pregunta es cómo hace para no chocarse con el Sol y las estrellas con las que comparte el recorrido en el cielo. Es evidente que la Luna tiene que moverse en una esfera diferente a la del Sol y las estrellas, que la bóveda tiene por lo menos dos capas, una para la Luna y otra para el resto. Por otro lado, los eclipses nos muestran que la Luna está más cerca de la Tierra que el Sol y, seguramente, que las estrellas.

Pero la cosa no termina ahí. Si uno mira las estrellas con detenimiento, notará que salen y se ponen algo más *temprano* cada día (no mucho, unos cuatro minutos, pero después de un mes sí se nota). Es decir que el Sol se mueve un poco más despacio que las estrellas. Después de un año entero, las estrellas han dejado al Sol tan atrás que logran alcanzarlo de nuevo como cuando corremos carreras en círculos y volvemos a pasar al más lento. Al cabo de un año, las estrellas vuelven a salir a la misma hora que el año anterior y se repite un ciclo. Pero eso quiere decir

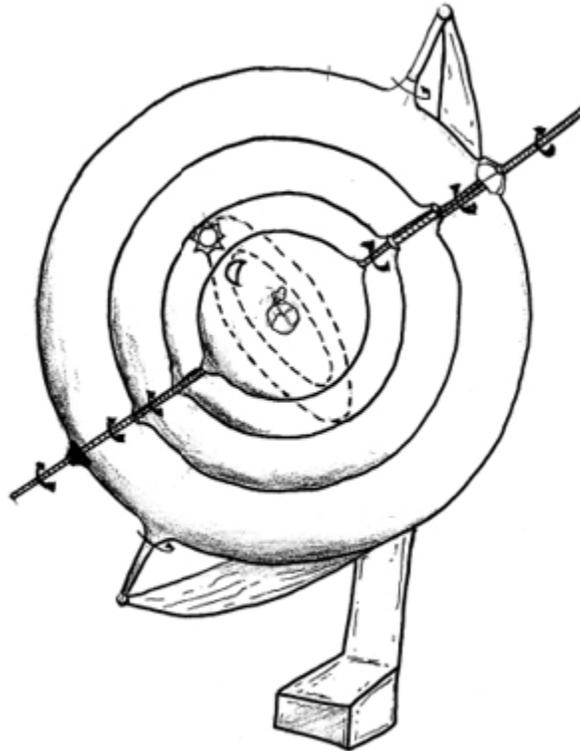
que existen tres capas para la bóveda, que se mueven a velocidades distintas: la capa de las estrellas, la del Sol y la de la Luna. Y esas capas tienen que ser transparentes, porque si no fuera así, no veríamos las capas que están por detrás. Los griegos las llamaron “esferas celestes”, y se especulaba que estaban hechas de un material “celestial”, especial, eterno e incorruptible (el llamado “quinto elemento”).

Todo esto parecía sencillo, hasta que algunos pensadores notaron, aguzando el nivel de precisión de sus observaciones, que hay unas pocas estrellas que rompen filas con sus constelaciones y cambian de posición respecto del fondo estrellado. Se mueven por su cuenta, a su propia velocidad. Son muy pocas y por eso el cielo nocturno no nos parece un caos sino que tiene siempre las mismas constelaciones. Llamaron a estos astros “estrellas vagabundas”. “Vagabundo”, en griego, se dice planeta. Todas estas estrellas vagabundas o planetas salen por el este y se ponen por el oeste, como el Sol, la Luna y las estrellas; todas salen cada día un poquito más temprano, pero cada una tiene su propia velocidad. De esto dedujeron los pensadores que debían estar alojadas en sus propias esferas celestes, una para cada una. Los planetas eran Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Con la Luna, el Sol y las estrellas de fondo, tenemos siete esferas y la bóveda final.

Hacia el año 500 a.C. la escuela de Pitágoras había ideado una hermosa manera de imaginarse la estructura del cosmos. La Tierra, una roca en forma de pelota, está en el centro de un conjunto de esferas huecas y transparentes. La esfera más exterior contiene a las estrellas fijas y gira de este a oeste alrededor de la Tierra dando una vuelta cada veinticuatro horas. Las esferas más internas están enganchadas a esta esfera exterior y por lo tanto también ejecutan ese giro de este a oeste cada día. Pero además, cada esfera interna tiene un giro propio respecto de la esfera exterior en sentido inverso (es decir, de oeste a este). Por eso se mueven ligeramente más lento respecto de las estrellas. Cada esfera sucesiva tiene un nuevo movimiento inverso de oeste a este, de modo que cuanto más nos acercamos a la Tierra, más lento es el movimiento del astro en relación con las

estrellas. La Luna tiene el movimiento invertido más rápido, o sea, es la que se mueve más lentamente respecto de las estrellas. Es, incluso, más lenta que el Sol, como ya vimos.

**Figura 2.** Una forma de imaginar las esferas celestes



Este esquema era muy hermoso. Un mecanismo simple, con reglas sencillas, daba sentido a todo lo que se veía en el cielo. Pero tenía dos grandes problemas.

- No permitía hacer cálculos: no se lo podía usar para saber cuándo iban a estar los astros en determinadas posiciones (cuestión nada menor para la astrología, que intentaba relacionar los eventos de la humanidad con las posiciones de los astros).
- No podía explicar adecuadamente ciertos aspectos extraños del movimiento de los planetas (que veremos más adelante).

No todo es perfecto; como se dice con frecuencia, “es lo que hay”.

---

## Comentarios y ejercicios

Las observaciones del cielo mostraron a los antiguos que hay fenómenos que suceden con llamativa regularidad y les sugerían, por lo tanto, que eran la manifestación de un *mecanismo*, posiblemente como una gran maquinaria. La gran pregunta era cómo estarían organizados los cielos, cómo era la “maquinaria celestial” que producía en el cielo nocturno los movimientos que estamos acostumbrados a ver. ¿Por qué hay astros que se mueven a diferentes velocidades y por qué se cumplen ciertos ciclos? El desafío era encontrar un modelo sencillo que acomodara con elegancia todas las observaciones que ellos hacían desde la superficie de la Tierra. Los pensadores antiguos produjeron muchos de estos modelos. El que se presenta en la viñeta fue invención de la escuela pitagórica, aunque no se sabe qué rol cumplió el propio Pitágoras, dado que su escuela perduró casi doscientos años. Se piensa que el pitagórico fue el primer modelo en considerar una Tierra esférica, pues los anteriores la imaginaban como un disco plano.

La cosmovisión de los pitagóricos busca acomodar con belleza una serie de observaciones complejas. Para eso, precisamente, sirve una teoría científica. Decimos que las teorías son esquemas de pensamiento que le dan un sitio lógico a una serie de observaciones que de otro modo parecen inconexas o caprichosas. Por otro lado, lo que vemos en este ejemplo es que la teoría invoca o inventa una serie de nociones u objetos que no son observables (como las esferas transparentes, que no son perceptibles), pero que aparecen para darles sentido a las observaciones. Es decir que en una teoría podemos distinguir por lo general ciertas cosas que son observables de manera directa (el movimiento del Sol en el cielo) y otras imaginadas (el Sol gira en un círculo alrededor de una Tierra esférica).

A continuación, ofrecemos, para trabajar con los alumnos, algunas consignas que buscan poner de relieve la relación entre las teorías (como ideas “inventadas” o imaginadas para dar sentido a una serie de datos) y las observaciones o los datos que dichas teorías buscan explicar.

## Propuestas para el aula

1. En la siguiente lista marquen con una O si se trata de observaciones y con una T si son nociones teóricas inventadas para acomodar las observaciones.

	O/ T
A El Sol sale por el este y se pone por el oeste.	O
B La Tierra es una esfera y el Sol gira alrededor de ella.	T
C Las estrellas no cambian posiciones unas respecto de otras en el cielo.	
D Polaris es una estrella que no se mueve.	
E Todas las estrellas giran en torno a Polaris de este a oeste.	
F La Luna sale y se pone una hora más temprano cada día.	
G El Sol y la Luna se mueven en esferas celestes diferentes.	
H Los planetas son estrellas que no respetan las constelaciones y se mueven en el cielo con velocidades propias.	
I Cada planeta tiene su propia bóveda a una distancia diferente de la Tierra.	
J Las esferas celestes son transparentes y de un material incorruptible que no se encuentra en la Tierra.	

2. ¿Por qué los pitagóricos postulaban que las esferas celestes son transparentes?
3. ¿Qué tipo de observaciones llevaron a los antiguos griegos a postular que el Sol y la Luna están a diferentes distancias de la Tierra?
4. ¿Por qué cada planeta debe estar en una esfera propia diferente de la que tienen las estrellas, la Luna o el Sol?

5. Pregunta desafiante. El Sol y las estrellas se vuelven a alinear en la misma posición relativa después de transcurrido un año: ¿qué otra cosa vuelve a ser igual después de un año? En otras palabras, si se perdieran en una isla desierta, ¿cómo podrían darse cuenta de si ha pasado un año o no?
  6. Pregunta desafiante. Si el tema les resulta interesante, busquen cuánto tarda un planeta determinado (o cada planeta) en volver a estar en la misma posición respecto de las estrellas y comparen ese tiempo con lo que tarda el planeta Tierra.
  7. Si tuvieran que explicarle a una persona que no conoce el tema qué es y para qué sirve una teoría científica, ¿qué le dirían?
- 
- 

Hay dos preguntas “desafiantes”: proponen un recorrido propio. La 5 busca que los alumnos relacionen lo que pasa con las estrellas en un año, con otra definición de año (más cercana a nuestras vidas): en las latitudes templadas las estaciones y el largo de los días varían en un ciclo que dura también 365 días. La consigna 6 da pie a investigar lo que se denomina “año” de cada uno de los planetas. Considerando la observación del cielo, el año de un planeta es el tiempo que tarda en volver a una situación respecto de las estrellas. Ahora sabemos que este es el tiempo que demora el planeta en girar alrededor del Sol, pero eso naturalmente no se sabía en la época de los pensadores pitagóricos.

## Bibliografía

Levinas, M. L. (2012), *Las imágenes del universo. Una historia de las ideas del cosmos*, Buenos Aires, Siglo XXI.

Rogers, E. M. (2011), *Physics for the Inquiring Mind. The Methods, Nature, and Philosophy of Physical Science*, Princeton, Princeton University Press.

## 3. La Era del Hielo

La observación del cielo inspiró en los antiguos griegos una visión del cosmos. Podían ver el sistema solar “desde afuera”, por así decirlo, con el ojo de sus mentes. Habían forjado una “teoría del cosmos”, una idea que explicaba lo que veían. Hay teorías menos grandiosas, que se aplican a lugares o situaciones más acotados. En el siglo XIX, los geólogos se preguntaron cuál era el origen de los valles alpinos. En esa época existían explicaciones del origen de los valles, pero no resultaban convincentes para todos. Resolver este problema acotado –el origen de los valles alpinos– condujo a una idea en ese entonces curiosa respecto del pasado de la Tierra, que resultó una de las cosmovisiones más prósperas respecto de la historia de nuestro planeta.

### Bajo un manto de hielo

---

---

Muchos grandes cordones montañosos como los Alpes tienen entre las cumbres valles profundos, que dan la impresión de haberse formado por acción de la erosión. Por lo general los valles alpinos tienen ríos que corren en su fondo, y no es descabellado pensar que esos mismos ríos hayan cavado, a lo largo de muchísimos miles de años, los actuales valles. Los geólogos del siglo XIX eran partidarios de esta idea. Era muy fuerte en ese entonces la creencia de que grandes cambios en el paisaje podían deberse a la acción persistente de pequeñas, diminutas acciones a lo largo de muchísimo tiempo. Otra forma de explicar el origen de los valles era imaginar que una o unas pocas inundaciones descomunales habían provocado flujos gigantescos de agua que habían arrollado parte del paisaje.

Sin embargo, muchos aspectos del paisaje no encajaban con ninguna de estas dos hipótesis. Lo más curioso eran las rocas solitarias, que muchas veces eran más grandes que un camión o una casa. A menudo estas rocas, llamadas “erráticas” descansaban en lo alto de un monte o en el fondo de un valle y nadie tenía la menor idea de cómo se habían desplazado hasta allí. Ni una inundación ni un río podían mover semejantes moles y mucho menos desplazarlas hacia arriba, porque –como todos sabemos desde jardín de infantes– las rocas no flotan. El mineral del que estaban hechas era muy similar a minerales localizados muchos kilómetros más lejos. Por ejemplo, en Alemania hay rocas erráticas de pedazos de mineral de Escandinavia o rocas de granito en valles alpinos que parecen provenir de las alturas del Mont Blanc. ¿Cómo se desplazaron hasta su presente ubicación? Sin duda, no por la acción del agua...

**Figura 3.** Roca errática



Otros misterios estaban relacionados con las paredes de los valles, que tienen estriaciones y marcas que corren paralelas al

eje principal del valle. Estas estriaciones parecen ser producto de una erosión brutal. Pero era difícil pensar que el agua las hubiera causado. En efecto, sabemos que el agua, con el tiempo, tiende a alisar las superficies y hacerlas más pulidas y suaves, no estriadas.

Al pie de las montañas, en la boca de los valles –por decirlo así–, se encuentran pequeñas elevaciones de un material que, a diferencia del terreno circundante, no tiene estratos de roca unos arriba de otros. Parecen más bien pilas de escombros gigantes, compuestas de barro y rocas de todos los tamaños.

Todas estas características (y otras más complicadas) eran desconcertantes para los geólogos de la época.

A mediados de 1800, varios observadores sagaces propusieron una solución. El más destacado de ellos fue el paleontólogo suizo Louis Agassiz. Primero pensó que el único agente capaz de transportar las rocas erráticas era el hielo (especialmente hacia arriba, dado que las erráticas pueden “flotar” sobre el hielo). Luego advirtió que los glaciares alpinos dejaban marcas en las paredes rocosas similares a las estriaciones de los valles. Y por último observó que allí donde terminaban los glaciares había pilas de escombros sin estratificaciones llamadas “morenas” y que todos coincidían en que eran resultado de la escoria empujada por el movimiento del hielo. Sobre esta base, Agassiz propuso que los valles alpinos se habían formado por la acción erosiva de gigantescos ríos de hielo, megaglaciares que en el pasado se habían extendido mucho más al sur de las posiciones de sus actuales y minúsculas versiones. Pero las erráticas, las pilas enormes de escombros y las estriaciones eran observables en lugares muy alejados de cualquier glaciar, como en Escocia e Irlanda. Esto quería decir que, en algún pasado, glaciares gigantescos habían cubierto gran parte de la Tierra y, por lo tanto, que en ese pasado la Tierra debía haber estado mucho, mucho más fría que ahora.

**Figura 4.** Mesa glaciar: un ejemplo de una roca errática “flotando” sobre el hielo



Agassiz hizo públicas sus ideas en 1837 en una reunión científica. La reacción fue intensa: abucheos, gritos y una controversia que se prolongó por años. La idea de una “Era del Hielo” era difícil de digerir: en esa época se aceptaba que la Tierra se había formado a temperaturas muy altas y que desde entonces se enfriaba lenta pero inexorablemente. La idea de Agassiz implicaba que el presente era más caliente que el pasado (el Pleistoceno), lo cual no era compatible con un enfriamiento constante. La Era del Hielo tuvo, por lo tanto, una recepción pobre (¿podríamos decir “fría”?).

Sin embargo, otras piezas empezaron de a poco a encajar bien con la idea de una época glacial. El paleontólogo Edward Forbes estudió fósiles de moluscos en el fondo del mar, cerca de Inglaterra y encontró que en cierto período los fósiles correspondían a especies más parecidas a las variedades del Ártico, lo cual era un indicio de una época pasada más fría. Además, los geólogos sabían desde hacía tiempo (por observar la distribución de fósiles marinos) que la altura del mar había ido

variando con el tiempo. La idea de la era glacial ofrecía una explicación: en las épocas de frío una proporción más grande del agua global se encuentra atrapada en hielos continentales (glaciares) y el nivel del mar, por lo tanto, desciende. Es justamente lo contrario de lo que sucede en la actualidad con el calentamiento global, que ocasiona una subida del nivel del mar. Curiosamente, los períodos de bajo nivel del mar coinciden con fósiles árticos en zonas que ahora son templadas. Con el tiempo, los científicos fueron aceptando esta idea e incluso se hizo obvio que ha habido otras muchas eras del hielo, algunas más intensamente frías que las del Pleistoceno. La hipótesis de una Tierra en constante enfriamiento fue abandonada. Muchas otras líneas de evidencia apoyan la idea de que hubo no una, sino varias eras del hielo en el pasado remoto de la Tierra. Por ejemplo, actualmente es posible analizar qué tipo de átomos existen en burbujas de aire atrapadas en los hielos de la Antártida hace muchísimo tiempo. Y el tipo de átomos en el aire puede variar con la temperatura, de modo que este análisis nos permite inferir la temperatura del pasado. Y lo que se observa es que, en efecto, la composición del aire atrapado en el pasado es consistente con una Era del Hielo.

---

---

## Comentario y ejercicios

Espero que sean evidentes las similitudes entre el sistema solar de los antiguos y la Era del Hielo de Agassiz. En ambos casos hay una serie de observaciones básicas que plantean un enigma o problema. En el primero, las observaciones son todos los movimientos de los astros en el cielo y el problema es concebir un mecanismo cósmico que produzca este tipo de efecto mirado desde nuestro punto de vista en la Tierra. En el segundo, las observaciones son características físicas del paisaje de los valles alpinos y el enigma es cómo pueden explicarse esas características y al mismo tiempo proponer un mecanismo que haya dado origen a los valles por erosión. En ambos casos se presentan entidades o situaciones que son invisibles: las

esferas celestes que llevan a los astros en movimientos de giros y los megaglaciares que cubrían la mitad de la Tierra en el pasado. No podemos ver las esferas porque son muy grandes y nosotros estamos metidos adentro del sistema solar: es imposible mirar el sistema solar “desde afuera”. Los megaglaciares son cosa del pasado y sin una máquina del tiempo es imposible observarlos directamente. Se plantea la existencia de estas entidades imaginadas para poder resolver el enigma. El razonamiento es que “deberían existir o haber existido” si pretendemos que el universo tenga sentido. No podemos verlas, pero *inferimos* su existencia, las proponemos para darle sentido a la realidad.

En el caso de la Era del Hielo encontramos una nueva característica de los cuerpos teóricos. Notemos que Agassiz y sus contemporáneos propusieron la idea de la Era del Hielo en principio para resolver tres misterios que planteaba el paisaje: las rocas erráticas, las estriaciones de las paredes de los valles y las morenas (había otros, pero simplifiquemos). Agassiz propuso, entonces, que los “ríos de hielo” podían sostener y transportar grandes rocas; podían, al ser sólidos, raspar y tallar las paredes de los valles, y producir así estriaciones y morenas. Pero eso no bastó para consolidar la teoría de las glaciaciones. Lo que ocurrió fue que *después* de que Agassiz hubiera propuesto la idea, *otros investigadores* encontraron que esa idea les permitía explicar *otros* fenómenos. Por ejemplo: los fósiles de moluscos típicos del Ártico en las costas de Inglaterra y el cambio en los niveles del mar en diferentes épocas del pasado geológico. Permítanme remarcarlo una vez más: Agassiz no pensó su teoría para esclarecer el cambio en los niveles del mar, lo hizo para explicar el origen de los valles alpinos. Pero de pronto, y para sorpresa de todos, vemos que la teoría explica, o *acomoda*, nuevas observaciones para las que no fue construida. Cuando una teoría logra hacer esto, gana enorme verosimilitud. Cuanto más encaje con la teoría, más robusta es la teoría. Pero si las cosas que encajan no son justo esas para las cuales la teoría fue armada en primera instancia sino otras *nuevas*, termina siendo mucho más atractiva para los científicos. Si no hay que emparchar y modificar las teorías viejas o inventar otras cada vez que aparecen datos nuevos, entonces quiere decir que esas teorías deben ser realmente buenas.

Por último, vemos en este caso también que la aceptación de una teoría no es un proceso rápido ni necesariamente amigable. Agassiz padeció un enorme rechazo a sus ideas. Enfrentados a la evidencia, geólogos de talla como William Buckland, Roderick Murchison y Charles Lyell dudaban y

buscaban otras formas de acomodar lo que veían. Esto no es necesariamente malo. Es importante que los científicos no se casen con una nueva idea, sino que traten de conservar las viejas por todos los medios. Si someten las ideas nuevas a su encarnizado escepticismo, sin lugar a dudas encontrarán errores, y si sobreviven a ese escrutinio, es más probable que sean ciertas.

A continuación, una serie de consignas para resolver con los alumnos. Retoman lo trabajado en la viñeta anterior respecto de la relación entre las teorías (como ideas “inventadas” o imaginadas para dar sentido a una serie de datos) y las observaciones o los datos que dichas teorías buscan explicar.

## Propuestas para el aula

1. ¿Cuáles de las siguientes expresiones se refieren a fenómenos o entidades observables y cuáles a fenómenos o entidades propuestas de manera teórica? Marquen con una cruz en O si es Observable y en T si es teórica.

	Fenómeno o entidad	O	T
A	Los valles alpinos fueron tallados por la erosión de glaciares prehistóricos.		
B	Los glaciares dejan estriaciones en las rocas adyacentes.		
C	Los glaciares se mueven muy lentamente.		
D	Existen grandes rocas que no se asemejan por su composición al material geológico de la región donde se encuentran.		
E	En otras épocas la Tierra estaba mucho más fría.		
F	La composición isotópica de burbujas de aire atrapadas en el hielo antártico es diferente a la de ahora.		
G	Las estriaciones de los valles alpinos se deben al pasaje de los glaciares.		

2. ¿Alguna de las afirmaciones les resultó más difícil para determinar si era una teoría o una observación? ¿Cuál o cuáles y por qué?
3. ¿Cuál era el argumento principal, según el texto, por el cual los geólogos de la época no aceptaban la idea de una Era del Hielo?

4. Si les interesa el tema, busquen qué otras eras del hielo hubo, cuánto duraron y cuál fue la más fría. ¿Alguna vez estuvo congelada toda el agua de la Tierra?
  5. ¿Qué elementos en común ven entre la teoría de la Era del Hielo y la del sistema solar pitagórico? ¿Qué diferencias encuentran?
- 

## **Bibliografía**

Bolles, E. B. (1999), *The Ice Finders: How a Poet, a Professor, and a Politician Discovered the Ice Age*, Washington, DC, Counterpoint.

Carozzi, A. V. (1966), “Agassiz’s Amazing Geological Speculation: The Ice-Age”, *Studies in Romanticism*, 5(2): 57-83.

## 4. La tabla periódica

Es discutible si la tabla periódica de los elementos es un cuerpo teórico o tan solo un esquema clasificatorio. A diferencia de casi todas las teorías presentes en este libro, la tabla no produce una visión sobre mecanismos de acción o sobre la naturaleza invisible de la realidad ni propone entidades teóricas fácilmente imaginables, como los átomos o el sistema solar o los glaciares gigantes. Sin embargo, la tabla sí propone que la realidad está organizada de una determinada manera, que existe un “orden natural” en los elementos. En este sentido, como los cuerpos teóricos más tradicionales, nos habla de una realidad más profunda que escapa a nuestra mirada cotidiana. También, como las teorías, logra aunar en un sistema explicativo económico y relativamente sencillo una serie bastante grande de observaciones individuales a la que les da lógica y coherencia.

Antes de entrar en el relato, caben algunas aclaraciones. La viñeta habla de la tabla en su totalidad, pero en realidad se refiere a los grupos más sencillos, a las columnas 1 y 2, y de la 13 a la 18 (lo que antes era el grupo de columnas denominadas “A”) y saltea los metales más complicados en las columnas del medio, de la 3 a la 12 (antes denominadas “B”). Los primeros son los elementos cuya química está dada por los orbitales electrónicos más altos y sencillos, y resulta mucho más fácil entender la lógica de la tabla de esta manera. Otra aclaración es que se utiliza la noción arcaica de “valencia” para denotar la capacidad de unión de los átomos. Sería más adecuado hablar de números de oxidación, pero, de nuevo, la idea de “palitos conectores” entre átomos tiene la ventaja de evocar imágenes concretas y es muy útil en este contexto.

**Un lugar para cada cosa**

---

---

Al hacerse cargo en 1867 de la cátedra de Química General e Inorgánica de la Universidad de San Petersburgo, Dimitri Ivanovich Mendeleev descubrió que no había buenos libros actualizados de química general en ruso. Al tratar de escribirlo él mismo, advirtió que el tema era muy complicado y que necesitaba desesperadamente algún criterio organizador que le permitiera transmitir con eficacia los conceptos y la enorme cantidad de información relevante. Necesitaba una forma de clasificar y ordenar los elementos químicos.

De acuerdo con sus propiedades (que Mendeleev conocía muy bien), los elementos podían ser agrupados en familias. Por ejemplo, el litio es muy parecido al sodio y al potasio. Todos ellos son muy blandos, reaccionan de manera bastante violenta con el agua y forman sales muy parecidas. Forman la familia llamada “metales alcalinos”. El cloro, el flúor y el bromo son no metales bastante parecidos entre sí y constituyen otra pequeña familia de elementos. Las familias químicas reconocidas en la época de Mendeleev contenían elementos con la misma valencia, es decir, con la misma capacidad de unión con otros elementos. Así, los elementos de la familia de metales alcalinos tienen todos una valencia de 1, o sea, tienen un solo punto de unión con otros átomos. Otra familia de elementos era la de los alcalino-térreos, también metales muy reactivos, aunque en menor medida que sus primos los alcalinos. Esta otra familia reúne elementos con valencia de 2.

Mendeleev decidió usar, además de estas propiedades, otra característica clave de los elementos: sus pesos atómicos relativos, que habían sido calculados hacía muy poco por el siciliano Stanislao Cannizzaro. El químico ruso notó que si ordenaba los elementos por peso atómico creciente, a cada elemento de una familia determinada le seguía, por lo general, un elemento de otra familia determinada. Por ejemplo, después de un metal alcalino, siempre viene un metal alcalino-térreo. Y no solo eso: con frecuencia, a un elemento de valencia 1 le sigue un elemento de valencia 2, luego uno de valencia 3, luego de 4, y luego de 3, 2 y 1 sucesivamente. Usando la tabla actual, vemos lo siguiente.

Elemento	Litio	Berilio	Boro	Carbono	Nitrógeno	Oxígeno	Flúor
Peso atómico	6,9	9,0	10,8	12,0	14,0	16,0	19,0
Valencia	1	2	3	4	3	2	1

Cuando Mendeleev “vio” este patrón, no pudo dejar de pensar que no se trataba de un ordenamiento arbitrario de los elementos, que esta tabla que estaba forjando no era una clasificación que respondía solamente a su imaginación; el orden que estaba encontrando sin duda se debía a regularidades de la naturaleza, a ciertas propiedades fundamentales de los átomos. Él no sabía cuáles podían ser esas propiedades fundamentales, pero la tabla parecía ser real, reflejar algo de la realidad de los átomos. Comenzó entonces a tratar de acomodar todos los datos a su disposición dentro del esquema, pero no fue sencillo. El problema principal con que se enfrentó Mendeleev fue que los elementos no encajaban bien en su esquema. Si se ceñía estrictamente al orden de pesos atómicos, las familias no aparecían de manera natural. Si, en cambio, trataba de respetar las familias, quedaban huecos notorios sin rellenar en la tabla. Por ejemplo, el elemento inmediatamente más pesado que el zinc era entonces el arsénico, el cual, de acuerdo con sus propiedades, debía estar debajo del fósforo, y no del aluminio ni del silicio. Esto dejaba dos agujeros en la tabla. En vez de intimidarse por esta dificultad, con astucia Mendeleev convirtió problema en oportunidad. Dijo: “Acá lo que pasa es que hay dos elementos que todavía no se descubrieron”. Y no satisfecho con esto, pasó a predecir con precisión fantasmagórica las propiedades que estos elementos debían tener. Para lograrlo, Mendeleev hizo promedios de las propiedades de los elementos arriba, abajo, a la derecha y a la izquierda de cada elemento faltante. Valiéndose de esa técnica, en 1871 el químico ruso hizo predicciones de suma precisión acerca de tres elementos faltantes, incluyendo pesos atómicos, densidades del estado elemental, fórmula de los óxidos e hidróxidos y algunas propiedades de sus sales y punto de fusión aproximado.

Entre 1875 y 1886 tres nuevos elementos fueron aislados y descritos por investigadores en Francia, Suecia y Alemania (son

ahora el galio, el escandio y el germanio). Y resultó que las propiedades de los nuevos elementos coincidían casi a la perfección con las predichas por Mendeleev.

Pero esto no fue todo. Un físico y un químico, ambos ingleses –John Strutt, conocido como lord Rayleigh, y William Ramsay– aislaron y caracterizaron cinco gases nuevos presentes en cantidades minúsculas en la atmósfera. Todos eran muy parecidos y sus propiedades, inquietantes. Todos eran inertes, o sea, no reaccionaban químicamente con ninguna sustancia. Todos parecían estar constituidos de átomos libres (moléculas monoatómicas). Ninguno parecía encontrar su lugar en la tabla. Pero Ramsay tuvo una idea brillante. En el año 1900 se comunicó con Mendeleev para sugerirle que todos esos elementos nuevos podían acomodarse muy bien como una nueva columna entre los gases halógenos y los metales alcalinos. No solo había lugar y los pesos atómicos coincidían perfectamente, sino que su inclusión daba a la tabla una completud absoluta en el patrón de subidas y bajadas del número de valencia.

Empezando por la izquierda, tenemos valencia de 1, 2, 3, 4 y luego un descenso de 3, 2, 1. ¡Ahora la nueva columna agregaba la valencia cero! Una valencia cero corresponde a elementos que carecen por completo de capacidad de combinación, como sucedía con estos gases (no solo no se combinan con ningún otro elemento, sino que sus moléculas son monoatómicas, de modo que sus átomos no pueden unirse ni siquiera consigo mismos). Hoy se los conoce como “gases nobles”.

Los gases nobles fueron un horrible dolor de cabeza para Mendeleev y su tabla por varios años, pero la acomodación de Ramsay en una nueva columna no solo resolvió el problema, sino que produjo uno de los respaldos más sólidos y formidables a la increíble estructura erigida por Mendeleev. Rayleigh ganó el Premio Nobel de Física por su descubrimiento del argón y Ramsay, el Premio Nobel de Química por los demás gases nobles y su lugar en la tabla.

---

---

## Comentario y ejercicios

Si bien la tabla es diferente de otras ideas de corte teórico, es cierto que Mendeleev impone sobre la realidad un orden que sale en gran medida de su imaginación. Ahora bien, que él haya avizorado ese orden desde su imaginación no quiere decir que no se ajuste a la realidad. La tabla, como la idea de una Era del Hielo o un mecanismo para el sistema solar, es una invención que ayuda a poner las cosas en su lugar, a darles orden y sentido. Mendeleev no imagina un objeto o una situación inexistentes, pero sí una estructura en la manera en que los elementos se relacionan entre sí. Como ocurre con las ideas teóricas más clásicas, la tabla obtiene su credibilidad del hecho de acomodar en su estructura muchos datos. Como en el caso de la Era del Hielo, aparecen datos *después* de que Mendeleev propuso la tabla, y esta los incorpora con elegancia, sin tener que rescindir postulados básicos. Y esto –acomodar nuevos datos para los cuales la idea no fue desarrollada– le da a la idea mucha más fuerza y credibilidad.

En el caso de la tabla, vemos una característica nueva a la que los científicos le asignan bastante importancia. La tabla en manos de Mendeleev tiene agujeros vacíos que él usa para *predecir* la existencia de elementos desconocidos en esa época. En efecto, muchos cuerpos teóricos descubren vacancias en el conjunto de datos. Como si dijeran: “Si A, B y F son ciertos, también tendrían que serlo C, D y E. ¿Es cierto o no? Veamos”. Esto solo ya hace que las teorías sean muy valiosas, porque nos indican qué mirar, dónde buscar, qué esperar de la realidad. Pero, además, es una forma más de validarlas. Si las predicciones se cumplen, la teoría nos parecerá más creíble; si no se cumplen, sabremos que algo no funciona y, o bien hay algún problema con los datos, o bien un problema con la teoría. Como fuera, es terreno fértil para que los científicos traten de resolver el dilema.

Como en los capítulos anteriores, encontrarán a continuación consignas que pueden usarse en el aula de ciencias. Aquí abordamos los problemas de acomodación y predicción de nuevas observaciones y cómo contrastarlas con las observaciones originales que fueron puntapié inicial para la construcción de la teoría. Nos movemos, por lo tanto, más allá de la diferencia entre observaciones y nociones teóricas, tal como analizamos en las viñetas anteriores.

## Propuestas para el aula

---

---

1. ¿Qué datos tuvo en cuenta Mendeleev para imaginar su tabla?
  2. ¿Qué datos se obtuvieron después de que Mendeleev propusiera su tabla?
  3. ¿Qué datos fueron predichos por Mendeleev usando su tabla?
  4. Mendeleev creía tan fervientemente en su tabla que en tres oportunidades se animó a violar el orden creciente de pesos atómicos. Hay tres lugares en la tabla en que un elemento es más liviano que el que viene inmediatamente antes. ¿Cuáles son? Pueden resolverlo con solo mirar la tabla.
  5. Las valencias de los elementos suben y bajan y vuelven a subir de manera periódica. Se dice que es una propiedad periódica de los elementos. ¿Qué otras propiedades son periódicas? Encuentren en la web a) la que entiendan mejor y b) la que les resulte más incomprensible.
- 
- 

## Bibliografía

- Gellon, G. (2016), *Había una vez el átomo*, Buenos Aires, Siglo XXI.
- Giunta, C. J. (2001), “Argon and the Periodic System: The Piece that Would not Fit”, *Foundations of Chemistry*, 3: 105-128.
- Scerri, E. R. (2007), *The Periodic Table: Its Story and its Significance*, Oxford - Nueva York, Oxford University Press.

## 5. Dominios magnéticos

La siguiente viñeta no está basada en hechos históricos. La idea de dominios magnéticos fue desarrollada por Pierre-Ernest Weiss en 1906 y es mucho más compleja de lo que aquí se presenta, sobre todo desde el punto de vista matemático. La viñeta fue armada para repasar las ideas de acomodación, entidades teóricas y predicciones, pero al no ser histórica, las “predicciones” son ficticias, aunque rigurosas desde el punto de vista científico, y resultan adecuadas para estudiar el rol de las predicciones en las teorías.

En la actualidad, los dominios magnéticos pueden visualizarse con ciertas técnicas de microscopía y, aunque son pequeños, están constituidos por billones de átomos.

### Viaje al interior de los imanes

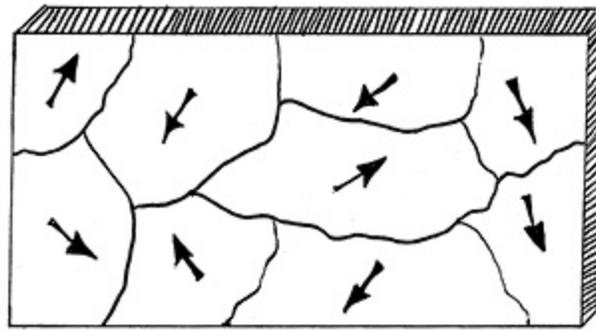
---

Los imanes tienen algunas propiedades características. Atraen algunos metales, pero no todos. Si se enfrentan dos imanes, además de atracción, podemos ver fuerzas de repulsión. Todos los imanes (más allá de su forma física) tienen dos extremos o polos; esos polos son ligeramente diferentes y se los denomina “norte” y “sur”. Si se enfrentan dos polos diferentes (N-S), hay atracción; si se enfrentan dos polos iguales (S-S o N-N), hay repulsión. Los imanes tienen otras propiedades. Por ejemplo, pueden imantar ciertos materiales. Si se pone un imán en contacto con un clavo de acero, el clavo se convierte a su vez en un imán, aunque más débil. Este efecto puede durar varios días o más. ¿Qué sucede adentro de un imán para que aparezcan todos estos efectos? Lo que queremos es buscar alguna explicación que

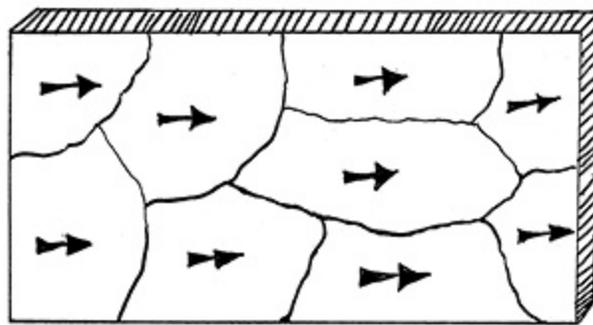
no solo nos ayude a entender qué pasa, sino que nos sugiera nuevos rumbos o aclare cosas que no habíamos anticipado. Obtenemos una gran pista de lo que puede estar sucediendo adentro de un imán si lo cortamos por la mitad para intentar tener el polo sur en una mano y el norte en la otra. Podríamos hacerlo con una sierra. El resultado, sin embargo, no son dos polos individuales, sino dos imanes que, aunque más chicos, son por lo demás idénticos al anterior. Este proceso puede repetirse numerosas veces con igual resultado: imanes cada vez más pequeños (y por consiguiente, más débiles) pero completos y con dos polos. Y lo mismo sucede a la inversa. Si juntamos varios imanes de modo que sus polos apunten siempre en la misma dirección (hacerlo al revés sería casi imposible por la repulsión), lo que obtenemos es algo que parece un imán mucho más grande y fuerte y con los polos en las puntas.

O sea que podríamos empezar por proponer que los imanes están hechos de imanes diminutos (algo así como los “átomos” de los imanes), todos ordenados de cabeza a cola, unos detrás de otros. Esta idea resulta útil para entender por qué hay materiales que pueden estar magnetizados o no, como los clavos de acero. Podemos imaginarnos que esos imanes diminutos, dentro de un pedazo de metal, pueden estar orientados completamente al azar o pueden apuntar todos en la misma dirección. Cuando apunten en la misma dirección, sus efectos individuales se sumarán para producir un clavo imantado, al igual que en un imán común y corriente. Pero si los miniimanes están orientados al azar, apuntando en las más diversas direcciones, sus efectos tenderán a cancelarse y el efecto neto será cero. En este caso tendremos un clavo no imantado (aunque en su interior haya numerosísimos imanes diminutos). De acuerdo con esta visión del interior de los clavos, el proceso de imantación es aquel en el cual se alinean todos los miniimanes para apuntar en la misma dirección. La idea es bonita. ¿Cómo podemos ponerla a prueba?

**Figura 5.** Modelo de dominios magnéticos



NO MAGNETIZADO



MAGNETIZADO

Si de verdad los clavos se imantan de esta manera, podemos vaticinar que un metal debería tener un límite máximo de magnetización. ¿Por qué? Porque el grado de magnetización depende de cuántos miniimanes apunten en la misma dirección. Una vez que *todos* ellos están apuntando para el mismo lado, ya no podemos magnetizar más el clavo. Lo interesante es que, si lo probamos, resulta que es cierto: todos los materiales tienen un límite de magnetización máximo.

Por otro lado, se sabe que los imanes pierden su magnetismo de manera irreversible si se los calienta más allá de cierta temperatura (denominada “temperatura de Curie”). Podemos comprender qué pasa usando nuestra idea de los miniimanes. Cuando algo se calienta, aumenta la vibración interna de sus partes (átomos, moléculas, lo que sea); esta vibración seguramente mueve también los miniimanes de forma caótica,

los desordena y hace que apunten al azar en vez de hacerlo en una dirección determinada. Esto también es consistente con otra observación curiosa: los imanes tienden a desmagnetizarse si se los golpea repetidamente. Otras observaciones son consistentes con esta idea, por ejemplo, que los imanes tienden a desmagnetizarse menos si se los guarda unidos unos con otros. Varias cosas encajan si nos imaginamos el interior de los imanes de esta manera. ¿Será cierto?

---

---

## Comentario y ejercicios

Esta viñeta fue armada para poner de relieve las características de los cuerpos teóricos que estudiamos hasta ahora. Las consignas que siguen son para trabajarlas en el aula. El énfasis de las preguntas está puesto en distinguir las observaciones que dieron origen al cuerpo teórico de aquellas que fueron realizadas después o que se realizaron por predicciones de la teoría. De todas maneras, la viñeta puede usarse para repasar las diferencias entre observables y entidades teóricas trabajadas antes, y el docente puede armar sus propios ejercicios sobre este tema.

## Propuestas para el aula

---

---

1. ¿Cuáles son las observaciones básicas que inspiran la teoría?
2. ¿Cuáles son ideas teóricas inventadas para acomodar las observaciones? Recuerden que las nociones teóricas hacen referencia a objetos o fenómenos que no son observables.
3. ¿Qué predicciones surgidas de la teoría de dominios magnéticos pueden ser puestas a prueba?
4. ¿Qué observaciones que no fueron tenidas en cuenta al armar la teoría son acomodadas adecuadamente por esta?
5. ¿Cómo se podría hacer para establecer una escala de “fuerza” de un imán? ¿Qué tipo de procedimiento puede usarse para

- comparar la potencia de diferentes imanes?
6. Los imanes funcionan aunque interpongamos un papel, una madera o incluso las manos. ¿Hay algún material que sirva de escudo para el poder magnético, aunque sea de manera parcial? ¿Cómo harían para medir la capacidad del escudo?
  7. ¿La fuerza con que se imanta un clavo depende del tiempo en que estuvo en contacto con el imán? ¿Y de la potencia de ese imán? Piensen experimentos para contestar estas preguntas. ¡Hagan los experimentos!
  8. Cuando un imán imanta un clavo, ¿pierde algo de su imantación? De nuevo, piensen experimentos para contestar esta pregunta ustedes mismos.
  9. Los imanes actúan a distancia, es decir, sin contacto directo con las cosas con las que interactúan. ¿Qué otro tipo de fuerzas actúan sin contacto físico entre los objetos?
  10. ¿Por qué los polos de los imanes se llaman norte y sur? ¿De dónde vienen esos nombres?
  11. Armen un mapa conceptual que tenga la idea “teoría científica” como elemento central. Piensen qué otros elementos pueden agregar; sería interesante que las ideas predicción, observación y entidad teórica estén presentes. ¿Qué más habría que poner? Complétenlo.
  12. Dos chicos discuten sobre qué significa “acomodar” los datos en una teoría. Uno plantea que “acomodar significa que la teoría conecta esos datos con otros de manera coherente”. Otro sostiene que “acomodar significa que la teoría cambia esos datos para que encajen bien en el cuerpo teórico”. ¿Cuál de los dos tiene razón y por qué?
- 
- 

Varias de las consignas buscan estimular a los alumnos para que diseñen y lleven adelante sus propios experimentos sencillos. En la pregunta 5 se invita a los estudiantes a construir un instrumento para medir la intensidad de un imán. Hay muchas maneras de imaginar un dispositivo de esta naturaleza. Uno posible consiste en poner un imán cerca de una brújula y medir la deflexión de la aguja; es importante que los imanes por comparar

estén a la misma distancia de la brújula. En la consigna 6 se los invita a buscar un escudo para los efectos magnéticos. Pueden usar el dispositivo desarrollado en la pregunta 5 para medir si los efectos magnéticos disminuyen cuando se interpone un material entre el imán y la brújula, cuidando que la distancia entre ambos permanezca inalterada. El mismo dispositivo puede usarse para medir la intensidad de imantación de un clavo y de esa manera observar si se imanta más cuanto más tiempo está en contacto con un imán o si el imán pierde poder para imantar otras cosas.

## Bibliografía

Rogers, E. M. (1960), *Physics for the Inquiring Mind. The Methods, Nature, and Philosophy of Physical Science*, Princeton, Princeton University Press.

## 6. El sistema solar de Ptolomeo

La observación cuidadosa del cielo nocturno nos ofrece una enorme variedad de datos que pueden obtenerse sin la necesidad de telescopios u otras herramientas de medición astronómica. Los antiguos griegos elaboraron modelos de gran sofisticación a partir de las observaciones que realizaron sin la ayuda de ningún aparato, tal como vimos con la primera viñeta. El modelo básico de la escuela pitagórica sufrió grandes transformaciones y *produjo varios retoños y versiones* hasta que Claudio Ptolomeo de Alejandría concibió un modelo de gran poder predictivo. El modelo de Ptolomeo fue adoptado mucho más tarde, junto con la física y la filosofía de Aristóteles, por la Iglesia católica. Y así ungido sobrevivió por muchísimo tiempo, hasta ser cuestionado por Nicolás Copérnico en el Renacimiento. Pero no fue solo por la bendición de la Iglesia que el modelo ptolemaico gozó de tanto éxito. Se trató de una idea poderosa, elegante, precisa y de enorme utilidad.

### La máquina de predecir trayectorias

---

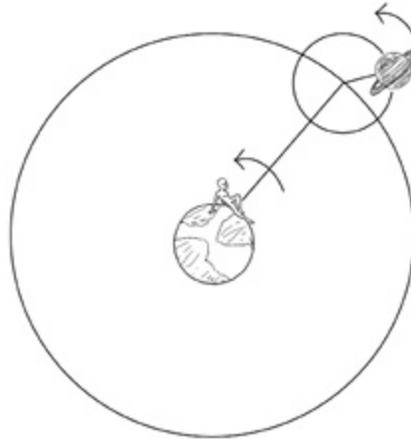
El sistema solar de los pitagóricos era muy bello, pero tenía un problema mayúsculo: los planetas. Los planetas son como esos niños de familias educadas con los que al principio parece que está todo bien, pero a medida que pasan los días van mostrando su costado insoportable.

En la oscuridad de la noche los planetas parecen una estrella más en el cielo y hacen lo que todas las estrellas: salen tranquilamente por el este y se ponen por el oeste, como en cualquier buena familia. Tienen una velocidad algo menor a la de las estrellas fijas y por eso se van corriendo hacia el este cada día un poquito más, moviéndose de constelación en constelación (por eso los

astrólogos dicen cosas como “Júpiter está en Virgo”). Cada planeta completa una recorrida entera del fondo estrellado en diferentes tiempos. Saturno, por ejemplo, tarda 378 días y Júpiter, casi 399. Hasta ahí, todo bien y el sistema de esferas de Pitágoras funciona correctamente. El tema es que los planetas no se mueven siempre a la misma velocidad en el cielo. Hay momentos en que en vez de moverse más lento que las estrellas, se mueven más rápido que ellas. Los pitagóricos describían a los planetas como si estuvieran en esferas que se mueven a la inversa de la esfera de las estrellas, o sea, de oeste a este (y esto les *restara* velocidad). De acuerdo con esta visión, hay momentos raros en el ciclo de los malditos planetas en los cuales en vez de moverse de oeste a este (respecto de las estrellas), se mueven de este a oeste. Esto se llama “movimiento retrógrado”. Los planetas hacen estas gracias cuando están opuestos al Sol (es decir que a medianoche se los ve justo arriba de nuestras cabezas). Repiten sus monerías con una frecuencia propia de cada planeta, que en general es de aproximadamente un año (Marte lo hace cada dos años, más o menos).

Y esto, damas y caballeros, es un real dolor de cabeza para un mecanismo basado en esferas que giran unas dentro de otras. Pero los griegos no se amedrentaron. Eudoxo, un discípulo de Platón, propuso que había varias esferas para cada planeta, con ejes orientados en diferentes direcciones y que giran a diferentes velocidades. Con este truco, podía describir (acomodar) el movimiento complicado de los planetas. Y el mecanismo propuesto podía predecir bastante bien dónde estaría cada uno de los planetas en distintos momentos (futuros y pasados). El problema es que ahora el sistema solar, en vez de tener 8 esferas, ¡tenía 27! Pero había más: el mecanismo tampoco predecía todo con absoluta precisión, más bien tenía discrepancias preocupantes. Las discrepancias podían solucionarse aumentando el número de esferas. ¡Pero esto no es lo que uno quiere! Lo ideal es que el sistema sea sencillo y preciso. Y en el caso de las esferas de Eudoxo, es o lo uno o lo otro. Hacia el 300 a.C. así estaban las cosas: un poco frustrantes, digamos.

**Figura 6.** Un planeta en el sistema ptolemaico



El planeta describe un círculo alrededor de un punto que a su vez gira en torno a la Tierra

El guante lo recogió un astrónomo que vivió en Alejandría allá por el 100 d.C., o sea que era egipcio pero con tradición griega. Se llamaba Ptolomeo. La audacia de Ptolomeo radicó en deshacerse de las esferas transparentes. En vez de esto, se imaginó que los planetas no giran en torno a la Tierra, sino alrededor de un punto en el espacio que a su vez gira en torno a la Tierra. En ese punto no hay nada, solamente una referencia de giro.

Además, propuso que el centro del sistema solar en realidad no estaba en la Tierra, sino un poco más afuera y otras complicaciones que a simple vista parecen caprichosas. El resultado, que asentó en un libro llamado *Almagesto*, es una complicadísima maraña de giros, cada uno perfectamente circular, pero que describen con escalofriante precisión el movimiento que vemos en todo el cielo para todos los astros: Sol, Luna, planetas, estrellas. Ptolomeo favoreció la exactitud de cálculo sobre la simpleza del mecanismo. Propuso alrededor de 80 giros diferentes para poder acomodar todo, aunque otros pensadores lograron reducirlos más tarde a unos 40 usando la lógica básica y los trucos propuestos por Ptolomeo. Fue un buen negocio. El sistema de Ptolomeo se volvió muy popular y fue la descripción más acabada del universo conocido por casi 1500

años. Fue (y es todavía) de gran utilidad para la navegación, porque describe cómo se ve el cielo desde cualquier lugar, a cualquier hora y en cualquier día pasado o futuro. Se trata, en efecto, de una gran obra abrazada por la Iglesia católica, la gran obra contra la que deberían enfrentarse mucho más tarde Copérnico, Galileo y los pensadores del Renacimiento.

---

## Comentario y ejercicios

En este ejemplo vemos algo que ocurre muy a menudo con los cuerpos teóricos cuando tienen que empezar a acomodar más y más observaciones. El modelo de los pitagóricos era adecuado siempre y cuando uno hiciera la vista gorda respecto de los detalles del movimiento de los planetas. Y no nos engañemos: esto no está nada mal; a veces es preferible barrer algunos datos debajo de la alfombra para poder hacer genuinos avances en las visiones macro que tenemos de la realidad. Simplificar la realidad tiene enormes ventajas, porque nos permite comprenderla más a fondo y manipularla en nuestras mentes con mayor facilidad.

Cuando los griegos decidieron tratar de tener en cuenta el movimiento completo de los planetas, se encontraron con un conflicto interno. Buscaban, por un lado, que el mecanismo que generaran fuese simple y elegante, y por otro, que se ajustara lo mejor posible a la realidad. Pero las dos cosas parecían en cierta manera incompatibles. Eudoxo aumentó el número de esferas para darle precisión al modelo, pero, al hacerlo, se volvió más complicado. Esto suele ocurrir con las construcciones teóricas: para acomodar nuevos datos se hacen modificaciones y adendas que vuelven a los modelos más complicados y menos accesibles. Una salida es encontrar un *nuevo modelo* completamente diferente que sea *a la vez* simple y preciso. Pero esto no siempre es posible.

También vemos en este ejemplo que “acomodar los datos de la realidad” puede ser una tarea matemáticamente compleja. El modelo de los pitagóricos nos daba una descripción del cosmos que coincidía con los movimientos de los astros en el firmamento de manera cualitativa, pero cuando uno quería pronosticar adónde iba a estar tal planeta dentro de cinco

años y tres meses, el modelo no tenía mucho que decir. Los modelos de Eudoxo y Ptolomeo son de una precisión *matemática* mucho mayor que permite predecir el aspecto del firmamento en otros momentos. Muchos modelos teóricos tienen una enorme riqueza matemática y hacen descripciones y predicciones de alta precisión. Es más, algunas construcciones teóricas no invocan mecanismos o visualizaciones y son únicamente matemáticas. Otras son esquemas útiles y poderosos, pero no están consignadas en un lenguaje matemático y cuantitativo.

Como con las otras viñetas, encontrarán a continuación una serie de consignas que pueden ser usadas en el aula de ciencias.

### Propuestas para el aula

---

---

1. ¿Cuáles son las observaciones adicionales que impulsan a Ptolomeo a modificar el modelo ideado por los pitagóricos?
  2. ¿Qué nociones teóricas (es decir, fenómenos o entidades no directamente observables) introduce Ptolomeo?
  3. ¿Qué nociones teóricas de los pitagóricos fueron descartadas por Ptolomeo?
  4. En la web hay animaciones que muestran el movimiento retrógrado de los planetas. Hagan un dibujo de ese movimiento para el planeta que prefieran.
  5. Ptolomeo fue parte del movimiento helenista con centro en Alejandría. ¿Qué es el período helenista? ¿Dónde queda Alejandría?
  6. Comparen la visión del sistema solar de los pitagóricos con la de Ptolomeo. ¿Cuáles son las diferencias? ¿Qué observaciones son iguales y cuáles diferentes? ¿Qué nociones teóricas son iguales y cuáles diferentes? ¿Cuál de los dos sistemas les parece más “real”?
- 
- 

### Bibliografía

Levinas, M. L. (2012), *Las imágenes del universo. Una historia de las ideas del cosmos*, Buenos Aires, Siglo XXI.

Rogers, E. M. (1960), *Physics for the Inquiring Mind. The Methods, Nature, and Philosophy of Physical Science*, Princeton, Princeton University Press.

Rosenvasser Feher, E. (2008), *Cielito lindo. Astronomía a simple vista*, Buenos Aires, Siglo XXI.

## 7. El ancestro común

En 1859, después de mucho tiempo de pensar y dudar y consultar, Charles Darwin publicó *El origen de las especies*, cargado de datos y rebosante de ideas. En esta obra es posible distinguir dos conceptualizaciones que, en realidad, son semiindependientes (como notó claramente el gran biólogo Ernst Mayr). La primera es que todos descendemos de un mismo y único ancestro y que la diversidad de la vida es como una especie de gigantesco árbol genealógico. La segunda es que los cambios (más que nada, los cambios adaptativos) se producen por la reproducción diferencial de los individuos, es decir, por selección natural. La validez de la primera idea no depende de la validez de la segunda y, de hecho, la idea del ancestro común fue aceptada muy tempranamente. La idea, en cambio, de que la evolución procede por un mecanismo de selección de variaciones al azar, sin la intervención de un plan o una dirección, causó disgusto e inquietud aun en los pensadores más sofisticados de su tiempo. Hoy en día las dos están aceptadas más allá de toda duda razonable. Analizaremos aquí, a partir de esta viñeta, la construcción de la hermana más fácil y aceptada de la familia teórica de la evolución, que es además la que mejor encaja con el esquema presentado en las otras viñetas. Los argumentos que sostienen la teoría del ancestro común son expuestos con gran claridad por Darwin en los últimos capítulos de su libro seminal.

### El árbol de la vida

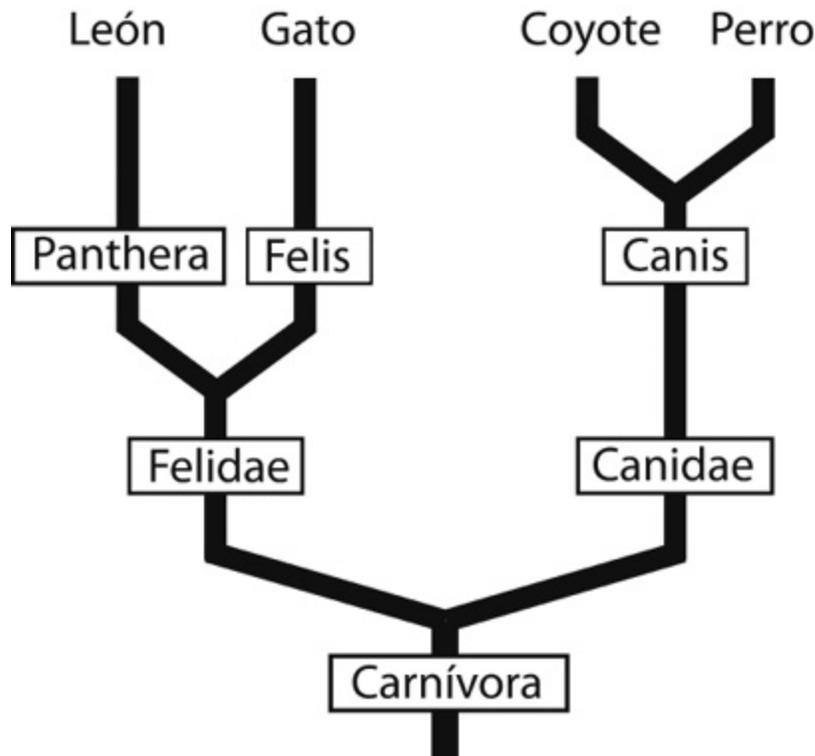
---

Las especies de organismos sobre la Tierra (animales, plantas, hongos, microbios de todas las clases y colores) deben venir de algún lado. Es más, el registro fósil muestra que no todas las especies han vivido siempre sobre la Tierra: algunas están extintas, como los dinosaurios, y otras aparecieron

recientemente. ¿Cómo aparecen las formas de vida? En su libro *El origen de las especies*, Darwin contrasta continuamente dos hipótesis alternativas. Una, que él llama “creación especial” o “creación independiente” sostiene que cada una de las especies de nuestro planeta en toda su larga historia apareció como un acto creativo singular, no relacionado con los otras apariciones (si esos eventos individuales fueron acción de Dios o no, Darwin no lo discute). La otra es que unas especies deriven de otras por modificaciones graduales. O sea: las especies evolucionaron unas de otras o aparecieron de manera independiente, no por evolución. Las dos son en principio posibles, pero solo una es verdad. Darwin plantea que existe una serie de observaciones indiscutibles que no tienen sentido alguno a menos que aceptemos que todas las especies derivan de otras preexistentes. Veamos cuáles son esas observaciones clave.

Todos los organismos, pero especialmente los animales, pueden ser clasificados de una manera muy particular, desarrollada por varios pensadores, en particular el francés Georges Cuvier. Por ejemplo, decimos que los gatos son felinos, un grupo que incluye a otras especies muy parecidas, como leones, leopardos y tigres. Del mismo modo, los perros tienen mucho parecido físico con lobos, chacales y zorros. Estos dos grupos, los felinos y los cánidos, se parecen más entre sí que a los roedores. Los roedores, los murciélagos, los ciervos son todos mamíferos, y a su vez, junto con aves, reptiles y otros, son todos vertebrados. Si lo miramos desde otra perspectiva, podemos ver que todos los organismos pueden ser agrupados en grandes conjuntos, como animales, plantas, hongos y bacterias, y que estos grupos a su vez pueden ser divididos en otros de orden ligeramente inferior (como artrópodos, equinodermos, moluscos, etc., en el caso de los animales); que esos grupos también pueden ser subdivididos de nuevo, y así sucesivamente. Esta clasificación de grupos dentro de grupos cada vez más parecidos puede ordenarse como si fuera un árbol: las especies más parecidas conectadas como ramitas y las más distantes conectándose más abajo, unas con otras, a la altura del tronco.

Figura 7. Árbol filogenético

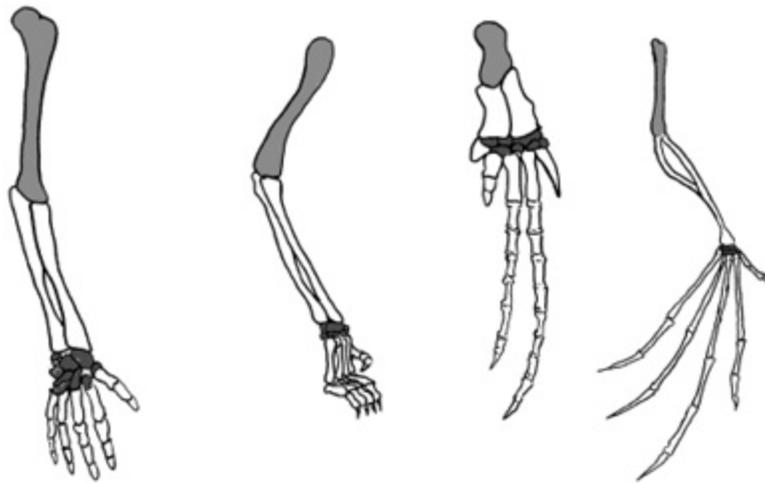


Otros esquemas de clasificación no son tan exitosos. Por ejemplo, hubo un intento de construir una clasificación lineal en la cual cada organismo ocupase un lugar en una larga “fila” de especies, pero no hay criterio que las acomode de este modo. ¿Cómo se explica esto? ¿Por qué los organismos se pueden clasificar de esta manera y no de otra? Para Darwin es sencillo. Los seres muy parecidos están muy relacionados porque acaban de evolucionar, hace relativamente poco, de un ancestro común. A su vez, tienen ancestros comunes más lejanos entre las especies menos parecidas. Al final, debe haber un ancestro común de todos los animales. Este ordenamiento en forma de árbol tiene sentido si las especies evolucionan las unas de las otras, pero es un absoluto misterio si las especies han aparecido de la nada, cada una sin relación con las demás. Por otro lado, Darwin observó en sus viajes que en muchas regiones habitan tipos particulares de animales y plantas. Por ejemplo, en Sudamérica existen especies de edentados, un grupo

que incluye osos hormigueros, perezosos y armadillos. No hay edentados en otros lugares del mundo aunque tengan las mismas condiciones climáticas y ambientales de Sudamérica, donde esos edentados viven felices y contentos. Lo mismo pasa con los marsupiales en Australia. Es más, Sudamérica tiene abundantes fósiles de edentados y Australia, un rico registro de marsupiales extintos. ¿Por qué? “Ahá”, dice Darwin: si pensamos que las especies devienen unas de otras, la respuesta es fácil. Los primeros edentados aparecieron en Sudamérica hace mucho tiempo y los demás evolucionaron a partir de este ancestro común en ese mismo suelo. Algunos se extinguieron (y por eso sus fósiles). Si, en cambio, asumimos que cada especie apareció por su cuenta, ¿por qué demonios los edentados aparecieron todos en el mismo lugar cuando hay otros que podrían albergarlos tan bien o mejor que Sudamérica?

Otro conjunto de observaciones intrigantes tenía que ver con la anatomía comparada de diferentes seres vivos, especialmente de animales. Tomemos como ejemplo las extremidades de los vertebrados. Las alas de diferentes aves se parecen mucho en su arquitectura. Esto no es llamativo porque las alas en general sirven para volar; es lógico que compartan detalles de diseño. Pero si tomamos las extremidades de los mamíferos, vemos que algunas sirven para nadar, otras para correr, saltar, trepar, cavar e incluso para volar (como ocurre con los murciélagos). Funciones muy distintas. Pero todas estas extremidades tienen, a partir del hombro o de la pelvis, un hueso único (húmero o fémur), luego el doblote (cúbito-radio o tibia-peroné), y por último, un conjunto de huesos que forman la mano o el pie seguidos de los huesos que constituyen los dedos. ¿Por qué es así aun cuando cumplen diferentes funciones?

### **Figura 8.** Miembros superiores de mamíferos



Aunque cumplen funciones diferentes, las extremidades de humanos, felinos, ballenas y murciélagos tienen un plan anatómico básico similar

Si pensamos que las especies derivan las unas de las otras, la respuesta es sencilla: el ancestro común de todos los mamíferos tenía un miembro anterior con estos huesos y los huesos que vemos ahora son modificaciones menores sobre este patrón. Si sostenemos que cada especie apareció por separado, esto parece un plan llamativo pero inexplicable. ¿Por qué hay un plan anatómico tan invariante en cada grupo de animales? Eeeh... les debo la respuesta.

Estos son los tres argumentos centrales que Darwin exhibe en la parte final de su libro. Tres conjuntos de observaciones que cobran sentido a la luz de la idea del ancestro común. Pero la historia no termina allí. Ya en la época del naturalista inglés muchos se habían dado cuenta de que, si la idea de ancestro común (o de descendencia con modificación, como decía Darwin) era cierta, necesariamente tendrían que existir fósiles de formas intermedias entre un grupo y otro, formas que en el presente no existen. No hay especies vivas intermedias entre reptiles y aves, pero dado que los dos son vertebrados y tienen un ancestro común, debería haber formas intermedias en el registro fósil. En 1861 se encontró en Langenthalheim, Alemania, un fósil extraordinario, denominado Archaeopteryx que tiene estructuras anatómicas de reptil (como los dientes y la cola) y de ave (como

las plumas). En el siglo XX se determinó que las aves se parecen mucho a los dinosaurios y se han encontrado variados fósiles de dinosaurios con plumas.

Las ideas de Darwin además nos dan pistas sobre dónde encontrar los fósiles clave. En los estratos de 385 millones de años de antigüedad o más, no hay fósiles de animales terrestres: solo peces e invertebrados marinos. Pero desde 365 millones de años atrás en adelante, en el Devónico tardío, empiezan a aparecer vertebrados con patas en tierra firme (además de muchos otros bichos terrestres). O sea que si hubo un ancestro común entre peces y tetrápodos (animales con cuatro patas), debería haber existido por esa época y sus fósiles deben estar en esos estratos. En 2004 un grupo de investigadores buscó restos en el Ártico, justamente en esos estratos, y encontraron el fósil de un animal con escamas y aletas, como un pez, pero con cuello y huesos en los miembros más parecidos a patas. *Tiktaalik roseae* – como bautizaron al animal– es una forma intermedia.

La idea del ancestro común y la divergencia por evolución paulatina también explica muy bien una vieja observación. La apariencia de los animales fósiles encontrados se aleja cada vez más de las formas vivientes a medida que uno se adentra en los estratos, es decir, recupera especímenes de tiempos más y más remotos. Además, estos restos parecen más pequeños y menos complejos a medida que uno se aleja en el tiempo. Esto se entiende si las especies actuales se originan en las del pasado, pero van divergiendo de ellas por evolución. Si, en cambio, cada especie apareció en la Tierra por separado, ¿por qué habrían de ser más parecidas a las actuales las especies extintas hace poco que las extintas hace mucho?

La propuesta era muy atractiva, pero no dejaba de tener algunos problemas. Hay grupos de seres vivos muy similares que, sin embargo, aparecen en diferentes continentes. ¿Por qué? Otro problema es que el registro fósil no varía levemente al pasar por todas las formas intermedias posibles, sino que hay saltos enormes en los cuales las especies parecen cambiar repentinamente. ¿Cómo explicar esto? La teoría evolutiva del ancestro común no podía acomodar estas observaciones. Pero no

había ninguna otra que pudiera acomodarlas o que acomodara mejor las observaciones a las que la teoría de la evolución sí daba sentido.

Cuando se descubrió la estructura del ADN y pudo postularse que la evolución debía proceder por cambios en las secuencias de ADN, los biólogos buscaron diferencias en las secuencias de diversas especies. Hoy en día los árboles evolutivos más confiables no se hacen mirando la anatomía de los seres vivos, sino la secuencia de sus genes.

---

---

## Comentario y ejercicios

La teoría del ancestro común tiene todas las características que hemos estudiado hasta el momento. Fue ideada por Darwin para acomodar varias observaciones que de otro modo parecen inexplicables. Pero además tuvo una serie de predicciones muy fructíferas. De hecho, hoy en día se usan los árboles evolutivos (también llamados “árboles filogenéticos”) para hacer toda suerte de predicciones útiles. Por ejemplo, una especie de planta produce una sustancia potencialmente útil para tratar una enfermedad, pero la planta es muy rara y crece en condiciones complicadas. Lo lógico es buscar la sustancia en otra planta que esté muy emparentada, con la esperanza de que la producción de la sustancia sea una característica compartida con el ancestro de ambas especies. Además de esto, la teoría logra acomodar todos los nuevos árboles que se generan y sigue siendo igual de útil al incorporar nuevas formas de armar esos árboles, como el uso del ADN o secuencias de proteínas.

Pero la viñeta nos muestra algo más. Hay observaciones que la teoría *no puede acomodar*, como el caso de formas muy parecidas en lugares muy distantes. ¿Cómo podemos explicar que haya avestruces en África y ñandúes en Sudamérica? Más allá de que este problema concreto ya haya sido resuelto (África y Sudamérica estaban juntas en el pasado), por un tiempo fue una piedra en el zapato de la teoría del ancestro común. Pero he aquí otra característica de las teorías que debemos tener en cuenta: *las teorías no son nunca absolutamente perfectas*, en el sentido de acomodar

todas y cada una de las observaciones. Si no tenemos una explicación o teoría alternativa que sea mejor, siempre preferimos quedarnos con una teoría, aunque deje agujeros y no pueda explicarlo todo. Los científicos confían en que, con el tiempo, se encontrarán modificaciones a la teoría, o se corregirán las observaciones y podremos acomodar las cosas. Esto es muy importante. Al día de hoy se le hacen críticas a la teoría de la evolución porque deja cosas sin explicar, pero esto ocurre básicamente con cualquier cuerpo teórico. La pregunta no debería ser si lo explica todo o no, sino si hay o no una teoría alternativa que explique más o mejor.

A continuación, una serie de consignas para trabajar con los alumnos. Estas consignas retoman las características básicas de los cuerpos teóricos en ciencia: diferencia entre observables y nociones teóricas, acomodación y predicción.

### Propuestas para el aula

---

---

1. ¿Cuáles son las observaciones básicas que inspiran la teoría?
2. ¿Cuáles son ideas teóricas inventadas para acomodar las observaciones? Recuerden que las nociones teóricas hacen referencia a objetos o fenómenos que no son observables.
3. ¿Qué predicciones surgen de la teoría del ancestro común por las cuales puede ser puesta a prueba?
4. ¿Qué observaciones que no fueron tenidas en cuenta al armar la teoría son acomodadas adecuadamente por esta?
5. Según el texto de la viñeta, cuando se propuso la teoría del ancestro común, no podía explicar algunas observaciones, como la presencia de animales parecidos en continentes distantes. ¿Qué característica del registro fósil le costaba explicar a esta teoría? Indaguen en textos o en la web cómo lidia en la actualidad la teoría de la evolución con el registro fósil.
6. Busquen imágenes de *Archaeopteryx* y de *Tiktaalik roseae*. ¿Advierten características intermedias? Lean sobre ellas porque no son fáciles de detectar.

7. Indaguen acerca de edentados actuales y fósiles. ¿Qué características tienen?
  8. Armen un árbol evolutivo que contenga a los humanos. ¿Cuál es la especie viva más cercana a nosotros?
  9. Construyan un mapa conceptual que incluya los términos “teoría”, “explicación”, “acomodar”, “predicción”, “observaciones”, “nociones teóricas”, “imaginación”.
  10. ¿Qué similitudes tiene la teoría del ancestro común con otras teorías que hayan estudiado (sistema solar, teoría atómica, etc.)?
- 
- 

## Bibliografía

Carroll, S. B. (2009), *Remarkable Creatures. Epic Adventures in the Search for the Origin of Species*, Boston, Houghton Mifflin Harcourt.

Darwin, C. (1859), *El origen de las especies* (múltiples ediciones).

Mayr, E. (1985), *The Growth of Biological Thought*, Cambridge, Belknap Press.

Un excelente video subtulado que cuenta esta historia puede verse en [www.hhmi.org/biointeractive/origin-species-making-theory](http://www.hhmi.org/biointeractive/origin-species-making-theory).

## 8. La doble hélice

La dilucidación de la estructura en doble hélice del ADN es en gran medida una historia épica que ocurrió en muy poco tiempo. Fue prontamente descrita con lujo de detalles en una narración autobiográfica de James Watson titulada *La doble hélice*. Una característica curiosa de este trabajo es que ni Watson ni Francis Crick, los descubridores, estaban produciendo datos propios que pudieran ayudar a resolver el misterio, sino que se valieron de todo lo que se sabía en la época para imaginar la estructura propuesta. Esta no era la estrategia tradicional y en alguna medida era una forma de proceder que podía herir susceptibilidades. Cuando un científico está obteniendo datos sobre algún tema, tiende a pensar que el tema le pertenece, pero esto es solo una ilusión, porque todos tienen el derecho de pensar y analizar tanto los datos propios como los ajenos, en la medida en que los conozcan. Todos creían que los datos clave para resolver la estructura provendrían de la cristalografía de rayos X y del trabajo de Rosalind Franklin. Watson y Crick tuvieron en cuenta los datos de Franklin y muchos otros también, pero los de ella eran particularmente importantes. Esta anécdota es presentada a veces como un caso de discriminación contra la mujer, porque supuestamente Watson “le robó” los datos a Franklin, pero en realidad es una versión exagerada y distorsionada de los sucesos. Franklin estaba usando una estrategia de investigación muy diferente a la de Watson y Crick y ella misma admitió siempre que estaba lejos de resolver el misterio. Las claves para resolver la estructura del ADN estaban tanto en las imágenes de Franklin como en las proporciones de bases nitrogenadas descubiertas por Chargaff y la idea de apareamiento de bases concebida por Watson. Sin duda, la historia estuvo cargada de pasiones, que no exploraremos en la viñeta (centrada en las características de los cuerpos de teoría), pero que pueden encontrar en las obras mencionadas en la bibliografía.

## Sueños helicoidales

---

La invención del microscopio permitió descubrir que todos los seres vivos estamos hechos de células y planteó el desafío de entender los fenómenos de la vida en el interior celular. Pronto fue claro que, para lograrlo, había que comprender los mecanismos del funcionamiento de dos tipos de sustancias: las proteínas, que son básicamente diminutas máquinas moleculares que llevan adelante las tareas celulares, y el ADN, la sustancia de la que están hechos los genes y en la que está escrita la información hereditaria. Y para desentrañar los misterios de su funcionamiento, los científicos sabían que tenían que lograr una descripción detallada de su estructura en tres dimensiones (3D); de ser posible, conocer la posición relativa de cada átomo en la arquitectura molecular.

En un laboratorio del King's College de Londres, Maurice Wilkins y Rosalind Franklin estaban tratando de hacer exactamente eso mediante una novedosa técnica tomada de la física y de la geología. Franklin iluminaba un cristal de ADN sólido con un haz de rayos X; al pasar a través del cristal, estos se desvían y producen patrones de imágenes y sombras sobre una placa fotográfica. Analizado con cuidado estos patrones con sofisticadas herramientas matemáticas, es posible, con mucho trabajo, inferir la posición de los átomos que puede generar esa imagen en particular. La técnica se llama "cristalografía de rayos X" y las imágenes se denominan "patrones de difracción". Las imágenes producidas por ADN y por proteínas son muy complejas y a veces algo borrosas, lo que dificulta particularmente su interpretación.

En los laboratorios de la Universidad de Cambridge, a unos pocos kilómetros de Londres, el biólogo estadounidense James Watson y el físico inglés Francis Crick decidieron atacar el mismo problema pero con una estrategia muy diferente. En vez de tratar de dilucidar la posición de cada átomo de manera experimental, optaron por imaginarse posibles conformaciones espaciales que fueran compatibles con todos los datos

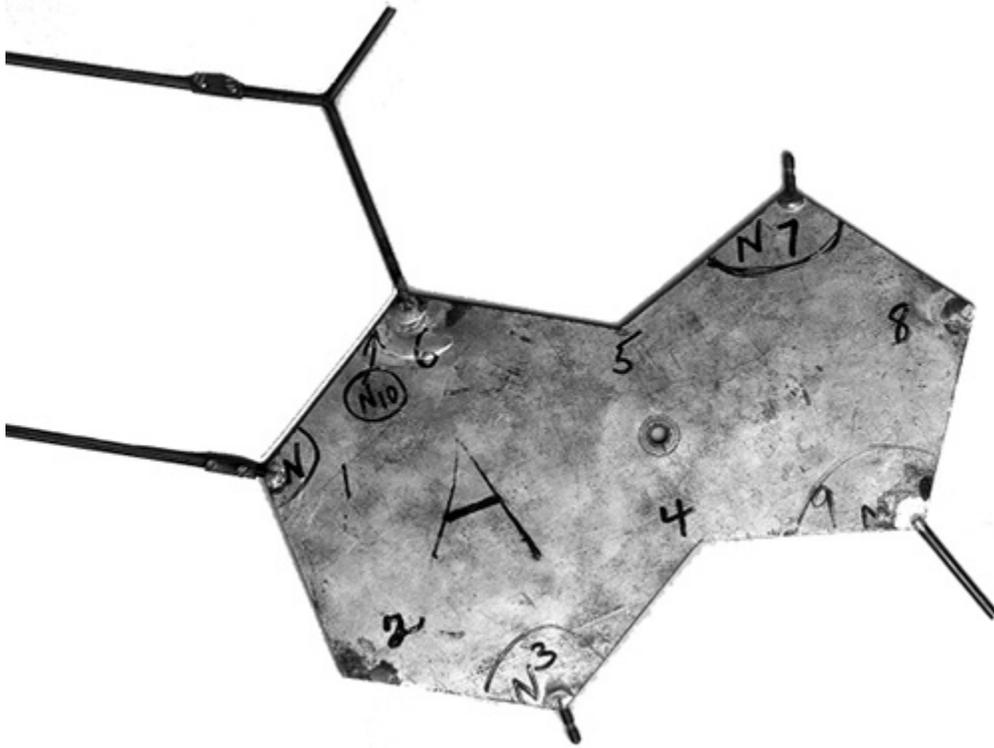
disponibles hasta el momento. De cierto modo, era algo parecido a armar modelos con palitos y bolitas, y tratar de obtener algo que “tuviera sentido”. La estrategia no era un simple juego de niños: había sido ideada y probada con éxito por el más grande químico de la época, el americano Linus Pauling (ganador de dos premios Nobel), quien había propuesto conformaciones existentes en proteínas jugando en un principio con modelos de papel y luego con modelos 3D hechos en metal (que respetaban escrupulosamente las distancias y los ángulos conocidos entre los distintos tipos de átomos). Su éxito más resonante había sido la alfa-hélice, una estructura de aminoácidos en forma de sacacorchos.

¿Qué se sabía hasta el momento acerca del ADN? En primer lugar, que era un largo “polímero” de cuatro unidades más pequeñas llamadas “nucleótidos”, cuyas estructuras moleculares se conocían bastante bien (y que habían recibido nombres populares que comenzaban con las letras A, T, C y G). Se sabía que al descomponer ADN, se obtenía la misma cantidad de A que de T y la misma cantidad de C que de G. Pero las cantidades de A-T son diferentes de las de C-G según la especie de la cual provenga el ADN. Y también existían las imágenes de difracción de rayos X producidas por Rosalind Franklin y que Wilkins le mostró a Jim Watson, imágenes que más tarde fueron presentadas en varias reuniones. Estas imágenes no tenían buena resolución, pero para el ojo entrenado de Crick eran compatibles con una estructura helicoidal. Esto quería decir que los datos no demostraban fuera de toda duda que el ADN tuviera forma de hélice, pero sí que una hélice estaba dentro del rango de lo posible. Para Crick, allí estaban las señales de una hélice. Para Franklin, esto era demasiado prematuro y quería que más y mejores datos hablaran por sí solos.

Crick y Watson no podían esperar nuevos datos (¡sobre todo porque no los estaban produciendo!). Creían que una hélice era la manera más sencilla y coqueta de plegar una molécula larga (más bien larguísima) como el ADN y estaban haciendo un gran esfuerzo por acomodar todos los datos a la idea de una hélice. Realizaron un primer intento fallido que les valió las carcajadas

del grupo de Wilkins y luego, en el término de unos pocos días, tuvieron dos ocurrencias que resultarían trascendentales.

**Figura 9.** Modelo de adenina: una de las cuatro “letras” del ADN



Crick observó en las imágenes de difracción un tipo de simetría que, a su juicio, podría indicar que se trataba de una hélice *doble* (y una, además, cuyas dos partes corrían en sentidos inversos). Y Watson, jugando con nucleótidos recortados en cartón, observó que una A tenía una forma complementaria con una T y una C, una forma que encajaba perfectamente con una G (pudo hacerlo porque un colega y amigo del laboratorio le contó que las fórmulas publicadas en los libros de texto estaban equivocadas y le explicó cómo eran las correctas, que solo él conocía hasta ese momento). Sobre la base de estas dos ideas clave, Watson y Crick armaron en el laboratorio (con piezas de metal que respetaban las distancias entre los átomos conocidas por los químicos) un modelo tridimensional de una molécula de ADN, la

ahora famosa y glamorosa doble hélice en la que A se enfrenta a T y C se enfrenta a G. Al verla, Wilkins y Franklin reconocieron de inmediato que debía ser correcta. La imaginación y la especulación juguetona habían triunfado sobre la recolección meticulosa de datos detallados.

La doble hélice no solo era compatible con los datos con que Watson y Crick habían trabajado, sino que sugería de inmediato el mecanismo por el cual el ADN podía cumplir su función de almacenamiento de información genética: el apareamiento A-T, C-G implicaba que cada hélice era el molde de la otra y que si se separaban las dos partes de la doble hélice, cada mitad contenía la información, en su secuencia de nucleótidos, para generar la otra. Así, el ADN podía duplicarse preservando la información original para generar más copias y pasarlas a las células hijas. El modelo, además, era compatible con otras propiedades y características químicas del ADN. En la estructura propuesta por Watson y Crick, las dos hélices están unidas una con otra a través de las uniones entre A y T, y entre C y G. Pero... la estructura implica que la unión entre C y G es más fuerte que la unión entre A y T. Por lo tanto, una molécula de ADN con alto contenido de A-T será más fácil de separar en sus cadenas simples, y esto es, en efecto, lo que se observa experimentalmente. Al día de hoy, muchas evidencias sostienen la estructura propuesta por Watson y Crick, además de que contamos con imágenes de difracción mucho más detalladas que las de aquel entonces.

---

---

## Comentario y ejercicios

La propuesta de la doble hélice tiene buena parte de los atributos de las otras grandes ideas que venimos discutiendo. Como ocurre con la Era del Hielo o con la existencia de minúsculas partículas invisibles, vemos en este caso una idea que surge de la imaginación de los científicos y que busca acomodar una serie de observaciones. La doble hélice no se ve, pero es compatible con los patrones de difracción de rayos X a través de cristales de

ADN y cuaja bien con las reglas de Chargaff; y como si eso fuera poco, sugiere un mecanismo para el almacenaje y la transmisión de información genética. La idea de la doble hélice, entonces, acomoda observaciones e incluso sugiere predicciones de observaciones por realizar.

En ese sentido, la doble hélice parece una teoría o una entidad teórica. Pero esta idea es mucho más pequeña y acotada que la de que todo está hecho de átomos, o las ideas que rigen la herencia o cómo está conformada y se mueve la corteza terrestre. Cuando los científicos elaboran una teoría más pequeña y de alcance menor, en general no dicen que es una teoría, sino un modelo teórico. Por eso hablamos del modelo de la doble hélice y no de la teoría de la doble hélice. Otros modelos famosos han sido los de la estructura interna del átomo, como el modelo de Thomson, el de Rutherford o el de Bohr. Algunos de ellos son objetos imaginados, como la doble hélice, la estructura de la mitocondria o el interior de la Tierra, pero otros son aún más abstractos, como ciertos modelos del funcionamiento de la memoria, y otros incluso son enteramente matemáticos, como los modelos de dinámica epidemiológica de ciertas enfermedades o el comportamiento de la atmósfera.

En esta viñeta sobre el modelo de la doble hélice vemos además una variación sutil respecto de cómo posiblemente se elaboraron otras ideas. El objetivo primordial de la idea de átomos era dar cuenta de las regularidades en la combinación química. El objetivo de la deriva continental era dar cuenta de varias observaciones misteriosas relacionadas con la distribución de fósiles y formas de los continentes. El propósito de la idea de la Era del Hielo es explicar las intrigantes características de los valles alpinos. El movimiento de los continentes o las bajas temperaturas de tiempos remotos son invocados con ese objetivo, pero no son un fin en sí mismo. Con la doble hélice sucede lo inverso. El objetivo de Watson y Crick es develar la estructura del ADN, no necesariamente explicar sus propiedades. Pero el mecanismo lógico es idéntico: imaginar una estructura que sea compatible y explique una serie de características u observaciones. En algún sentido, Watson y Crick no buscan generar una teoría, sino hallar un objeto real, pero se valen de las estrategias del pensamiento teórico. Como se dice en la viñeta, esta fue una estrategia ideada por Linus Pauling, un experto en aplicaciones prácticas de la mecánica cuántica, justamente una idea teórica muy abstracta e imaginativa.

Las preguntas sugeridas a continuación para el trabajo en el aula son escuetas y sencillas. El docente puede armar otras inspirándose en los ejercicios de las viñetas anteriores. Por ejemplo, con una lista de observaciones y de nociones teóricas mezcladas para que los alumnos distingan unas de otras.

### Propuestas para el aula

---

---

1. ¿Cuáles eran las observaciones originales con que contaban Watson y Crick?
  2. ¿Cuáles son las ideas teóricas, no observables, que ellos introdujeron?
  3. ¿Qué otras observaciones podía acomodar el modelo de la doble hélice de ADN?
  4. ¿Qué predicciones sugiere el modelo?
  5. Basándose en la viñeta, escriban un breve texto que argumente que en ciencia no siempre se va de los datos a la idea, sino que se puede partir de la idea y buscar los datos para probarla. Argumenten cómo Watson y Crick triunfaron allí donde Franklin y Wilkins no pudieron hacerlo.
  6. ¿Qué similitudes y diferencias hay entre el modelo de la doble hélice y la teoría de la evolución o la teoría atómica? Hagan un cuadro comparativo.
- 
- 

### Bibliografía

La historia de la doble hélice de ADN fue narrada por el propio James Watson en un ameno libro autobiográfico lleno de detalles, tanto científicos como personales, sobre los personajes centrales de este descubrimiento. Algunos de esos detalles son de dudosa veracidad.

Para un análisis más académico de esa parte de la historia, puede consultarse el libro de Horace Freeland Judson.

Crick, F. (1990), *What Mad Pursuit. A Personal View of Scientific Discovery*, Nueva York, Basic Books [ed. cast.: *Qué loco propósito. Una visión personal del descubrimiento científico*, Barcelona, Tusquets, 2008 ].

Judson, H. F. (1996), *The Eighth Day of Creation*, Nueva York, Cold Spring Harbor Laboratory Press [ed. cast.: *El octavo día de la creación*, México, Conacyt, 1987].

Watson, J. D. (2011), *La doble hélice*, Madrid, Alianza.

## 9. El sistema copernicano

Hay mucho escrito y es difícil hacer una síntesis de cómo los pensadores del Renacimiento dejaron de visualizar la Tierra como el centro inmóvil de todo y empezaron a concebirla girando, junto con los demás planetas, alrededor del Sol. Las ideas de Copérnico marcan un antes y un después en la historia general de la humanidad. Hay quien ha dicho que la ciencia nació cuando la humanidad rompió con el yugo del sentido común, y el primer gran desafío al sentido común es justamente proponer que la Tierra en la que estamos parados está en movimiento, aunque no lo percibamos. La Tierra desplazándose le dio a Galileo tanto para pensar que lo catapultó a desarrollar las bases de una ciencia madura del movimiento fundada sobre el principio de inercia. Podríamos argumentar que ese fue el nacimiento de la ciencia tal como la conocemos.

### De repente ya no somos el centro

---

La visión del sistema solar que primaba hacia 1500 era bastante sofisticada, un modelo de relojería ideado por Ptolomeo siglos antes, que podía calcular con precisión la posición relativa de todos los componentes del sistema en cualquier momento. El sistema era complejo, pero básicamente concebía a la Tierra como fija e inmóvil con varios elementos que giraban a su alrededor en diferentes órbitas. Estas órbitas eran muchas y complicadas por varias razones. Una de ellas era que los astrónomos y pensadores de esas épocas sentían la necesidad (de origen filosófico) de que las órbitas fueran perfectamente circulares, pero el movimiento de los astros no siempre era perfectamente circular. Sin embargo, la principal complicación provenía de la necesidad de dar cuenta del movimiento

retrógrado de los planetas (ese cambio en la trayectoria que los planetas realizan más o menos una vez por año). Más allá de esos detalles y complicaciones, todas las órbitas daban la sensación de una rotación alrededor de la Tierra, que daba una vuelta completa cada 24 horas.

A mediados de los años 1500, el prusiano Nicolás Copérnico (cuyo nombre original posiblemente fue Koppernigk; él lo latinizó como Copernicus, una costumbre entre los intelectuales de la época) propuso, luego de largos y complicados cálculos, una nueva manera de mirar el sistema solar, un novedoso modelo de relojería que creía superior y, en algún sentido, más real que el de Ptolomeo. El objetivo principal de Copérnico era arribar a una manera más sencilla de concebir el movimiento retrógrado de los planetas. Para resolverlo, planteó que el aparente giro de todos los astros cada 24 horas se debía, en realidad, a que la Tierra gira sobre su eje cada 24 horas. Son los otros detalles de movimiento los que se deben al verdadero movimiento de cada astro, de acuerdo con el astrónomo prusiano. Copérnico postuló también que además de ese giro sobre el propio eje, la Tierra y todos los planetas dan vueltas alrededor del Sol, y es el hecho de que nuestro planeta y todos los demás se mueven de esta manera lo que provoca lo que desde nuestra posición percibimos como movimiento retrógrado. Para Copérnico, el Sol y las estrellas están quietas, y todo lo demás, incluida la Tierra, está en movimiento.

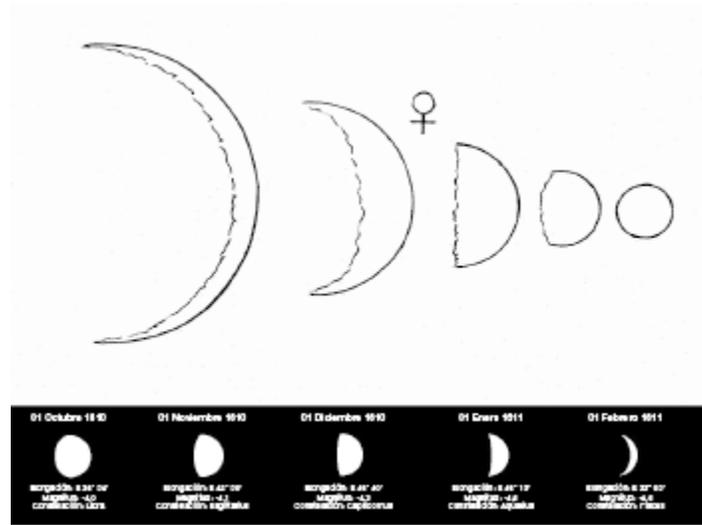
Entonces, en principio tenemos dos modelos teóricos y cada uno parece acomodar la misma serie de observaciones con esquemas imaginarios diferentes. ¿Son equivalentes? ¿Hay alguna manera de determinar si uno se acerca más a la realidad que el otro? ¿O es un modelo mejor por alguna otra razón?

El modelo de Ptolomeo era muy preciso, pero invocaba una enorme cantidad de esferas matemáticamente complicadas. El de Copérnico era igual de preciso que el de Ptolomeo. Con dos modelos similares en cuanto a precisión, nos convendría quedarnos con el más sencillo, como ya vimos. El de Copérnico es apenas más sencillo; en realidad, es casi tan complicado como el del Ptolomeo. Entonces, ¿hay manera de dirimir la cuestión?

Copérnico, Galileo y otros pensaban que sí. Había una observación clave que el modelo de Ptolomeo no lograba acomodar. Los planetas no siempre tienen el mismo brillo o intensidad en el cielo nocturno. Copérnico encontró que podía acomodar con facilidad esta observación: en su modelo, los diferentes planetas están a distancias muy cambiantes los unos de los otros en su permanente danza alrededor del Sol. Por lo tanto, hay momentos en que los planetas están mucho más cerca de la Tierra y momentos en que están muy lejos. Es razonable que, cuando están muy cerca de la Tierra, se vean desde aquí más grandes y luminosos. Esto es inexplicable en el sistema de Ptolomeo, en el cual la distancia de un planeta a la Tierra es básicamente siempre la misma (la de la órbita del planeta alrededor del nuestro). En ese sentido, el modelo de Copérnico era superior, porque explicaba algo que el sistema de Ptolomeo no podía.

Pero eso no era todo. El sistema de Copérnico establecía que el momento de mínima distancia entre un planeta y la Tierra era ese en que las velocidades relativas alrededor del Sol debían darnos la impresión de que el planeta estaba ejecutando su “movimiento retrógrado”. O sea que el modelo de Copérnico predecía que el movimiento retrógrado debía coincidir con el momento de mayor esplendor del planeta en el cielo. Y efectivamente así es. El modelo de Ptolomeo no tiene nada que decir al respecto.

### **Figura 10.** Fases de Venus



Poco después de la muerte de Copérnico, Galileo dedicó enormes esfuerzos a encontrar ventajas en la forma copernicana de ver el sistema solar. Se dio cuenta de que si el sistema de Copérnico era cierto, los planetas debían mostrar “fases” como la Luna, es decir, tener momentos en que la luz del Sol ilumine solo una parte de la superficie que podemos observar y momentos en que el Sol ilumine toda su superficie, como ocurre con la Luna llena. En el modelo de Ptolomeo, Venus, por ejemplo, nunca debería aparecer “lleno”. Es más, el modelo de Copérnico implicaba además que Venus debía estar *lleno* en el momento en que estuviera más alejado de la Tierra y, por lo tanto, mostrarse más pequeño. Y esto es efectivamente lo que Galileo observó a través de su telescopio. Un increíble momento para la ciencia.

El sistema propuesto por Copérnico se volvió, con el tiempo, irrefutable. En parte esto se debió a que, cuando Kepler cambió ligeramente las órbitas de circulares a elípticas, Isaac Newton logró desentrañar las leyes físicas y matemáticas de todos estos movimientos utilizando reglas más o menos sencillas que regían la atracción entre todos los objetos y la manera en que tienden a moverse. Pues bien, el modelo de Copérnico no solo era coherente con las observaciones astronómicas, sino también con la física entera del movimiento de todas las cosas. Cuando tantos

elementos parecen encajar en su lugar, es difícil resistirse a la evidencia.

---

## Comentario y ejercicios

En esta viñeta, a diferencia de las anteriores, no nos ocupamos de un solo cuerpo teórico sino de dos. El evento es de tal magnitud histórica y cultural que resulta difícil concentrarse en los detalles para ver la ciencia en funcionamiento. En efecto, lo que vemos aquí es la transición entre una teoría y otra. Las teorías cambian con el tiempo, pero por lo general este cambio es ligero y sirve para acomodar pequeñas situaciones problemáticas o cuestiones particulares. En este caso vemos cómo un modelo entero es desafiado por otro y cómo los pensadores de la época logran armar un argumento en favor de alguno de los dos.

Repasando, el modelo de Copérnico es muy diferente del de Ptolomeo, pero logra hacer las mismas cosas: acomoda perfectamente todas las observaciones que son acomodadas por el esquema ptolemaico. En este punto, podrían ser dos modelos alternativos, ambos con el mismo poder explicativo y, por lo tanto, no habría razón para preferir uno sobre otro. Sin embargo, observamos que el sistema copernicano tiene funcionalidades que no aporta el modelo de Ptolomeo. Por eso decimos que el modelo de Copérnico es, en efecto, mejor. Y lo es porque puede explicar todo lo que explica el de Ptolomeo y mucho más. Fue mérito de Copérnico y Galileo (aunque nunca trabajaron juntos) encontrar esas cositas valiosas que un modelo podía hacer y el otro no. Y esto es precisamente lo que se hace en ciencia cuando hay dos ideas teóricas o modelos en pugna: se buscan fenómenos u observaciones de algún tipo que puedan ser explicadas solo por una de las cosmovisiones. Este caso también ilustra algo que vimos al estudiar la idea del ancestro común de Darwin. Las teorías no lo explican todo, siempre tienen agujeros o problemas. Pero no las descartamos por eso, las seguimos aceptando y usando hasta que venga algo mejor o podamos subsanar esas fallas. El modelo de Ptolomeo fue una idea fuertísima, muy rigurosa y sumamente útil. No la descartamos porque no explicaba el

cambiante brillo de los planetas; la descartamos cuando apareció un modelo alternativo que sí lo hacía.

Buena parte de los esfuerzos de Galileo y del propio Copérnico estuvieron enfocados en probar que la Tierra en verdad se mueve, que el sistema propuesto por Copérnico es verdadero, que es la correcta descripción de la realidad. Pero esto abre una pregunta de altas calorías filosóficas: ¿reflejan los modelos la realidad o son meras construcciones veleidosas de nuestra imaginación? ¿Puede algo que imaginamos ser una descripción fidedigna de una realidad más profunda que no podemos percibir con nuestros sentidos?

Hay quienes sostienen que la ciencia no debería preocuparse por la pregunta de si los modelos son ciertos o no, y simplemente concentrarse en si son útiles para describir la realidad. “Si acomodan los datos, todo bien”, dicen, “pero eso no quiere decir que sean ciertos o falsos, que reflejen la realidad; basta con decir que todo se comporta como si fueran reales, lo sean o no”. Muchos otros plantean, en cambio, que la cuestión de la realidad fáctica de un modelo es de suma importancia y de directa relevancia para la ciencia. A los primeros se los suele llamar “instrumentalistas”, y a los últimos, “realistas”. Para un realista, es lícito discutir y tratar de dirimir la existencia real de entidades teóricas no observables. Para un instrumentalista, la ciencia debe limitarse a tratar los observables y, si bien las entidades teóricas pueden ser útiles, no es lícito tratar de establecer si son reales o no.

En el caso del sistema solar, tenemos dos modelos que en principio eran exitosos por igual en acomodar las observaciones sobre los cuerpos celestes. La pregunta clave en ese momento era cuál de ellos era cierto. Una pregunta más relevante ahora es: ¿resulta válido para la ciencia preguntar cuál de los dos modelos es verdadero o tan solo debemos preguntarnos cuál es mejor en acomodar los hechos? El gran libro en el que Copérnico expuso sus ideas en detalle (*De revolutionibus orbium coelestium* [*Sobre las revoluciones de los orbes celestes*]) contenía una introducción que decía justamente esto último: que ambos modelos eran equivalentes y que el objeto de su obra no era tratar de revelar la verdad sobre la estructura real del sistema solar. Hay un fuerte consenso entre los historiadores de la ciencia de que esta introducción no fue escrita por Copérnico sino por Andreas Osiander, su editor. Está claro que el propio Copérnico sí estaba interesado en saber de verdad cómo es el sistema solar, es decir, era un realista. Galileo también tenía una fuerte convicción en cuanto a que el

sistema de Copérnico reflejaba la verdadera naturaleza del sistema solar y, aunque en su gran obra *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* dice que no se inclina más por uno que por el otro, es evidente que sí lo hace (y eso le costó caro ante la Inquisición).

Hay algo que no aparece en la viñeta pero que es oportuno e importante que apreciemos. Estos dos modelos fueron concebidos como formas matemáticas de describir el movimiento de los astros en el cielo. Pero las implicancias de cada una de estas concepciones, sobre todo si se tiene una posición realista, son descomunales. Para la visión ptolemaica, los planetas son estrellas bizarras, astros que giran alrededor de la Tierra en órbitas diferentes a las del Sol y la Luna. En este esquema están, por un lado, la Tierra y, por el otro, el resto de las cosas. Pero en el sistema copernicano, no hay diferencia alguna entre la Tierra y los planetas. Bien podríamos decir entonces (y de hecho lo decimos) que la Tierra es un planeta más. Pero también podemos pensarlo desde la otra perspectiva y decir que los planetas son otras Tierras, otros mundos, tan mundos como la Tierra. Quizá sean de roca y tengan montañas y ríos, y quizá haya en ellos seres vivos o personas. Esta es la gran revolución cultural que significó la adopción del nuevo modelo. Un pequeño cambio matemático de punto de vista que nos lanzó a concebir el universo y nuestro lugar en él de manera totalmente diferente. Este es el poder más profundo de las teorías en ciencia: cómo las visiones que generan pueden ser la forma más radical en que vemos y sentimos el mundo.

A continuación, una serie de consignas para llevar a cabo con los alumnos, que retoman lo trabajado en la viñeta anterior respecto de la relación entre las teorías (como ideas “inventadas” o imaginadas para dar sentido a una serie de datos) y las observaciones o los datos que dichas teorías buscan explicar.

### Propuestas para el aula

---

---

1. Mencionen al menos una observación que encaje bien con los dos modelos, ptolemaico y copernicano, del sistema solar.
2. ¿Qué observaciones encajan bien con el sistema copernicano pero no con el ptolemaico?

3. De acuerdo con el texto de la viñeta, ¿hay alguna predicción del sistema copernicano?
  4. ¿Piensan que puede haber una situación en la que aceptemos como ciertos dos modelos o teorías diferentes del mismo conjunto de fenómenos?
  5. Los planetas no están todos a la misma distancia del Sol (y por lo tanto, de la Tierra), y por eso a medida que la Tierra (y los planetas) se mueven alrededor del Sol, los vemos en diferentes posiciones en el cielo. Las estrellas también se encuentran a diferentes distancias del Sol y de nosotros y, sin embargo, nunca las vemos cambiar de posición unas respecto de las otras. Indaguen por qué ocurre esto.
  6. Copérnico publicó su libro en 1543. En esa época se pensaba que el universo estaba compuesto por el Sol, los planetas y las lunas de cada planeta, además de las estrellas. Indaguen en qué época se descubrió que existían conjuntos de estrellas llamados “galaxias” y que el Sol está dentro de una de ellas.
  7. De acuerdo con lo visto en esta viñeta, ¿cómo hacen los científicos para optar entre una teoría y otra?
  8. Si ya tienen un mapa conceptual sobre teorías científicas, agréguele elementos que den cuenta de cómo los científicos optan entre dos teorías que compiten por explicar el mismo conjunto de datos.
- 
- 

## Bibliografía

Levinas, M. L. (2012), *Las imágenes del universo. Una historia de las ideas del cosmos*, Buenos Aires, Siglo XXI.

Rogers, E. M. (1960), *Physics for the Inquiring Mind. The Methods, Nature, and Philosophy of Physical Science*, Princeton, Princeton University Press.

## 10. El calor

Como muchas nociones en física, el calor es un concepto que desde el punto de vista científico tiene un significado algo diferente al que le damos en la vida cotidiana. Es además una idea que fue evolucionando con el tiempo, cambiando a medida que se hicieron nuevas observaciones y se forjaron nuevas teorías. De modo que “calor” puede querer decir una cosa en el contexto de la termodinámica moderna y otra bastante diferente a principios del siglo XIX (y otra muy distinta cuando salimos de casa con demasiada ropa). Durante mucho tiempo, los científicos tuvieron herramientas para medir la cantidad de calor intercambiada por objetos en diferentes fenómenos, pero no lograban ponerse de acuerdo acerca de la naturaleza última de eso que estaban midiendo. ¿Era una sustancia material o la vibración de los corpúsculos de la materia?

### ¿Es el calor una cosa?

---

A fines de 1700 Escocia era un hervidero intelectual. En un mismo pub tomaban cerveza grandes luminarias, como Adam Smith (quizá el más influyente pensador en economía y autor de *La riqueza de las naciones*) y el médico Joseph Black, a quien le debemos las primeras ideas rigurosas y concebidas con claridad acerca del calor.

Black hizo explícito y evidente algo que quizá hoy nos parezca obvio: las cosas tienden hacia la misma temperatura; los objetos calientes se enfrían y los fríos se calientan. Si dejamos una gaseosa helada sobre la mesa, la mesa y el aire a su alrededor se enfriarán. Para Black esto era evidencia de que los objetos intercambian algo, una cosa que él llamó “calor”. Pero cuando dos objetos están a la misma temperatura, no intercambian calor,

y él los imaginaba en un estado de equilibrio térmico. A raíz de esto se planteaba una enorme cantidad de preguntas. ¿Qué es esa cosa que llamamos “calor”? ¿De qué está hecho? ¿Dónde está alojado dentro de los objetos? ¿Es un fluido, está hecho de átomos, ocupa espacio, tiene peso? ¿Cómo pasa de un objeto a otro? ¿Será posible aislar el calor en estado puro, fuera de los objetos? ¿Cómo podemos medirlo?

Black no podía ocuparse de resolver todos estos interrogantes, muchos muy difíciles. Decidió sí que podía atacar el último: cómo medir el calor. Para eso se concentró primero en mezclas de agua a diferentes temperaturas. Las mezcló en recipientes bien aislados del entorno (como los termos) para que los intercambios de calor ocurriesen solo entre las dos masas de agua. Luego realizó estos mismos experimentos con mezclas de diferentes materiales. Black encontró una fórmula para computar con exactitud la cantidad de calor y, en todos los casos, el calor perdido por un objeto era igual al calor ganado por el otro. En otras palabras, el calor (medido con su fórmula) no aparecía de la nada ni se esfumaba en la nada, sino que migraba de un objeto al otro. Pronto Black extendió estas observaciones a situaciones en las cuales un material se derretía, se evaporaba, se condensaba, en suma, cuando había cambios de estado. En estas circunstancias no hay cambio de temperatura, pero Black mostró que sí hay intercambios de calor, y una vez más demostró convincentemente que en estos casos el calor no se crea ni se destruye.

Esto llevó a varios pensadores a postular que el calor es, en realidad, una sustancia o fluido que puede migrar de un objeto a otro, dado que la materia no se crea ni se destruye (la idea de energía todavía no había sido concebida). La llamaron “calórico”. Imaginaron que esta sustancia podía formar una “atmósfera” alrededor de los átomos de las sustancias materiales comunes. A mayor temperatura, un objeto tendría entonces una atmósfera más gruesa de calórico alrededor de sus átomos. Esto podía explicar por qué los materiales tienden a dilatarse cuando se los calienta: sus átomos se separan más para acomodar sus atmósferas de calórico más gruesas. La idea era muy seductora y

pronto consiguió seguidores de alto calibre intelectual. Pero no era la única imaginable. A muchos otros científicos se les ocurrió que el calor podía ser el efecto de la vibración microscópica de las partículas constituyentes de la materia (quizá átomos o moléculas). En efecto, el movimiento también puede transferirse de un objeto a otro, porque las partículas, al vibrar, chocan con sus vecinas transfiriéndoles una parte de su movimiento (y perdiendo otra). ¿Era entonces el calor una sustancia o un tipo de movimiento? ¿Cómo resolver el dilema?

La idea de calor como sustancia se ajustaba bien a los experimentos de Black en los que un objeto se calienta y otro se enfría, y el calor total permanece constante, tan solo migrando de un objeto al otro. El mayor problema con esto es que hay muchísimas instancias en las que el calor sí se crea o destruye aparentemente de la nada. Por ejemplo, si comprimimos un gas adentro de un pistón (como cuando inflamos una bicicleta), el gas se calienta, a veces muchísimo. Y sin embargo, ninguna otra cosa se enfría. ¿Estamos creando calórico de la nada? “En absoluto”, decían los defensores del calórico. Lo que sucede en esos casos es que, al comprimir el gas, apretamos sus partículas y en efecto “exprimimos” algo de sus atmósferas de calórico (sí, como con el jugo de las naranjas).

Otro caso de creación de calor de la nada ocurre cuando frotamos con fuerza un objeto: el objeto se calienta sin que ninguna otra cosa se enfríe. Los defensores del calórico aducían que la fricción arrancaba cantidades diminutas de calórico de la superficie de los objetos. “Pero entonces”, decían sus detractores, “¿por qué parece inagotable?”. “Es que hay mucho”, decían los otros, “y en algún momento sí se va a acabar”. “Ah, qué conveniente”, respondía el otro bando. Los que sostenían que el calor es una forma de movimiento microscópico señalaban justamente que la fricción es un tipo de movimiento y que lo que hace es transferir parte de ese movimiento a las partículas. Varios seguidores de la concepción del calórico elaboraron esta idea de manera matemática y la usaron con enorme éxito para refinar, por ejemplo, nuestra comprensión del sonido y su propagación (tal como hizo Pierre-Simon Laplace) o el

funcionamiento de las máquinas de vapor (como hizo Nicolas Sadi Carnot, quien a partir de esto desarrolló la segunda ley de la termodinámica). El calórico parecía un gol de media cancha. Pero más tarde se demostró que las ecuaciones ideadas por estos dos físicos también eran válidas si se asumía que el calor es una forma de movimiento, de manera que... ¡el gol era para ambos equipos! Ambas ideas anotaban por igual en el marcador. Quizá la disputa más fuerte entre las dos visiones del calor pasaba por el peso. Si en verdad el calor es una sustancia, tendría que tener peso, porque toda la materia pesa. En eso estaban todos de acuerdo. Esto condujo a muchos investigadores a realizar diversos experimentos para comparar el peso de un objeto cuando está frío y cuando está caliente. Estos experimentos son difíciles de ejecutar y la mayoría de ellos daba resultados confusos e imposibles de interpretar. Hasta que un investigador conocido como el Conde Rumford diseñó una manera de resolver todos esos escollos; sus métodos eran tan buenos que sus resultados eran prácticamente irrefutables. Y lo que encontró fue que los objetos pesan lo mismo calientes o fríos. “Ahá”, dijeron los partidarios del calor como movimiento, “¿han visto? El calor no pesa, o sea que no es una sustancia”. “Momentito”, dijeron los otros, “lo que pasa es que pesa tan poco que no es detectable con estas técnicas”.

La discusión siguió por mucho tiempo. Durante la segunda mitad del siglo XIX vieron la luz ideas muy importantes para la física, como la de energía, sus formas de transferencia y de transformación. Y también se desarrolló una mejor comprensión del movimiento de los átomos y las moléculas, lo que permitió convencer a todos de que eso que Black llamaba “calor” era un tipo de movimiento microscópico. Pero para ese entonces la palabra “calor” ya se usaba para denominar otra cosa que no vamos a contar, porque si no, la historia se volvería aún más complicada de lo que es. Baste decir que las ideas que emergieron de todo esto conforman hoy el campo de la termodinámica, una de las ramas más importantes de la física.

---

---

## Comentario y ejercicios

Como en los casos anteriores, hemos visto en esta viñeta que los científicos son capaces de imaginar entidades o fenómenos más allá de los sentidos y usar estos conceptos imaginarios para comprender lo que sí se observa. Y como en la última viñeta, encontramos aquí también dos modelos o dos teorías en pugna. Pero a diferencia de aquella, lo que aquí se narra es cómo los dos modelos convivieron por largo tiempo.

En una posición filosóficamente instrumentalista, esto no representa demasiados problemas. Pero muchos científicos tienden a ser realistas, y si el calor es una cosa u otra, les genera una notable inquietud y una deportiva necesidad de encontrar alguna forma de descartar alguno de los modelos. Por supuesto que nos gustaría saber “cómo son las cosas de verdad” y no conformarnos con cómo se nos ocurre en la cabeza que son. Sin embargo, debemos aceptar que nuestras herramientas para conocer la realidad son limitadas y nuestro acceso a las verdades profundas de la naturaleza es escaso y difícil, así que con frecuencia debemos convivir con cierto grado de incertidumbre.

Pero lo mismo vale, o así debería ser, en el contexto de la enseñanza de las ciencias. Si los científicos pueden convivir con aproximaciones sucesivas y fragmentarias a la realidad, ¿por qué no nosotros en el aula? Ahora consideramos que el calor no es una cosa, ni siquiera una forma de energía, sino una forma de medir *intercambio* de energía. Nos dicen los que saben de termodinámica que esto es así porque el calor no es una “función de estado”. Pero este es un argumento razonable y entendible en el contexto de la termodinámica, algo que la mayor parte de los mortales apenas vemos de reojo en un curso universitario avanzado. Para el resto de nosotros, el calor como forma de energía puede ser un gran acercamiento, bastante útil y hasta bello. Para muchos alumnos y personas escolarizadas, el calor puede seguir siendo concebido como una sustancia. Quien así lo piense podrá estar “equivocado” desde el punto de vista de la ciencia más moderna, pero está acompañado por incontables científicos fuera de serie que trabajaron con esta noción de manera fructífera.

A continuación, proponemos algunas consignas para trabajar con los alumnos. Estas preguntas se focalizan en la particularidad de que un conjunto de fenómenos puede ser acomodado por dos teorías a la vez.

## Propuestas para el aula

---

---

1. Hagan una lista de las observaciones acerca de los fenómenos térmicos que se mencionan en esta viñeta.
  2. Para cada fenómeno térmico, expliquen cómo es acomodado por cada uno de los modelos de calor: el del movimiento de partículas y el del calórico.
  3. ¿Qué predicciones encuentran en esta viñeta?
  4. Al hablar de teorías, usamos palabras como “observación”, “noción teórica”, “acomodar” y “predecir”. ¿Qué quiere decir cada una de estas palabras cuando hablamos de teorías científicas? ¿En qué difieren esos significados del que le damos a las mismas palabras en nuestro día a día?
- 
- 

## Bibliografía

Conant, J. B. (comp., 1957), *Harvard Case Histories in Experimental Science*, Cambridge, Harvard University Press, disponible en [archive.org](http://archive.org).

Gellon, G. (2010), “Esa cosa llamada calor. ¿Pero es una cosa?”, *Ciencia Hoy*, 20(116): 40-43, disponible en [www.cienciahoy.org.ar](http://www.cienciahoy.org.ar).

Lindley, D. (2001), *Boltzmann's Atom*, Nueva York, The Free Press.

Psillos, S. (1994), “A Philosophical Study of the Transition from the Caloric Theory of Heat to Thermodynamics. Resisting the Pessimistic Meta-Induction”, *Studies in History and Philosophy of Science*, 25(2): 159-190.

# 11. La genética de Mendel

La genética es uno de los cuerpos de teoría más sofisticados, útiles y poderosos que ha producido la ciencia. En la actualidad es de considerable complejidad. La genética comenzó como un esfuerzo por entender las leyes de la herencia, es decir, los patrones que gobiernan las características transmitidas de generación en generación. Este esfuerzo se inició con los trabajos del monje católico Gregor Mendel sobre una especie de arveja, pronto se extendió a muchos organismos y culminó su primera etapa cuando Thomas H. Morgan y otros biólogos dieron una explicación comprensiva del comportamiento de los cromosomas en las células. En la siguiente etapa se pudo saber que hay herencia sin cromosomas, especialmente en los microorganismos, que parecen violar las leyes de Mendel, pero que en realidad son situaciones más amplias y diversas (la genética de los cromosomas es un caso particular de la genética más general). Al desentrañar el rol del ADN en las funciones generales de la célula, se obtuvo un panorama de la genética que va mucho más allá de la herencia y que describe la transmisión y también el funcionamiento de los genes. En esta viñeta nos remontaremos al comienzo para analizar el trabajo original de Mendel. La siguiente se centrará en la expansión del modelo de Mendel, y una viñeta más nos mostrará cómo se arribó a una comprensión del rol de los cromosomas. Y como si esto fuera poco, tenemos una viñeta adicional sobre la dilucidación de la estructura del ADN. Así que hay genética para rato en este libro. *Bon appétit.*

## La arveja idealizada

---

Cuando en 1859 Darwin dio a conocer sus ideas sobre evolución, mostró que la selección natural solo opera sobre características que son heredables, y esto dejó al descubierto que se sabía muy

poco sobre las leyes que gobiernan la herencia en los seres vivos. Los científicos de la época estaban convencidos de lo que había que hacer: era imprescindible indagar más sobre la herencia. El propio Darwin hizo esfuerzos gigantescos pero infructuosos para encontrar una respuesta. La lógica de la época indicaba que, para construir una teoría de la herencia, había que estudiar todos los fenómenos relacionados con ella y recabar una gran colección de observaciones relacionadas con esto. Con el tiempo sería aparente algún patrón en todas esas observaciones y se podría proponer un esquema conceptual que le diera sentido a ese todo, como había ocurrido antes con el sistema solar o con la evolución. Este es el camino que siguió Darwin. Gregor Mendel, quien finalmente dio el puntapié inicial, optó por una estrategia bien diferente. Trató de construir una idea que explicara no grandes conjuntos de observaciones, sino unas pocas muy bien elegidas. Veamos cómo.

Mendel decidió concentrarse en una única especie vegetal, la arvejilla *Pisum sativum*. Para estas plantitas existía en la horticultura una serie muy amplia de líneas puras. Las líneas puras son plantas cuya descendencia es siempre igual, si se cruzan siempre dentro de la misma línea. La horticultura había producido muchísimas de estas variedades. Desde el punto de vista hereditario, son homogéneas y predecibles. Optar por una sola especie y dentro de esa especie haber elegido líneas puras implica trabajar con un sistema muy simple y en cierta medida artificial, en comparación con lo que pasa en la naturaleza. Mendel fue más allá y buscó líneas puras que tuvieran dos formas alternativas para ciertas características. Por ejemplo, para la característica “color de flor” hay dos formas, una blanca y otra violeta. No existen formas intermedias. Mendel buscó este tipo de caracteres, los que no tienen formas intermedias. O sea, se concentró más aún; el sistema es ahora más acotado y más estilizado.

¿Qué patrones emergen en este sistema controlado y simplificado? Mendel encontró que al cruzar dos líneas puras con formas diferentes (flores blancas y flores violetas), la progenie es siempre de un tipo (en este caso, todas son de color violeta). Pero

si cruzamos entre sí estas nuevas plantas hijas (todas violetas), las plantas nietas vuelven a tener flores blancas y flores violetas. Y esto es muy llamativo. ¿Cómo es posible que plantas con flores violetas produzcan una prole de plantas que incluye flores blancas? ¿Dónde estaba la información para hacer flores blancas?

La idea expuesta por Mendel trata de resolver este misterio acotado. Propuso que todos los organismos siempre tenemos información para dos formas, pero que una de las formas oculta o tapa a la otra. Decimos que el violeta es “dominante” y tapa al blanco, al que hoy llamamos “recesivo”. La información está duplicada, porque una copia viene de nuestros padres y otra de nuestras madres. Al reproducirnos, formamos óvulos o espermatozoides que tienen solo una de las copias, o sea, información para una de las formas (o blanco o violeta). Así, dice Mendel, pasamos a nuestra progenie solamente una de las dos copias y nuestro consorte aporta la otra copia, tal como nuestro padre y madre biológicos hicieron con nosotros. Las características no pueden mezclarse.

La idea es más o menos sencilla, aunque bastante audaz. Que haya dos copias de la información para una característica no es una situación observable a simple vista. No obstante, existen formas de poner a prueba estas ideas.

Mendel razonó que, si nosotros, al producir nuestros óvulos o espermatozoides, repartimos las copias de nuestra información hereditaria al azar, entonces hay 50% de probabilidades de que pasemos una u otra forma a nuestra descendencia. Y lo mismo ocurre con nuestra pareja. Esto tenía clarísimas consecuencias matemáticas que podían ser puestas a prueba. Si en las flores el color violeta es dominante sobre el color blanco, las flores nietas de dos líneas puras debían ser exactamente  $\frac{1}{4}$  blancas y  $\frac{3}{4}$  violetas. ¡Pero esto es muy fácil de verificar! Basta con hacer el cruzamiento y ponerse a contar. Eso mismo hizo Mendel... ¡y encontró justamente lo que buscaba!

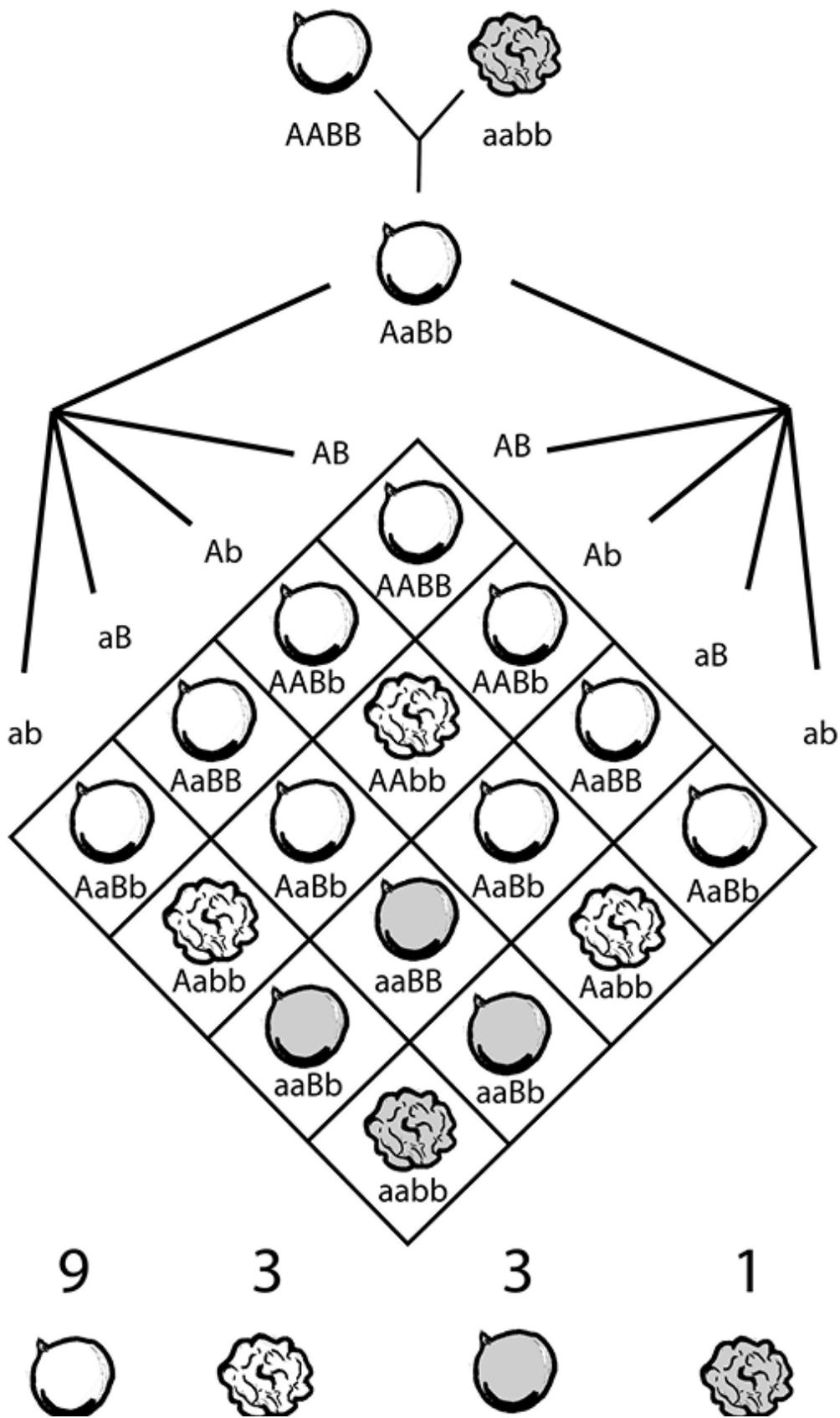
Gregor Mendel también observó que, si se cruzaban dos líneas puras de arvejas y se prestaba atención a *más de una característica*, podían verse cosas interesantes. La primera

generación era siempre de un solo tipo, pero la segunda desplegaba el abanico de todas las posibilidades. Por ejemplo, si partía de una línea pura de arvejas con semillas amarillas y de piel lisa y la cruzaba con una línea pura de semillas verdes y de piel rugosa, en la segunda generación aparecían todas las combinaciones posibles: plantas con semillas amarillas y lisas, con semillas verdes rugosas y también plantas con semillas verdes lisas y con semillas amarillas rugosas (véase figura 11). O sea, cada característica se mezclaba independientemente de las otras.

Y esto le permitía a Mendel poner a prueba su idea de los dos factores de otra manera. Si cada progenitor le entrega a sus hijos una mitad de la información hereditaria que contiene (una de las dos copias), y si cada característica se hereda independientemente de las otras, la segunda generación debería tener todas las combinaciones representadas por igual. Pero como algunas formas son dominantes y otras no, Mendel predijo una distribución de combinaciones de 9:3:3:1. O sea, de cada 16 individuos, habría 9 con las dos formas dominantes (semillas amarillas de piel lisa), 3 con una forma dominante y la otra recesiva (semillas amarillas con piel rugosa) y 3 con la otra forma dominante (semillas verdes con piel lisa), y solo una planta de las 16 tendría las dos formas recesivas (semillas verdes con piel rugosa). De nuevo, esto es muy fácil de verificar si se tiene tiempo y una abadía con huerta, muchas arvejas, las líneas puras adecuadas y la intención y paciencia de poner estas ideas a prueba.

Una vez más, Mendel estaba en lo cierto.

**Figura 11.** Cruzamientos de Mendel con dos caracteres



---

---

## Comentario y ejercicios

Las ideas de Mendel normalmente no aparecen en los libros como un cuerpo de teoría sino con el título de “Leyes de Mendel”, pero no cabe duda de que la genética lo es y está construida sobre la base teórica de este investigador. No debe ser difícil encontrar fuentes que describan con mayor detalle los experimentos que realizó, qué características consideró y cómo las trató matemáticamente para poder armar así un caso mucho más rico para ser llevado al aula. Lo que por lo general no está destacado en esas descripciones es cuánto es observado y cuáles son exactamente los aportes de Mendel a nivel teórico, es decir, cuáles son las cosas que él no observa sino que propone para acomodar las observaciones. Además, atraídos por la fascinación que ejercen los experimentos simples, nos enfocamos en los números de sus leyes sin detenernos a pensar que esas leyes no pueden encontrarse con tan solo mirar y contar. Mendel hace experimentos muy *deliberados* en situaciones sumamente controladas y artificiales. Está buscando poner a prueba sus ideas teóricas mediante predicciones. Él no lo manifiesta así en su publicación, porque no era el estilo de la época, pero es difícil escapar a la conclusión de que las dos leyes son predicciones específicas de su modelo. Un ejercicio interesante para realizar con los alumnos es revisar los textos que usan en clase y buscar: a) observaciones originales, b) ideas teóricas propuestas por Mendel y c) predicciones que realiza el modelo.

Pero hay otro aspecto del trabajo de Mendel de enorme importancia para nuestro entendimiento de cómo opera la ciencia. Una visión ingenua de la ciencia nos diría que, para construir una teoría, un científico o una científica observa y observa, encuentra patrones en lo que ve y por último propone un esquema que acomode estas observaciones. En la realidad no está claro cómo cada investigador hace ese salto desde la observación a la idea teórica, y posiblemente sea diferente en cada caso. La estrategia de Mendel nos dice mucho si la comparamos con los esfuerzos que realizó Darwin para arribar a una teoría de la herencia. Darwin juntó observaciones de todo

tipo, cuantas más, mejor, y luego trató de diseñar algo que lo acomodara todo. No pudo. Aunque esta misma técnica fue la que resultó exitosa cuando estudió la evolución por selección natural. Mendel, por contraste, se enfocó en un caso muy particular, casi minúsculo y raro, y empezó a construir desde allí. Partía de la idea de que una teoría puede elaborarse yendo desde lo sencillo a lo complejo. Buscamos una situación que sea simple, o directamente la simplificamos por manipulación. Mendel trabajó con líneas puras, porque eso simplificaba mucho las cosas, aunque se alejara de la realidad de la naturaleza. En ese sentido, seguía los pasos de Galileo y los físicos, que eran expertos en ignorar los detalles de cada situación particular para tratar de entender una visión idealizada de la realidad. A partir de esta visión simple, casi caricaturesca, es posible empezar a buscar formas progresivas de tornar el modelo cada vez más y más sofisticado. En esta viñeta hemos visto cómo Mendel consiguió encontrar las condiciones en las cuales algo funcionaba de manera bella, reproducible y altamente entendible. El modelo propuesto era muy hermoso. El problema es que era válido solo para siete características elegidas con mucho cuidado en una única especie. ¿Hasta qué punto tendrían validez para el resto de los organismos y los miles de otras características? ¿Era Mendel la regla o la excepción? Con una buena idea bajo el brazo, era tiempo de extenderla a otras situaciones. Pero no sería tarea para Mendel sino para un ejército de sucesores, como veremos en la próxima viñeta.

La noción de idealización, un aspecto muy importante de la construcción de cuerpos teóricos, hace su aparición recién en esta viñeta. A continuación encontrarán ejercicios para que los alumnos trabajen con este aspecto. Es posible que preguntas similares se puedan aplicar a otras viñetas también.

## Propuestas para el aula

---

1. Busquen un libro o sitio web que describa en detalle los experimentos de Mendel.
  - a. ¿Cuáles fueron las cosas que observó?
  - b. ¿Cuáles son las cosas no observables que postuló?

- c. ¿Qué predicciones hace su modelo?
2. ¿Qué aspectos de la propia arveja o de la realidad idealiza Mendel? ¿En qué sentido está “idealizada”, es decir, en qué sentido la idea de Mendel difiere de la realidad?
  3. Busquen ejemplos de la vida cotidiana en los cuales se idealicen o simplifiquen visiones de la realidad.
  4. ¿De qué sirve en ciencia idealizar o simplificar?
  5. Construyan un mapa conceptual que incluya los términos “teoría”, “imaginación”, “realidad” e “idealización”.
  6. Imaginen que alguien en una discusión ataca a la ciencia diciendo que las ideas científicas están alejadas de la realidad por ser visiones simplificadas. Escriban un texto breve en defensa de la ciencia, argumentando por qué es válido idealizar y simplificar.
- 
- 

## Bibliografía

Carlson, E. A. (2004), *Mendel's Legacy. The Origins of Classical Genetics*, Nueva York, Cold Spring Harbor Laboratory Press.

Gellon, G. (2010), “Mendel versus Darwin”, *Ciencia Hoy*, 20(119): 60-63; disponible en [www.cienciahoy.org.ar](http://www.cienciahoy.org.ar).

Sturtevant, A. H. (1965), *A History of Genetics*, Nueva York, Cold Spring Harbor Laboratory Press; disponible en [www.unioviado.es](http://www.unioviado.es).

## 12. Expandiendo las ideas de Mendel

En la viñeta anterior examinamos cómo Mendel construyó un modelo teórico elegantemente compacto para explicar la herencia, basándose en un número de fenómenos muy pequeño y bien escogido. Vimos que él era consciente de que sus ideas debían ser respaldadas por muchas otras observaciones para atribuirles validez, pero la tarea parecía demasiado monumental y minada de escollos. A esto se sumó que sus trabajos no tuvieron repercusión mientras vivía. En realidad, a partir del año 1900 muchos científicos en diferentes lugares de Europa empezaron a mostrar interés por la herencia y llegaron por su cuenta a las mismas conclusiones que Mendel. Al hacerlo, se percataron del trabajo importantísimo que él había realizado y hubo consenso en darle el crédito que merecía. Pero esto significaba que el momento era propicio para seguir adelante, y el guante fue recogido no por pocos sino por un batallón internacional de científicos entusiastas e imaginativos. En esta viñeta veremos cómo se las ingenieron para acomodar casos problemáticos al esquema original de Mendel.

### El tesoro de las excepciones

---

Mendel había ideado una excelente manera de conceptualizar el proceso de herencia. El problema es que lo había propuesto para explicar el comportamiento de siete características de una única especie vegetal (color de flores, vainas y semillas, textura de vainas y semillas, localización de las flores en las ramas y altura total de la planta para la arveja común). ¿Funcionaría para el resto de los organismos y caracteres? A decir verdad, el propio Mendel tenía planes para extender sus conclusiones a otras especies vegetales y también a animales, como los roedores e insectos. Sabía además que se iba a encontrar con problemas. Por

ejemplo, muchas plantas tienen variedades de flores rojas y blancas, pero al cruzar estas variedades dan flores de un rosado intermedio. ¿Serían sus leyes la regla o las excepciones? Mendel no vivió para realizar estos experimentos, pero dejó el terreno preparado para que otros lo hiciesen. Así fue como sus trabajos permanecieron desconocidos por varios años hasta que en 1900 fueron “redescubiertos”. En ese momento las ideas del monje causaron furor por su potencial y comenzó a desarrollarse en todo el mundo un verdadero programa de investigación con la intención de ampliar los resultados de Mendel. William Bateson en Inglaterra estudió varias especies de plantas y también pollos. El inglés Arthur D. Darbishire y el francés Lucien Cuénot comenzaron a cruzar ratones. En los Estados Unidos, William E. Castle trabajó con ratones, pero también con chanchitos de la india y conejos para investigar el color del pelaje. En Inglaterra, Charles C. Hurst se dedicó a ratas, conejos, aves y también tomates, arvejas y orquídeas. En los Estados Unidos, Rollins A. Emerson estudió varias características en porotos y Edgard M. East, varias especies vegetales, incluido el maíz. Encontraron muchas características que obedecían a las leyes de Mendel, pero también muchas, muchísimas excepciones que los dejaron perplejos.

El primero en resolver uno de estos misterios fue el alemán Carl Correns. Investigó plantas con flores rojas y blancas que daban progenie de flores rosadas. Cuando esta primera generación de flores rosadas se cruza entre sí, produce plantas con flores rojas, rosadas y blancas en la proporción 1:2:1. Pero esto, advirtió Correns, es igual que la distribución de Mendel 3:1, con la salvedad de que ni el rojo ni el blanco son dominantes. La idea de dominancia era útil e importante, pero no universal. Este descubrimiento no invalidaba el resto: que la información hereditaria viene en dos copias de los dos progenitores y que solo una al azar pasa a la generación siguiente.

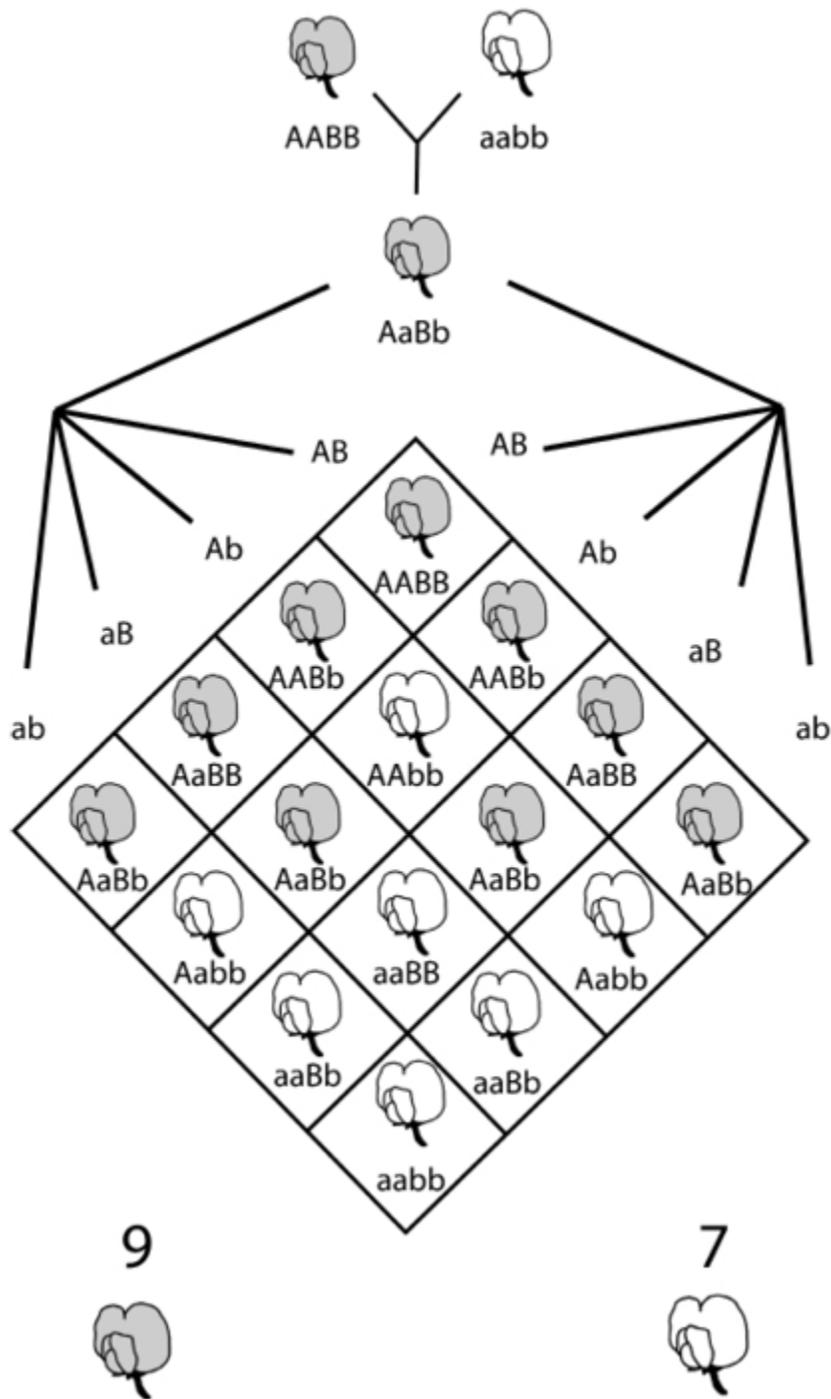
Fue, sin embargo, el inglés William Bateson quien abrió el camino para comprender mejor las excepciones a las leyes de Mendel. Se dio cuenta de que en muchos casos los cruzamientos daban números que no eran los de Mendel, pero sí eran

reproducibles, e intuyó que reflejaban situaciones en las que más de un gen estaba influyendo sobre una sola característica. El análisis de dos características (dos genes) de Mendel daba una distribución típica en la segunda generación de 9:3:3:1 (véase figura 11 en la viñeta anterior). Bateson pensó que las frecuencias que él observaba eran modificaciones de este patrón de Mendel.

Por ejemplo, en la plantita “bolsa de pastor” hay dos formas de fruto: uno alargado y otro con forma de corazón. Si se los cruza, la progenie tiene toda frutos con forma de corazón, pero la siguiente generación tiene frutos en forma de corazón y frutos alargados en proporción 15:1. “Imaginemos”, dijo Bateson, “que hay no uno sino dos genes que pueden influir en la forma del fruto”. Eso quiere decir que toda planta tendrá cuatro copias de información para esa característica: dos copias provenientes del padre y dos copias provenientes de la madre. Imaginemos ahora que la variante “forma de corazón” sea dominante sobre las otras tres copias. Eso quiere decir que la única manera de que un fruto tenga forma alargada es que sus cuatro copias sean de variante alargada. Y eso ocurrirá una vez de cada 16. Exactamente lo que Bateson observó.

Incluso en las arvejillas hay casos en los que el color de la flor en vez de dar 3:1, da una proporción de 9:7. Bateson arguyó que esta proporción puede presentarse si, de nuevo, dos genes contribuyen a la misma característica. Pero a diferencia del caso anterior en el que bastaba una copia de las cuatro para dar la característica dominante, en este tiene que haber al menos una copia de la variante de color en los dos genes. La figura 12 muestra la diferencia.

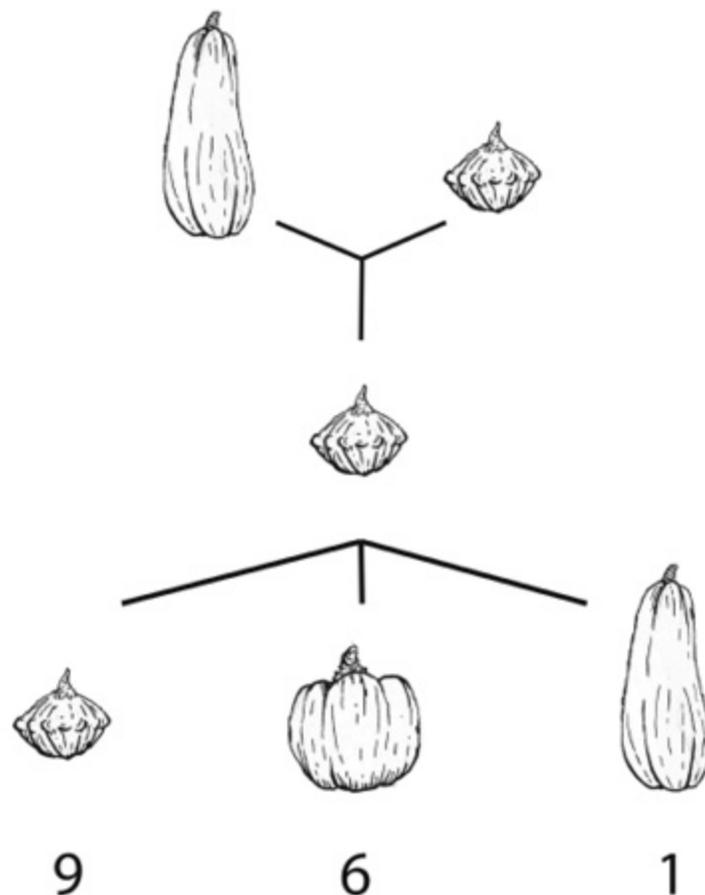
**Figura 12.** Patrón 9:7 en color de flores



De este modo, Bateson concluyó que muchas otras proporciones pueden darse si hay dos genes; la proporción particular que aparece dependerá del tipo preciso de interacción que exista entre estos dos genes. En ciertos casos la interacción puede ser más

interesante que simple dominancia. Por ejemplo, la forma de las calabazas está controlada por dos genes, pero dependiendo de la cantidad y el tipo de copias, pueden darse tres tipos de forma. Las líneas puras tienen forma alargada o de disco, pero la segunda generación de un cruzamiento produce calabazas en forma de disco, esféricas y alargadas en la proporción 9:6:1.

**Figura 13.** Diversas formas en cruzamientos de calabazas



Uno de los temas más controvertidos de la época eran aquellas características que no aparecen con variantes bien definidas, como dos colores o dos alturas o tres formas, sino que muestran una gradación casi continua entre dos extremos, como ocurre con la altura o el peso de las personas y los colores de muchos pelajes. Este fenómeno se llama “variación continua” y muchos

argumentaban que esta era la verdadera materia prima de la evolución y que los caracteres mendelianos eran monstruosidades sin relevancia para el cambio de las especies. El sueco Herman Nilsson-Ehle estudió el color de varios cereales, como el trigo y la avena, en los que hay un degradé de colores del rojo al amarillo claro. Nilsson-Ehle observó primero que los colores extremos se comportan como líneas puras (cruzados consigo mismos siempre mantienen el mismo color). Un cruzamiento entre la variedad roja y la rubia daba un color intermedio y la siguiente generación mostraba cinco tipos de intensidad en las proporciones 1:4:6:4:1. El genetista sueco pensó que esto podría explicarse si el color estuviera determinado por la acción de dos genes cuyos efectos se sumasen de manera sencilla. El color rojo correspondería a cuatro copias de la variante roja; el color amarillo claro, a cuatro copias de la variante rubia. Las otras posibilidades intermedias estarían dadas por: tres copias rojas y una rubia, dos rubias y dos rojas, y tres rubias y una roja. Las proporciones que él veía son las que predicen las leyes de Mendel. Este trabajo fue de enorme importancia, porque revelaba que podían existir otras características controladas no por dos sino por tres o más genes. Y cuantos más genes contribuyeran a una característica, más tendería la distribución a una gradación continua. En la actualidad esto se llama “herencia poligénica” (de muchos genes) y es muy frecuente en casos de variación continua. Hacia mediados del siglo XX, el esfuerzo concertado de todos estos investigadores dejaba claro, más allá de toda duda razonable, que la gran mayoría de las unidades de herencia se comportaban tal y como lo explicaban las sencillas ideas propuestas por Mendel para el modesto caso de la arvejilla.

---

## Comentario y ejercicios

Esta viñeta revela muchas cosas acerca de las teorías científicas que van más allá de las meras predicciones o de la acomodación de las observaciones.

En primer lugar, se reivindica el abordaje de Mendel de comenzar por una construcción idealizada y muy acotada pero poderosa justamente por su simplicidad. En vez de rehuirle a una idea porque sirve apenas para unos pocos casos, conviene muchas veces apostar a una visión elocuente e inspiradora que prometa crecer por su cuenta.

Y precisamente eso es lo segundo que nos muestra este episodio. Las buenas teorías no solo explican cosas y acomodan observaciones, también sirven de inspiración para los rumbos de nuevas investigaciones. Las teorías pueden tener el poder de revelar vacancias, piezas de conocimiento que no se conocen y es necesario estudiar. Quizá porque presentan nuevos problemas, o quizá porque sugieren una generalización obvia, o porque sencillamente resultan atractivas. En lo que atañe a la teoría de Mendel, era natural tratar de probar con otras especies y otras características, y lo más genial es que Mendel había dejado clarísimo cuál debía ser la metodología por seguir: usar líneas puras, hacer cruzamientos, contar la progenie. Con esta receta, había lugar en la ciencia para que cientos de mentes brillantes persiguieran temas independientes. Resultó ser un programa de investigación rico y jugoso.

Por último, la viñeta pone de manifiesto que, si algo no encaja, no hay que desalentarse, sino buscar la manera de que encaje. Quizá el patrón esté un poco oculto, como ocurrió con las proporciones que encontraron Bateson y otros. Pero esto nos dice algo muy potente acerca de las teorías. No solo que pueden tener orígenes humildes y crecer con el tiempo, sino también que tienen diversas posibilidades para crecer. En esta viñeta vemos que además de acumular nuevas observaciones, cuando esas observaciones no encajan perfectamente, en vez de descartarlas u olvidar la teoría, podemos introducir pequeños cambios para acomodar las cosas que no encajan. ¿Flores de color intermedio? Mmm, quizá tengamos que pensar que la idea de dominancia no rige para todos los casos. ¿Es eso el fin del mundo o una mejora de la teoría? Las relaciones de interacción entre distintos genes es una idea de Bateson que no figura en la versión esquelética de Mendel, y al ser agregada le da una nueva riqueza y profundidad a la teoría. En otros casos vimos que, cuando una teoría no lograba acomodar todas las observaciones, a veces lo único que queda es tener paciencia, y otras,

cambiar la teoría. Pero si no aparece una que resulte buena competidora de la teoría vigente, hay que seguir buscando. ¿Qué sería de la genética si Mendel hubiese dado por “incorrectas” sus ideas porque no explicaban todos los casos?

Como vemos, las teorías evolucionan y se complejizan de maneras extrañas, sin una receta ni un camino predestinado. Las preguntas que siguen, para ser usadas en el aula con los alumnos, exploran en parte esta complejidad.

### Propuestas para el aula

---

---

1. ¿Qué modificaciones de la teoría de Mendel propone Bateson? ¿Qué cosas no cambian?
  2. ¿Qué ventajas tiene aceptar las propuestas de Bateson? ¿Cuáles serían las ventajas de rechazarlas?
  3. Si ya han estudiado las leyes de Mendel, hagan el ejercicio de deducir las proporciones que menciona la viñeta dibujando cuadrados de Punnett (un cuadro como el de la figura 12).
  4. (Pregunta desafiante) La figura 13 muestra los resultados que se obtienen al cruzar calabazas, y el texto de la viñeta sostiene que las proporciones corresponden a las propuestas por Mendel. Armen un cuadro como el de la figura 12 que acomode los resultados obtenidos.
  5. Los libros hablan de las “leyes de Mendel”, nunca de la “teoría de Mendel”. Escriban un ensayo breve argumentando, con evidencia, que las ideas de Mendel en efecto constituyen una teoría. Comparen y contrasten las ideas de Mendel con las de otra teoría bien canónica, como la de la evolución o la atómica.
- 
- 

### Bibliografía

Carlson, E. A. (2004), *Mendel's Legacy. The Origins of Classical Genetics*, Nueva York, Cold Spring Harbor Laboratory Press.

Sturtevant, A. H. (1965), *A History of Genetics*, Nueva York, Cold Spring Harbor Laboratory Press; disponible en [www.unioviado.es](http://www.unioviado.es).

## 13. Teoría cromosómica de la herencia

Mientras Mendel trabajaba en soledad en su abadía, la biología alemana era sacudida por una tormenta de descubrimientos técnicos. Carl Zeiss, entre otros, había mejorado notablemente la construcción de lentes para microscopios. Hasta ese entonces las lentes de microscopio generaban importantes distorsiones en la imagen (llamadas “aberraciones cromáticas”). Además de las mejoras ópticas, en la misma época comenzaron a introducirse técnicas para fijar y sobre todo para teñir las muestras de tejido. La primera tinción usada fue la del carmín, sustancia obtenida de unas vaquitas de San Antonio de México. Esto permitió investigar la estructura interna de los materiales biológicos con muchísimo mayor detalle. Robert Hook ya había observado células vegetales con microscopios bastante rudimentarios y se conocían varios microbios de vida libre. Pero con las nuevas técnicas las células animales resultaron más visibles, sobre todo su núcleo (porque se teñía invariablemente con colores diferentes a los del citoplasma). Los científicos comenzaron a entender que todos los tejidos, tanto animales como vegetales, están hechos de células y que estas tienen partes internas. La facilidad con la que se tiñe el núcleo celular permitió que los investigadores se concentraran en el material nuclear y pronto advirtieron que este material sufre cambios muy dramáticos durante el proceso de división celular. Las bellísimas descripciones de Walther Flemming de lo que hoy conocemos como “mitosis” fueron una primera ventana a todo lo que sucede dentro de una célula.

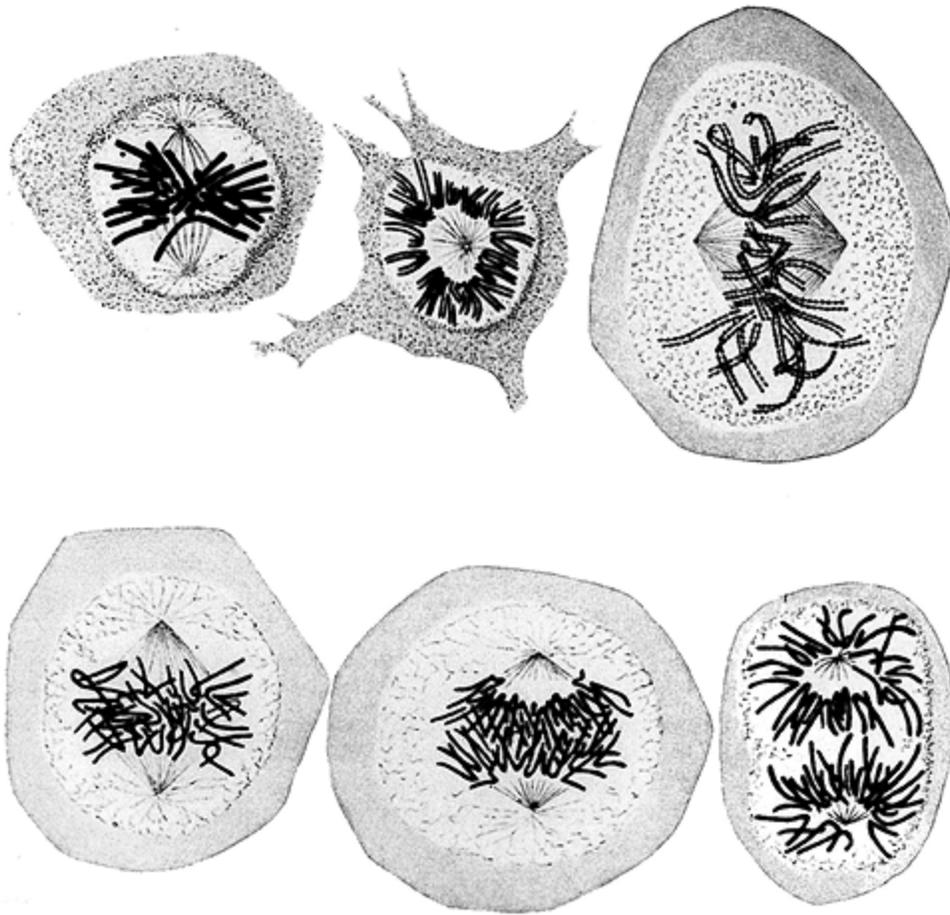
De modo que en las primeras décadas del siglo XX teníamos dos locomotoras que avanzaban a todo vapor y a punto de colisionar: por un lado, la genética de Mendel desarrollada por Bateson y muchos otros en diversos organismos y genes, y por otro, descripciones cada vez más sagaces de los movimientos del núcleo en las divisiones celulares y sobre todo en la producción de óvulos y espermatozoides. Lo que sigue es el relato breve de esta feliz colisión.

## Las células y la herencia

---

A fines de 1882 el alemán Walther Flemming, valiéndose de nuevas técnicas para teñir los contenidos internos de la célula, enfocó su microscopio en un conjunto de células en activa división. Advirtió entonces que la división celular comienza cuando el núcleo parece desvanecerse o perder contornos, mientras que su contenido se condensa en unas largas fibras. Estas fibras se duplican y se separan en dos nuevos conjuntos alrededor de los cuales se forman dos nuevos núcleos. Las fibras fueron más tarde bautizadas “cromosomas” y el sagaz biólogo Wilhelm Roux postuló entonces que esas fibras –los cromosomas– debían ser largas sucesiones lineales de unidades de información genética, es decir, los genes, unidos uno tras otro en una larga fila.

**Figura 14.** Dibujos de Walther Flemming de la célula en división



Su idea fue considerada delirante, hasta que un puñado de descubrimientos posteriores crearon las condiciones para una elegante nueva propuesta no muy alejada de la de Roux. En primer lugar, el estadounidense Walter Sutton advirtió que las células de todos los animales tienen un número característico de cromosomas. Observó que los cromosomas tienen tamaños y formas ligeramente diferentes, pero siempre, para cada tipo de cromosoma, hay otro idéntico; es decir, los cromosomas vienen de a pares. Esto coincidía con las ideas originales de Mendel, que planteaban que todas las características están determinadas por genes que vienen de a pares (una copia de origen paterno y otra de origen materno). Pero además se observó por microscopía que los óvulos y los espermatozoides tienen la mitad del número de

cromosomas que el resto de las células: solo un miembro de cada par.

Esto llevó a Sutton y a su colega alemán Theodor Boveri a postular con mayor precisión la idea de Roux. En síntesis:

- a. Los cromosomas son portadores de los genes, los cuales están ubicados en la longitud del cromosoma de manera lineal, uno detrás del otro. Cada cromosoma es una colección de un subconjunto de genes.
- b. Los miembros de un par son genéticamente equivalentes (tienen información redundante pero un poco diferente); un miembro del par proviene del padre y el otro de la madre, tal como proponía Mendel para los genes.
- c. Al producir óvulos o espermatozoides, cada miembro del par de cromosomas se dirige a una célula hija. Este mecanismo de división “mezcla” los cromosomas paternos y maternos, tal como había descrito Mendel para los genes.

**Figura 15.** Cariotipo humano



Estos son los 23 pares de cromosomas presentes en las células humanas

Esta bella idea fue denominada “teoría cromosómica de la herencia”.

Por supuesto que el hecho de que el comportamiento de los cromosomas en las divisiones celulares encajara con las leyes de Mendel no probaba necesariamente que todas esas ideas fuesen ciertas. Boveri en particular dedicó mucho esfuerzo a conseguir más evidencia confirmatoria. Razonó que, si en verdad los genes están alojados en los cromosomas, entonces si fuera posible construir experimentalmente una célula (o un organismo) con una deficiencia específica de cromosomas (ciertos cromosomas de menos), deberían observarse determinados problemas en ese organismo o célula. Puso a prueba esa idea generando embriones de erizos de mar con cromosomas faltantes y observó que efectivamente tenían malformaciones que siempre correspondían a la ausencia de uno u otro cromosoma. Mucho más tarde (alrededor de 1960) se determinó que cromosomas de más o de menos en humanos y otros animales interrumpen la gestación o provocan problemas del desarrollo (como el síndrome de Down). Entre 1920 y 1930 se descubrió que había genes que no obedecían a las leyes de Mendel. Era como si en vez de separarse al azar, estos genes estuvieran físicamente unidos. Se decía que eran “genes ligados”. Este comportamiento (el “ligamiento”, o *linkage* en inglés) se observa con claridad en los cruzamientos en animales y plantas cuando se estudian muchos genes. Pero la teoría de Sutton y Boveri ofrecía una explicación maravillosa de este comportamiento: los genes se encuentran ligados porque están en un mismo cromosoma; en cambio, los genes que se encuentran en diferentes cromosomas no están ligados y obedecen a las leyes de Mendel. Si esto era cierto, se podía ir más lejos. Si un gen A está ligado a un gen B y el gen B está ligado al gen C, entonces los genes A y C también están ligados, y los tres forman un “grupo de ligamiento”. De acuerdo con la teoría de Sutton y Boveri, en cada especie debería haber tantos grupos de ligamiento como pares de cromosomas. A mediados del siglo XX muchos investigadores empezaron a observar

precisamente eso en varias especies, para alegría y satisfacción de los genetistas.

Quizás el momento más glorioso de la genética clásica vino de la mano de los trabajos del estadounidense Thomas Hunt Morgan, el padre de la mosca de la fruta como modelo de experimentación. Morgan y “sus muchachos” (un grupo de brillantes jóvenes en la Universidad de Columbia en Nueva York) observaron que el ligamiento entre genes no es para siempre. Cada tanto se observa el “desligamiento” de algunos genes (proceso que ellos llamaron “recombinación”). Con audacia, pensaron que las ideas de Sutton y Boveri podían dar cuenta de este proceso elegantemente. Su hipótesis era que los cromosomas se podían partir, de modo que los dos miembros del par intercambiaran pequeños segmentos. Si esto era cierto, los genes más cercanos en el cromosoma deberían tener una tasa de recombinación más baja que los genes que están muy alejados unos de otros. Entusiasmados con su idea, generaron “mapas cromosómicos” con solo observar con qué frecuencia se rompía el ligamiento de los genes (lo cual puede verse en el cruzamiento de moscas con diferentes características físicas). Cuando terminaron sus mapas, nadie dudaba de que los genes estuvieran físicamente alojados en los cromosomas de manera lineal (como habían propuesto Sutton y Boveri casi medio siglo antes y Roux antes que ellos). Las confirmaciones finales vinieron de la mano de muchas técnicas, como las de la biología molecular, algunas de las cuales permiten localizar los genes en el cromosoma. Su ubicación es la que habían propuesto Morgan y sus muchachos. Además, se pudo observar al microscopio que, durante la generación de óvulos y espermatozoides, los pares de cromosomas están entrelazados de maneras que sugieren fuertemente que se están partiendo e intercambiando segmentos (estas estructuras se llaman “quiasmas”; en la web se encuentran con facilidad imágenes de ellas). Pero esto ya no sorprendió a nadie.

---

---

## Comentario y ejercicios

Esta breve pero compleja viñeta muestra la unión de dos cuerpos de teoría en principio separados. A primera vista parecería que la biología celular de la mitosis no es un cuerpo de teoría, sino un conjunto más o menos complicado de observaciones directas. Sin embargo, no era nada fácil hacer esas observaciones, y su interpretación requería una gran sagacidad. En primer lugar, no era posible, como ahora, ver células vivas en división activa. Para observar el material nuclear, el tejido tenía que ser fijado y teñido por la acción de fuertes químicos que matan y modifican la célula. Segundo, no es obvio ni observable que los cromosomas son entidades que no desaparecen, sino que están presentes a lo largo de la vida de la célula (y son heredados en la división celular sin modificaciones); esto tuvo que ser concebido de manera teórica y probado con experimentos (porque los cromosomas solo son visibles cuando la célula se divide y entre divisiones “desaparecen”). Y tercero, tampoco es observable que la división de cada miembro del par cromosómico ocurre al azar (y de hecho no todos lo advirtieron al principio). De modo que la “visión” de la mitosis y la meiosis que tenían los citólogos de la época era un logro basado en tejer una concepción de los procesos antes que en sus observaciones; en otras palabras, un modelo para explicar lo que sí veían, o sea, una teoría.

Cuando la teoría mendeliana de la herencia y la teoría celular de la dinámica de divisiones tomaron contacto, fue evidente que estaban mirando el mismo fenómeno a través de dos lentes diferentes. Y lo primero que esto produce es la fuerte sensación, casi la certeza, de que entonces ese fenómeno debe ser algo real. ¿Cómo explicar si no, que concebimos lo mismo con dos abordajes diferentes? Al coincidir, ambas teorías ganan fuerza. ¿Por qué? Porque ahora, al estar lógicamente conectadas, cada una pasa a acomodar también, de manera directa o indirecta, las observaciones de la otra. Los genes de Mendel, dos por individuo, que se segregan de a uno aleatoriamente al formar cada gameta, no solo explican el comportamiento observable de numerosos caracteres heredables, sino que también son consistentes con el comportamiento de los cromosomas en la división celular, con el número de cromosomas en células somáticas y en gametas. La idea citológica de que los cromosomas vienen de a pares y se separan al azar durante la meiosis no solo es consistente con todo lo que se

ve al microscopio, sino con todo lo que sabemos a través de la cruce de animales y plantas gracias al trabajo de genetistas y criadores.

Hasta ahora habíamos concluido que una teoría gana más fuerza cuando acomoda más observaciones. Pero estamos en condiciones de agregar una nueva y formidable forma de validar una teoría y es por la conjunción con otro cuerpo teórico. En realidad, este es un caso de algo más general que sucede muy a menudo (o que, al menos, uno querría que sucediese): que *una teoría, además de acomodar los datos disponibles, debe ser coherente con otras teorías*. Esa coherencia, o capacidad de encajar, es esencial: cuando se logra, los dos cuerpos de conocimiento ganan fuerza y credibilidad; cuando no ocurre, tenemos un problema.

La electricidad estática y los fenómenos de circuitos durante cierto lapso fueron campos vagamente conectados, y resultó muy gratificante para los científicos encontrar un cuerpo de teoría que acomodase las dos familias de fenómenos. Se sospechaba que los fenómenos magnéticos tenían algún tipo de relación con la electricidad, pero durante mucho tiempo esta conexión no pudo lograrse y cada conjunto de fenómenos tenía su teoría separada. La unión fue mérito de J. C. Maxwell y se la considera un logro de máxima importancia para la física. También el calor tuvo su propio cuerpo de teoría por mucho tiempo; y las reacciones químicas, el suyo –la teoría atómica–. Hasta que en un momento casi mágico para la ciencia, a fines del siglo XIX, varios pensadores desarrollaron la mecánica estadística, un cuerpo teórico que unía la teoría atómica con las teorías del calor (la termodinámica) y con la mecánica (el estudio de las fuerzas y el movimiento).

Cuando estas cosas suceden, nos da la agradable sensación (casi diríamos, la gloriosa sensación) de que estamos haciendo lo correcto, que la imagen del mundo que estamos generando debe ser adecuada, porque todo (“todo” es una forma entusiasta de decir “muchísimo”) encaja. Este es uno de los aspectos más hermosos de la ciencia. No se trata de una mera colección de ideas independientes, sino una visión unificada y coherente del mundo. Por eso pensamos que realmente nos ayuda a ver el mundo tal como es. Pero antes de dejarnos llevar por el entusiasmo, recordemos que, a pesar de los grandes y formidables éxitos, esta visión no es total y existen y seguirán existiendo muchas áreas con sus propias ideas aisladas, o con magras o incongruentes relaciones con el resto de nuestra cosmovisión.

En esta viñeta, además de los aspectos ya discutidos en los otros casos, hemos visto cómo un cuerpo teórico encaja con otro. Los siguientes ejercicios hacen hincapié en este nuevo aspecto. Pero además, nos recuerdan que todavía hay espacio aquí para formular también las viejas preguntas acerca de aspectos básicos de los cuerpos teóricos.

## Propuestas para el aula

1. ¿Cuáles de las siguientes expresiones se refieren a fenómenos o entidades observables y cuáles a fenómenos o entidades propuestos de manera teórica? Marquen con una cruz en O si es observable y en T si es un concepto teórico.

	Fenómeno o entidad	O	T
A	En la división celular los cromosomas se dividen y reparten en las células hijas.		
B	Los genes están en los cromosomas ordenados de manera lineal.		
C	Todas las especies tienen un número característico de cromosomas.		
D	Los miembros de un par de cromosomas son genéticamente equivalentes (aunque no idénticos).		
E	Al formar óvulos o espermatozoides, los cromosomas de origen paterno y materno son mezclados y rebarajados.		
F	Los cromosomas vienen de a pares en las células del cuerpo.		
G	Algunos genes están ligados entre sí (no obedecen a las leyes de Mendel).		
H	Existen en cada especie tantos grupos de ligamiento como cromosomas.		
I	Los genes ligados pueden desligarse, con frecuencias que varían dependiendo de los genes considerados.		
J	Los miembros de un par de cromosomas pueden partirse e intercambiar segmentos.		

2. ¿Por qué la idea de que los genes están físicamente en los cromosomas propuesta por Roux fue considerada delirante en su época, pero adoptada más tarde?

3. ¿Para qué hizo Boveri su experimento con embriones de erizo de mar? ¿Qué se proponía poner a prueba?
  4. ¿Por qué decimos que los mapas genéticos generados por el grupo de Morgan respaldan la idea de Sutton-Boveri?
  5. ¿Cuáles de las observaciones mencionadas en esta viñeta son predicciones y cuáles no?
  6. Busquen en libros y en internet. ¿Cuántos pares de cromosomas tienen los humanos? ¿Cuántos pares de cromosomas tienen los perros? ¿Cuántos genes más o menos tiene un cromosoma humano de los más grandes?
  7. ¿Por qué, cuando dos teorías encajan, ambas ganan fuerza? ¿Qué les parece que pasaría si las dos teorías, en vez de encajar, se contradijeran? ¿Sería eso el fin de una de ellas o pueden convivir cada una en lo suyo?
  8. Al mapa conceptual de la idea de teoría, agréguele elementos que contemplen la fusión entre teorías.
- 
- 

## Bibliografía

- Gellon, G. (2009), “Mitocondrias”, *Ciencia Hoy*, 19(114):42-45; disponible en [expedicionciencia.org.ar](http://expedicionciencia.org.ar).
- Gellon, G. y N. Goldweic (2011), “Células y herencia”, *Expedición Ciencia*; disponible en [expedicionciencia.org.ar](http://expedicionciencia.org.ar).
- O’Connor, C. e I. Miko (2008), “Developing the Chromosome Theory”, *Nature Education*, 1(1): 44; disponible en [www.nature.com](http://www.nature.com).
- Sturtevant, A. H. (1965), *A History of Genetics*, Nueva York, Cold Spring Harbor Laboratory Press; disponible en [www.unioviado.es](http://www.unioviado.es).

## 14. La deriva continental

La tectónica de placas es una de las ideas más poderosas de la ciencia. Básicamente nos explica casi todo lo que se observa acerca del planeta Tierra en una escala global: forma y localización de los continentes y océanos; dónde se encuentran y cómo se forman o producen los cordones montañosos, volcanes, terremotos y otros tantos fenómenos en la superficie de la tierra y bajo el mar. El corazón de la idea fue formulado en 1912 por el meteorólogo alemán Alfred Wegener, pero no fue tomado en serio hasta los años sesenta. Como ocurre con muchas de las viñetas presentadas hasta ahora, esta es una síntesis tan apretada que termina omitiendo o deformando detalles que pueden ser muy importantes si uno deseara hacer alguna otra lectura del episodio. No es la intención de este texto analizar los detalles de lo ocurrido con las ideas de Wegener en la comunidad científica de la época, sino solamente dar un “gustito” de lo complicado que podía ser el debate. Lo que sí es cierto es que las ideas de Wegener eran buenas y que el tiempo les dio un lugar central.

### Continentes a la deriva

---

¿Cómo se forman las montañas? ¿Por qué están ahí y no en otro lado? ¿Por qué hay continentes y océanos en esa disposición? Estas son preguntas potentes que requieren respuestas enormes. A fines de 1800 la explicación más razonable postulaba que la Tierra había estado muy caliente en el pasado; al enfriarse, primero se había solidificado su superficie y luego, al continuar el enfriamiento, el volumen terrestre se contrajo y, en consecuencia, la superficie se dobló y se quebró porque “le quedaba grande” a la Tierra (Eduard Suess lo comparó con una manzana que se seca de a poco y se arruga). Al doblarse, se

formaban montañas; al quebrarse, algunas partes se hundían y formaban océanos. Al principio, todo había estado conectado. La idea era muy hermosa a una escala muy grande, pero tenía al menos dos problemas de envergadura. Primero, predecía que todas las montañas debieron haberse formado más o menos al mismo tiempo, cosa que es notoriamente falsa (sabemos de muchas maneras que los cordones montañosos tienen edades diferentes). El otro problema es que si uno mide la superficie de todos los “pliegues” de la Tierra y los “alisa” mentalmente, la superficie resultante es desorbitadamente enorme. ¿Qué hacer? No mucho, hasta que a alguien no se le ocurra una idea mejor. Muchos propusieron ideas superadoras, pero la que al fin prendió fue la de un meteorólogo alemán llamado Alfred Wegener, que no estaba estudiando montañas sino el *paleoclima*, es decir, el clima de diferentes partes del planeta en tiempos remotos (lo cual se hace analizando fósiles y otras pistas geológicas). Wegener estaba intrigado por el hecho de que muchos lugares de la Tierra parecían haber tenido climas muy diferentes en el pasado (en algún momento la Antártida fue tropical, por ejemplo), cosa que no lograba explicar. Pero Wegener advirtió también que, cuando uno mira detenidamente el contorno de los continentes en un mapa, nota que las costas de Sudamérica y las de África coinciden como piezas de un rompecabezas. Se le ocurrió, entonces, que quizá los continentes habían estado en algún momento todos juntos y que tal vez estuvieran en movimiento, deslizándose muy gradualmente sobre la superficie del planeta. Esto podía explicar por qué en el pasado habían tenido otros climas: en sus viajes por el planeta habían pasado por zonas más cercanas o más alejadas del ecuador y los polos. En 1912 propuso que todas las masas terrestres existieron en un supercontinente al que llamó “Pangea”, que luego se fragmentó en los actuales continentes, los cuales se encontrarían en un estado de lentísimo movimiento unos con respecto a otros. Este movimiento, por supuesto, en aquella época no era visible; en la actualidad lo podemos medir con GPS e imágenes satelitales. En seguida Wegener notó que la idea era magnífica para explicar toda otra serie de fenómenos. En primer lugar, las extrañas

similitudes entre tierras lejanas. Por ejemplo, existen fósiles muy similares en América del Sur y en África. Asimismo, en América del Norte y en Europa hay depósitos de carbón muy parecidos (que además debieron haberse formado en climas tropicales, seguramente cuando ambos continentes estaban cerca del ecuador). Las cadenas de colinas en Sierra de la Ventana, al sur de Buenos Aires, son casi idénticas en estructura y composición a las del Cabo de Buena Esperanza, en Sudáfrica. ¿Cómo se explica todo esto? “Fácil”, decía Wegener, “porque estos continentes antes estaban juntos y los animales caminaban de un lado a otro y tenían condiciones climáticas y geológicas idénticas”.

Pero la idea de nuestro meteorólogo proveía inesperadamente una hermosa explicación sobre cómo se habían creado los cordones montañosos. Según Wegener, los continentes se desplazan sobre la superficie del planeta, y no solo se alejan, sino que en ocasiones se acercan e incluso chocan. Estos choques podrían producir la elevación de grandes masas de rocas. El Himalaya podría deberse a la colisión (lenta pero colosal) de India con Asia.

**Figura 16.** Continentes como rompecabezas



Los fósiles similares en África y Sudamérica sugieren animales prehistóricos que podían caminar entre ambas tierras

Las ideas de Wegener fueron debatidas acaloradamente en varios países, consideradas apenas en otros y descartadas casi de plano en los Estados Unidos, a pesar de que ofrecían enormes ventajas respecto de las ideas anteriores. No solo solucionaban los problemas de la edad de las montañas, sino que acomodaban muchísimas más observaciones que las ideas que se le oponían. No está muy claro por qué el modelo de deriva continental no fue incorporado de inmediato, pero una posibilidad es que los geólogos de esa época (sobre todo los norteamericanos) no fueran muy dados a producir grandes cuerpos teóricos sino, más bien, a acumular datos; la especulación teórica les parecía “mala ciencia”, sobre todo si era en la escala propuesta por Wegener. Pero el modelo del alemán comenzó a ser reconsiderado en los años sesenta y la riqueza de datos producida por la Marina de los Estados Unidos después de la Segunda Guerra Mundial proveyó una andanada de evidencia confirmatoria.

Las ideas de Wegener implicaban, por ejemplo, que los continentes, al alejarse unos de otros, debían provocar fisuras desde donde se colara material subterráneo (magma), y también que estas fisuras debían encontrarse en el fondo del mar. Investigadores ingleses y norteamericanos descubrieron estas zonas, denominadas “dorsales marinas”, al medir la profundidad de los océanos con precisión. Es más, las ideas de Wegener implican incluso que las rocas en el fondo del mar deben ser menos antiguas que las continentales y que su antigüedad aumenta a medida que nos alejamos del punto de separación de los continentes, o sea, de las dorsales marinas (porque allí se generan rocas nuevas). Al calcular la antigüedad de los materiales en continentes y fondos oceánicos, se observó que en efecto esto es lo que ocurre.

Otros científicos encontraron que muchas rocas tienen partes magnéticas que “apuntan” en determinadas direcciones, porque sus partes se alinean con los polos magnéticos de la Tierra. Pero resulta que también hay rocas en diferentes regiones de la Tierra que apuntan en diversas direcciones, y estudios pormenorizados descubrieron que esto era consistente con el cambio de posición de los continentes en su lenta deriva.

Hoy en día estas ideas han sido reforzadas por lo que sabemos de la composición de la Tierra, de la dinámica del calor en su interior y de la distribución de volcanes y sismos y, desde ya, por lo que podemos observar desde el espacio. Se acepta que la superficie de la Tierra está quebrada en “placas”, algunas continentales y otras oceánicas, y todas están en movimiento relativo debido a la agitación “turbulenta” del magma debajo de la superficie. Los modelos que explican el mecanismo del movimiento y sus consecuencias cuando las placas chocan unas con otras o se deslizan unas han crecido en sofisticación y poder predictivo. La tectónica de placas es la teoría actual que tiene su antecedente en la deriva continental de Wegener, y es el cuerpo teórico unificador de todas las ciencias de la Tierra.

---

---

## Comentario y ejercicios

La teoría de la deriva continental (y su reencarnación más compleja, la tectónica de placas) presenta de una forma casi perfecta las características de un cuerpo teórico que hemos estado explorando en los capítulos anteriores. La deriva continental le da sentido a observaciones que en principio parecen desconectadas. Y a diferencia de otras teorías, estas observaciones son variadas y de áreas disciplinares relativamente alejadas. La distribución de fósiles es un asunto de la paleontología; la distribución de climas en el tiempo, del paleoclima; el origen de las montañas (la orogénesis), de la geología más tradicional; la disposición de los continentes, de la geodesia; la magnetización de los minerales, de la mineralogía y luego del geomagnetismo. Pero además, la idea de la deriva continental no apareció en un vacío teórico sino todo lo contrario: competía y chocaba con ideas anteriores o de más o menos la misma época, de casi todas esas disciplinas. La geología tradicional ya tenía sus propias ideas acerca del origen de las montañas; los paleontólogos, sus propias formas de explicar la distribución de fósiles. Hay quienes afirman que la causa del rechazo inicial a Wegener no es otra que el hecho de que la teoría era ¡demasiado poderosa y abarcativa! Abría frentes en todos lados y en cada

uno de ellos encontraba algún contrincante que no veía grandes razones para abandonar sus propias ideas, justamente porque no miraban el plano general, donde se encuentran las grandes ventajas de una idea de esta envergadura.

Quizá por su brevedad, puede parecer que la viñeta sugiere que Wegener era un genio que la tenía reclara y los demás eran unos idiotas que no sabían de qué estaban hablando. Y la realidad, como casi siempre, es mucho más compleja. Veamos aunque sea un poquito de esa complejidad.

Las ideas de Wegener vinieron a desplazar la teoría imperante en esa época respecto del origen de los cordones montañosos y la distribución de los continentes, que postulaba el plegamiento y la rotura de la corteza terrestre a medida que el planeta se contraía por el enfriamiento paulatino. Esto no suponía un gran inconveniente, pues había consenso entre los geólogos de que la idea tenía que ser descartada o reformulada de manera fundamental. Uno de los problemas era que un mundo en el que los continentes se desplazan implicaba una distribución muy particular de rocas en la superficie y el manto terrestre. Mediciones cuidadosas de la gravedad mostraban que debajo de las montañas debía haber o bien rocas de densidad inferior a las de la superficie, o bien muchas más rocas. De estas dos hipótesis alternativas (conocidas como de Airy y de Pratt), solo una era compatible con el modelo de Wegener, pero por razones complejas los geólogos estadounidenses estaban convencidos de que la otra era la correcta. Esto los llevaba indefectiblemente a proclamar que Wegener estaba equivocado de cabo a rabo. Como se ve, la cosa no era sencilla.

Quizá otra razón de la no aceptación de Wegener fuese que los geólogos en esa época eran reacios a las especulaciones de orden teórico. La ciencia muchas veces oscila y pasa por períodos más o menos amigables con la teorización. En otros momentos, los científicos piensan que las teorías se extralimitan en su nivel de especulación. Pero algo que en una época puede parecer desbocado y sin sentido, en otra puede parecer una exploración intelectual legítima y productiva. En la época de Lavoisier, hablar de átomos no era muy bien visto y, aunque los científicos lo hacían, trataban de que no fuera en público. La geología tuvo muchos excesos románticos en los que se generaron ideas complejas sin mucho sustento empírico. Georges Cuvier, el padre de la paleontología, advertía que debía mantenerse la especulación en un mínimo y poner los esfuerzos, en cambio, en acumular datos. Wegener fue acusado de similares excesos; en vez de acumular datos,

vendía sus ideas en todos los rincones de la geología. Lástima que tuviera razón.

A continuación encontrarán algunas consignas para hacer en el aula, con los alumnos, sobre esta viñeta.

## Propuestas para el aula

1. ¿Cuáles de las siguientes expresiones se refieren a fenómenos o entidades observables y cuáles a fenómenos o entidades propuestos de manera teórica? Marquen con una cruz en O si es observable y en T si es teórico.

	Fenómeno o entidad	O	T
A	Los continentes se desplazan sobre la superficie del planeta Tierra.		
B	Los bordes de los continentes tienden a tener formas complementarias.		
C	Hay fósiles similares en puntos distantes del globo, como África y América del Sur.		
D	En un pasado remoto todos los continentes estaban unidos en un supercontinente único.		
E	Los volcanes del mundo no están distribuidos al azar.		
F	Los cordones montañosos no tienen todos la misma antigüedad.		
G	Los cordones montañosos aparecen cuando dos masas continentales colisionan en su desplazamiento por la superficie terrestre.		
H	Las rocas del fondo marino son menos antiguas cerca de las dorsales oceánicas.		
I	Las rocas terrestres son, en promedio, más antiguas que las oceánicas.		
J	Pangea se encontraba cerca del ecuador terrestre.		
K	Hay depósitos de carbón similares en América del Norte y Europa.		

2. Los cuerpos teóricos se construyen para acomodar o darle sentido a una serie de observaciones. A veces, con

posterioridad a que se enuncie la teoría, aparecen nuevas observaciones que, aunque no fueron tenidas en cuenta en la formulación original, encajan perfectamente en la estructura que la teoría propone.

- a. Mencionen dos observaciones que Wegener buscaba explicar con su teoría.
  - b. Señalen dos observaciones que, de acuerdo con el texto, fueron acomodadas por las ideas de Wegener a pesar de que la teoría no fue diseñada para hacerlo.
3. Mencionen una predicción que la teoría del texto formula.
  4. A partir del texto, identifiquen dos ideas alternativas que busquen dar cuenta de la misma observación. ¿Cuál es la observación?
  5. ¿Cómo se resolvió en este caso que dos ideas alternativas den cuenta de la misma observación? ¿Terminó primando una idea? ¿Cuál? ¿Por qué? Comparen este caso con otro que conozcan en el que dos teorías explican o acomodan los mismos datos.
- 
- 

## **Bibliografía**

Oreskes, N. (2003), “From Continental Drift to Plate Tectonics”, en *Plate Tectonics. An Insider’s History of the Modern Theory of the Earth*, Boulder, Chapman and Hall/CRC; capítulo 1 disponible en [earthref.org](http://earthref.org).

## 15. La teoría atómica

La teoría atómica es un cuerpo de ideas tan desarrollado y central para la ciencia que resulta inconcebible que en alguna época haya sido una propuesta osada, producto de una enorme imaginación, que acomodaba con dificultad no mucho más que un puñado de observaciones en la química fundamental. Los orígenes de la teoría, como en muchos otros casos, son humildes. Esta viñeta describe esos orígenes y no la compleja forma en que muchísimas otras observaciones e ideas fueron incorporadas a este cuerpo central. Tampoco se trata aquí de los diversos modelos del interior del átomo que propusieron varios científicos famosos como J. J. Thomson y Ernest Rutherford. Aquí me limitaré a discutir la idea inicial de que todo está hecho de átomos. Los modelos de la estructura interna del átomo son fascinantes y describen de forma muy acabada muchas de las ideas defendidas en este libro. Estos modelos se discuten con diverso grado de detalle en muchos otros textos.

### **Bolitas diminutísimas**

---

---

La idea de átomo es muy antigua. Muchos griegos y romanos pensaban que el universo entero podía estar hecho de partículas minúsculas. Lamentablemente, sus ideas no daban respuesta ni a las preguntas más simples acerca de los átomos: qué tamaño tienen, cuántos tipos de átomos existen, cuáles son las reglas por las que se unen unos con otros, qué fuerzas los mantienen unidos y cuáles los separan. Una verdadera teoría atómica debería no solo declarar que todo está hecho de átomos, sino indicar alguna forma de contestar estas preguntas sencillas pero claves. Esto comenzó a cambiar a finales de 1700 cuando el francés Antoine Laurent Lavoisier determinó, mediante una gran

cantidad de cuidadosos experimentos y mediciones, que todas las sustancias que nos rodean son esencialmente de dos tipos: sustancias simples, que no pueden ser descompuestas en ninguna otra, y sustancias compuestas, que están armadas por combinaciones de las sustancias simples. Llamó a las primeras “elementos” y a las segundas, “compuestos”.

Lavoisier y otros investigadores notaron también que los compuestos tienen siempre una proporción de masa fija de cada elemento. Por ejemplo, si descomponemos agua, obtenemos hidrógeno y oxígeno, siempre en la proporción de 8 gramos de oxígeno por cada gramo de hidrógeno. El amoníaco está compuesto de hidrógeno y nitrógeno, y por cada gramo de hidrógeno hay siempre 4 y 2/3 de gramo de nitrógeno. Estas eran regularidades muy llamativas. ¿Por qué siempre la misma proporción de elementos? ¿Por qué algunas sustancias se descomponen y otras no?

Unas décadas más tarde, un maestro de escuela inglés llamado John Dalton pensaba con denuedo en problemas relacionados con la atmósfera y se imaginaba, como muchos antes que él, que los gases estaban hechos de partículas diminutas. Deseaba saber cuáles eran más grandes y cuáles más pequeñas y se le ocurrió que los resultados de Lavoisier y sus colegas químicos ofrecían una forma de calcular el peso relativo de los átomos. Para eso tenemos que imaginarnos que los elementos están hechos de un solo tipo de átomos y que los compuestos tienen partículas (hoy las llamamos “moléculas”) que son la combinación exacta de átomos de dichos elementos. Así, la molécula de agua estaría hecha de un átomo de oxígeno y un átomo de hidrógeno (pasó bastante tiempo hasta que pudieron darse cuenta de que, en realidad, la molécula de agua contiene dos átomos de hidrógeno). “Pero si esto es así”, reflexionó Dalton, “entonces podemos pensar que el átomo de oxígeno es 8 veces más pesado que el átomo de hidrógeno, y esto explica perfectamente por qué siempre que descomponemos agua obtenemos 8 veces más gramos de oxígeno que de hidrógeno”.

La idea es sencilla. Hay tantos tipos de átomos en la naturaleza como elementos químicos, es decir, tantos como sustancias que

no pueden ser descompuestas en otras sustancias. Cada tipo de átomo tiene un peso particular. Todos los átomos de un tipo son idénticos y tienen el mismo peso. Dalton se imaginaba un mundo atómico bastante preciso, mucho más preciso, de hecho, que el postulado por los griegos de la Antigüedad.

Pero, de ser ciertas, las ideas de Dalton implicaban algunas regularidades fáciles de comprobar. En primer lugar, debía ser posible construir una lista de pesos atómicos relativos (o sea, cuánto más pesado es un átomo que otro) y esos números deberían ser los mismos independientemente de cómo se calcularan. O sea, si el átomo de oxígeno es 8 veces más pesado que el de hidrógeno y el de carbono es 3 veces más pesado que el de hidrógeno, entonces el átomo de oxígeno tiene que ser  $8/3$  veces más pesado que el de carbono. Si, en cambio, los números son diferentes dependiendo de los compuestos estudiados, entonces la idea de Dalton no parece muy firme que digamos. Pero eso no era todo. Existen sustancias diferentes que están compuestas por los mismos elementos. Por ejemplo, los gases metano, etileno y acetileno están hechos, los tres, de carbono e hidrógeno. La diferencia entre las sustancias es que contienen diferentes *proporciones* de cada uno de los elementos. Ahora, si cada sustancia está hecha de átomos, y los átomos, por definición, no pueden partirse en fragmentos, entonces estas sustancias tienen que diferir en cantidades que sean múltiplos de ciertos números, porque uno puede tener el doble de un átomo o el triple, pero no una fracción caprichosa. Dalton estudió los resultados experimentales de otros investigadores y encontró que lo que pensaba era cierto. Hoy se lo conoce como la “ley de proporciones múltiples” y es una de las primeras evidencias fuertes a favor de la idea de que todo está hecho de átomos. En los años siguientes la idea de Dalton tuvo éxitos y enfrentó obstáculos. Muchos científicos descubrieron que varias regularidades podían explicarse pensando en la materia como conformada por “paquetes indivisibles”. Pero al mismo tiempo, resultó bastante difícil determinar sin ambigüedad los pesos atómicos relativos de los átomos postulados. Con el tiempo, otras muchas observaciones parecían encajar perfectamente con la idea

original de Dalton. Por ejemplo, explicaba por qué los cristales tienen formas geométricas precisas y sencillas, o por qué cuando se mezclan diferentes líquidos sus volúmenes no se suman exactamente. Muchos fenómenos eléctricos comenzaron a tener sentido si se los pensaba con la óptica atómica. Incluso los físicos empezaron a pensar que las propiedades de los gases, como la temperatura y la presión, podían calcularse de manera sencilla imaginando un gas como una colección de partículas en incesante movimiento. Sin embargo, muchos científicos permanecieron escépticos durante el siglo XIX hasta que Albert Einstein mostró que el movimiento browniano, un fenómeno con granos de polen observable fácilmente en un microscopio, puede explicarse a la perfección si lo pensamos como el resultado de colisiones desiguales de átomos y moléculas sobre los granos de polen.

Desde entonces la cantidad de observaciones de todo tipo que solo tienen sentido asumiendo la existencia de los átomos es verdaderamente abrumadora. No hace falta verlos para estar ciento por ciento seguros de su existencia.

---

---

## Comentario y ejercicios

La teoría atómica es uno de los pilares más robustos y uno de los logros más acabados de la humanidad. Se trata de un complejísimo cuerpo de conocimientos con muchísimas subteorías que van desde el comportamiento de los átomos en movimiento (en la teoría cinética de los gases y la mecánica estadística), hasta la explicación de las propiedades de los materiales (en la teoría de grupos en química orgánica y el estado sólido); de la estructura interna del átomo (en la mecánica cuántica y la física nuclear), a cómo se hacen y deshacen los enlaces entre los átomos (en la química cuántica y la termodinámica química), por mencionar algunas subramas de esta vasta estructura. Muchas de estas ramas son longevas y ofrecen descripciones detalladas y prácticamente sin ambigüedades. Otras son más nuevas y todavía tienen áreas tentativas y dudas, o no explican del

todo las observaciones que buscan acomodar. Sobre los cimientos se ha ido construyendo un mundo de ideas cada vez más complejo. Por lo general, cada nueva construcción ha ido afirmando la confianza que tenemos en la construcción original. Las dudas están en las ramas jóvenes de activo crecimiento, no en el tronco de las ideas fundamentales.

A continuación encontrarán algunas actividades para trabajar en el aula con esta viñeta. Si quieren más información acerca de la teoría atómica y una exploración mucho más profunda sobre qué es una teoría científica, pueden consultar *Había una vez el átomo*.

## Propuestas para el aula

- De las ideas enunciadas a continuación, ¿cuáles son observaciones básicas que acomodar (O) y cuáles ideas teóricas propuestas para dar coherencia a las observaciones (T)?

	Fenómeno o entidad	O	T
A	El agua puede descomponerse en dos gases por medio de la electricidad.		
B	El carbón y el hidrógeno pueden combinarse para producir el gas metano.		
C	La molécula de agua tiene dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno.		
D	Existe un conjunto pequeño de sustancias, llamadas “elementos”, que no pueden ser descompuestas ni sintetizadas a partir de otras.		
E	Cada tipo de átomo tiene un peso propio y diferente del peso de otros tipos de átomos.		
F	Cada elemento está compuesto por un único tipo de átomo.		
G	Los compuestos están hechos por la unión de elementos o sustancias simples.		
H	Al descomponer un compuesto se obtienen siempre las mismas proporciones en peso de cada elemento.		
I	Los átomos se unen unos con otros para producir moléculas.		
J	Los átomos son indestructibles.		

2. Los cuerpos teóricos se construyen para acomodar (darle sentido) a una serie de observaciones. A veces, con posterioridad a que se enuncie la teoría, aparecen nuevas observaciones que, aunque no fueron tenidas en cuenta en la formulación original, encajan perfectamente en la estructura que la teoría propone.
    - a. Mencionen al menos una observación que las ideas de Dalton buscaban explicar.
    - b. Mencionen al menos una observación que, de acuerdo con el texto, fue acomodada por las ideas de Dalton a pesar de que la teoría no fue diseñada para hacerlo.
  3. Indiquen una predicción que la teoría del texto formula.
  4. Hagan un cuadro que compare la teoría atómica con alguna otra teoría en términos de observaciones, nociones teóricas, acomodaciones y predicciones.
- 
- 

## **Bibliografía**

- Gellon, G. (2016), *Había una vez el átomo*, Buenos Aires, Siglo XXI.
- Mellor, D. P. (1971), *The Evolution of the Atomic Theory*, Ámsterdam, Elsevier.

## 16. El Big Bang

A pesar de su nombre resonante, el Big Bang no es una teoría de “todo”, sino sobre el origen del universo. Claro que esto no es poca cosa, pero el Big Bang trata únicamente del comienzo de las partículas elementales y los átomos y de la expansión inicial del material del universo. Junto con la relatividad general y la mecánica cuántica (otras dos gigantescas teorías de la física), puede explicar no solo la composición del Universo (en términos de partículas), sino la estructura general, cómo las partículas se agrupan y agolpan para dar lugar a estrellas, galaxias y grupos de galaxias. La teoría del Big Bang calza muy bien con esas otras teorías y también con las teorías de química nuclear que explican el origen y la transformación de los núcleos atómicos. Es, sin duda, una idea bella y que ha tenido un gran impacto cultural. Todos sabemos del Big Bang. Quizá porque es fácil de visualizar. Quizá porque coincide con algunos de nuestros mitos más queridos, como el de la creación en un acto singular. O quizá porque nos sumerge en las preguntas más inquietantes y delirantes: si el universo empezó en un momento, ¿qué había antes? ¿Dónde estaba todo antes del inicio? ¿Qué había ahí antes de que todo empezara? Estas preguntas son tan cósmicas como importantes, pero lamentablemente no las vamos a explorar en esta viñeta, que –como las demás a lo largo del libro– se centra más bien en el inicio humilde de la teoría como un esfuerzo de darles sentido a observaciones desconcertantes.

### Galaxias en fuga

---

A principios del siglo XX, y a lo largo de muchos años, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble estudió el cielo con cuidado desde el observatorio de Monte Palomar, en una hermosa zona boscosa y de noches despejadas del sur de

California. Más precisamente se concentró en las galaxias y se percató de algo muy curioso: todas ellas, casi sin excepción, se alejan de nosotros, como si extrañamente nuestro sistema solar fuera el centro de expansión de todo el universo. Pero eso no fue todo: con técnicas muy astutas Hubble pudo estimar la velocidad con la que cada galaxia se aleja de nosotros y detectó que, cuanto más alejada está una galaxia de nuestro Sol, más rápido se aleja de este. ¿Cómo darle sentido a esto? Hubble comprendió que nuestro Sol no puede tener nada especial y que era seguro que esta situación debía repetirse si la miráramos desde cualquier estrella o galaxia. Esto implicaba que cada galaxia se debía estar alejando de *todas las demás*, y que, por lo tanto, el universo debía estar en constante expansión, con todos sus puntos alejándose los unos de los otros, como un globo que se hincha. El francés Georges Lemaître imaginó la escena al revés: si el universo se está expandiendo, seguramente hubo un momento en el que todo lo que vemos debía estar en un solo punto. Un punto de gigantesca densidad, pero también de enorme temperatura. En otras palabras, el universo debió haber comenzado como algo supercomprimido y supercaliente, para luego crecer y enfriarse poco a poco. Esta idea recibió el nombre de “Big Bang”, aunque no se trató de un estallido sino de una expansión que aún hoy continúa.

Las temperaturas del inicio debieron ser tan altas que ni siquiera existían átomos. Es más, eran tan altas y las colisiones entre las partículas, tan violentas –pronto comprendieron– que ni siquiera los protones, los neutrones o los electrones podían permanecer intactos. Las ideas de Lemaître implicaban que al principio el universo debió estar compuesto tan solo de fotones y que en esos primeros minutos de su existencia aparecieron los primeros núcleos atómicos. Pero los cálculos matemáticos que realizaban los físicos de partículas mostraban que, a medida que el universo se expandía, la radiación inicial debía dejar de ser luz para convertirse gradualmente en microondas. Es decir que si el Big Bang en efecto había sucedido, debería poder detectarse en las regiones más alejadas de nosotros una gran cantidad de microondas. Algunos astrónomos decidieron salir a buscar esa

radiación basal en el cielo, y no tuvieron que esperar mucho, porque los científicos Arno Penzías y Robert Wilson, que trabajaban en una gran antena en los Bell Labs de Nueva Jersey ya habían detectado ese fondo de microondas, tal como la teoría decía que debía ser. Ambos ganaron el Premio Nobel y le dieron enorme respaldo a la idea de que todo comenzó en un punto. Por otro lado, cálculos similares mostraban que durante los primeros minutos del Big Bang solo se pudieron haber formado dos tipos de átomos: hidrógeno y helio. Es más, los cálculos daban que debía haberse creado cuatro veces más hidrógeno que helio, lo cual era maravilloso, porque los astrónomos, gracias al análisis espectroscópico de estrellas y nebulosas gaseosas, sabían que en el universo actual hay cuatro veces más hidrógeno que helio.

Pero la idea del Big Bang tenía sus problemas, y no eran para nada pequeños, como corresponde a una teoría tan grande sobre algo más grande aún.

En primer lugar, la teoría no tenía forma de explicar cómo se originaron todos los otros núcleos que no son los de hidrógeno o helio. El análisis espectroscópico revela que estos dos elementos componen más del 99% del universo en que vivimos; sin embargo, resultaba un poco preocupante que no existiera forma de explicar el origen de los otros átomos, que si bien constituyen el 1% del universo, son los elementos más abundantes en nuestro planeta (no en vano nuestros químicos están más interesados por átomos como el carbono, el oxígeno o el hierro que por el helio). Por añadidura, de acuerdo con los cálculos de alejamiento de las galaxias en la teoría del Big Bang, el universo era más joven que el sistema solar, algo claramente absurdo.

En vez de amedrentarse, los científicos trataron de encontrar otras explicaciones. Pronto advirtieron que adentro de las estrellas existen condiciones de temperatura que pueden transformar el helio y el hidrógeno en todos los demás núcleos atómicos, según las teorías vigentes de transformaciones nucleares. De modo que, si bien el universo parecía haber empezado con solo dos tipos de átomos, una vez formadas las estrellas, el resto aparecía allí (y por eso se dice que somos todos

polvo de estrellas). El problema de la edad del universo tenía que ver con cálculos mal hechos acerca de las distancias entre nosotros y algunas galaxias, las cuales resultaron ser más grandes que lo que se había calculado al principio. El universo era mucho más grande de lo que se había pensado y, por lo tanto, había llevado más tiempo desde su inicio hasta el momento actual. En la actualidad el Big Bang acomoda muy bien todo esto y también la estructura del universo en grupos galácticos, galaxias, etc. Y como si esto fuera poco, encaja perfectamente con la teoría general de la relatividad de Albert Einstein, quien, desde antes de las observaciones de Hubble, había postulado un universo en expansión.

---

---

## Comentario

A esta altura espero que los lectores, ustedes, puedan distinguir los rasgos fundamentales de un cuerpo teórico en la viñeta presentada. Además de acomodar las observaciones iniciales de Hubble, el Big Bang hizo predicciones certeras que podían ser puestas a prueba experimentalmente. También vemos aquí cuestiones que aparecieron en otras historias. La teoría del Big Bang tuvo problemas iniciales; no podía explicarlo todo, como también vimos en muchos otros casos (el de la evolución o el sistema solar, por ejemplo). Hubo que esperar a que otras ramas de la ciencia pudieran resolver estos problemas o constatar que algunas de las mediciones iniciales (de las distancias a las galaxias) simplemente estaban mal hechas y que había que mejorar y corregir esos números.<sup>[2]</sup>

Otra cuestión interesante, que analizamos con detalle en el caso de la genética y aquí está apenas esbozado, es cómo una teoría gana fuerza cuando se conecta con otras. El Big Bang encaja armoniosamente con la teoría de la relatividad y con la teoría de síntesis de núcleos atómicos en las estrellas. Tomadas en conjunto, nos brindan una visión coherente y de enorme poder sobre el universo en que vivimos, tanto en las escalas más grandes (conjuntos de galaxias) como en las más pequeñas (partículas subatómicas). En el medio estamos nosotros, pensando nuestras teorías.

En esta viñeta no vamos a incluir los ejercicios para el aula. Sin duda, los docentes pueden construir su propio set de ejercicios. Podrán, por ejemplo, buscar las ideas teóricas y distinguirlas de las observaciones o comparar esta teoría con alguna de las otras que aparecen en el libro.

## Bibliografía

Gribbin, J. (1987), *In Search of the Big Bang. The Life and Death of the Universe*, Londres, Corgi [ed. cast.: *En busca del Big Bang*, Madrid, Pirámide, 1989].

---

[2] Es curioso que algo similar ocurriera con la edad de la Tierra. En el siglo XIX, lord Kelvin, en ese momento quizá el físico con más renombre, hizo un cálculo de la edad de la Tierra basándose en la temperatura del planeta y las ecuaciones de pérdida de calor. Ese número era incompatible con los tiempos que geólogos y biólogos estipulaban que habían sido necesarios para esculpir el paisaje y para la evolución de las especies. Los cálculos de Kelvin tenían un error: no consideraban la fuente de calor de la radiactividad en el centro del planeta.

## 17. De caracoles y berilio[3]

### Un caracol insólito y la ingenuidad del alumno

Incluso los genios deben aprender a pensar científicamente. No solo a realizar observaciones sagaces y experimentos ingeniosos, sino también, sobre todo, a interpretar los resultados que obtienen con esos experimentos y observaciones. Los datos solo tienen sentido en el contexto de las ideas, es decir, de teorías, pero existe una tensión no siempre sencilla de disipar entre lo que vemos y lo que inferimos, entre el dato y la teoría. Charles Darwin (1809-1882) se tropezó por primera vez con esa dura realidad de la ciencia una noche de agosto de 1831, cuando el geólogo Adam Sedgewick (1785-1873), una figura importante de los inicios de la geología moderna, lo contradujo delante de su familia paterna.

Darwin tenía entonces 22 años y era estudiante en la Universidad de Cambridge. No era un alumno muy aplicado: dedicaba la mayor parte de su tiempo a cabalgar, cazar y salir de parranda. El botánico John Henslow (1796-1861), un destacado profesor de quien era amigo, pidió en una ocasión a Sedgewick que llevara al joven Charles en una de sus expediciones geológicas por el oeste de Inglaterra.

La excursión iba a durar unos siete días y partiría de Shrewsbury, localidad cercana a la frontera con Gales, donde estaba la casa paterna de Darwin. Charles invitó al geólogo a pasar en ella la noche anterior a la partida y, durante la cena con su padre y sus hermanos, mencionó con entusiasmo el hallazgo en una cantera vecina del fósil de un caracol tropical, quizá queriendo impresionar a Sedgewick. Pero este solo rio y explicó que si se tomara en serio el hallazgo habría que descartar todo lo sabido sobre la estructura geológica de la región. Lo más probable, sugirió, era que alguien hubiese dejado caer allí ese fósil.

La lección implícita en la anécdota era clara: las teorías son sólidas estructuras que permiten encontrar sentido a una multiplicidad de datos y

observaciones; por eso, el hecho de que una sola observación no coincida con lo que predice la teoría correspondiente no es motivo suficiente para descartar esa teoría. En un caso así, es más sensato descartar el dato. Darwin debió advertir esa noche que mucho le restaba por aprender sobre cómo opera la ciencia.

## **Orden: un fin deseable para la enseñanza y la investigación**

Como muchos estudiantes jóvenes, ese día Darwin fue al mismo tiempo ingenuo y osado. La osadía, sin embargo, no es atributo exclusivo de los estudiantes. El químico Dimitri Mendeleiev (1834-1907) cometió sus actos de osadía académica cuando ya no era alumno sino maestro. Como profesor de la Universidad de San Petersburgo, hacia fines de la década de 1860, procuraba transmitir a sus estudiantes una cantidad descomunal de información sobre miles de sustancias químicas. Buscando orden en el caos de datos, decidió estudiar las propiedades fundamentales de los elementos químicos que componen esas sustancias y notó determinadas regularidades que le permitieron confeccionar la primera versión de lo que hoy llamamos “tabla periódica”. Más concretamente, percibió que si ordenaba los elementos por peso atómico creciente, ciertas propiedades parecían repetirse en forma periódica. Sobre esa base construyó una tabla con ocho columnas que agrupan elementos de propiedades químicas parecidas.

Hoy la tabla se enseña en escuelas y universidades de todo el mundo; es sintética y engañosamente sencilla, pero a Mendeleiev no le resultó fácil armarla, convencerse de su validez y persuadir a sus colegas. La verdad es que si en ese momento se ordenaban todos los elementos químicos conocidos como Mendeleiev lo sugería, no se advertían las regularidades que este había imaginado. Pero de manera osada cambió algunas cosas y forzó otras; cuando los datos no encajaban a primera vista, siguió mirando sin amedrentarse. Como bien podía suceder que no todos los elementos hubiesen sido descubiertos, dejó casilleros vacíos en su tabla inicial. Pero aun así, había elementos que no encajaban bien, como es el caso del berilio.

## Un metal misterioso y el ingenio del maestro

El berilio es un elemento relativamente escaso, tanto en la Tierra como en otros cuerpos celestes. En estado puro o elemental, en el que no es encontrado en la corteza terrestre, es un metal plateado y liviano, reminiscente del aluminio. Se extrae del mineral berilo, un silicato de berilio y aluminio  $[\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6]$ , algunas de cuyas formas se consideran piedras preciosas (como la esmeralda) o semipreciosas. En la época de Mendeleiev se asignaba al berilio un peso atómico de 14,6, que lo ponía muy cerca del nitrógeno y del oxígeno, en la parte derecha de la tabla periódica, donde se alojan los no metales. Sin embargo, el peso atómico asignado al berilio sugería que debía ser menos metálico que el nitrógeno, lo cual no tenía sentido. Mendeleiev concluyó entonces que el peso atómico del berilio debía estar mal determinado.

Su conclusión no fue desatinada. Los métodos para determinar sin ambigüedades los pesos atómicos de los elementos eran entonces bastante recientes. El mejor de ellos, derivado del trabajo del químico siciliano Stanislao Cannizzaro (1826-1910) solo servía para elementos que formaran numerosos compuestos gaseosos. Para los metales se usaba la ley definida en 1819 por los físicos franceses Pierre Dulong y Alexis Petit, que hoy lleva sus nombres, según la cual el producto de la capacidad calorífica y el peso atómico es aproximadamente constante. Era una ley derivada de observaciones, sin el apoyo de una teoría, por lo que Mendeleiev se sintió autorizado a ponerla en tela de juicio. Notó que el berilio se parecía en algo a los metales alcalinotérreos, como el calcio y el magnesio, y sugirió que su peso atómico debía ser de alrededor de 9, por lo que ocuparía el cuarto puesto en la tabla periódica, después del litio y antes del boro, y encabezaría la columna de dichos metales.

El tiempo le dio la razón. Además se comprobó que la ley de Dulong y Petit se cumple mejor a altas temperaturas, y en ese caso el peso atómico del berilio sí se ajustaba a lo sugerido por Mendeleiev.

Algo parecido sucedió con el uranio, cuyo peso atómico aceptado era de 120, lo que lo ponía en un lugar ya ocupado de la tabla. Primero Mendeleiev pensó que esto se debía a un ligero error y sugirió un peso atómico de 116, pero más tarde, tras realizar varios experimentos, concluyó que el peso atómico del uranio era el doble, 240, el valor vigente hoy. Estos no fueron los únicos casos en que Mendeleiev revisó, dudó, cuestionó y

replanteó datos aceptados para acomodarlos al orden que demandaba su concepción de la tabla, es decir, a la teoría que estaba elaborando.

## Teoría y datos

Al comparar estas dos historias –la del joven alumno Darwin y la del veterano maestro Mendeleiev–, advertimos la presencia de una de las complejidades más interesantes que suelen aparecer en la ciencia y en su enseñanza: una tensión entre, por un lado, aquello que vemos y medimos, que da origen a los datos con que trabajamos, y por otro lado, el conjunto de ideas que elaboramos para dar sentido a esos datos y observaciones, es decir, las teorías.

Las teorías ordenan mentalmente y dan sentido a la realidad mediante esquemas racionales de ideas. Pero hacen mucho más: ofrecen una visión de la realidad que trasciende los detalles y accidentes observables y revela sus causas. En esas circunstancias, ¿qué debe primar: la contundencia de un dato concreto que efectivamente se observa y registra mediante los sentidos y los instrumentos, o una idea abstracta sobre cómo debe ser la realidad, algo no observable pero racionalmente fundado? O dicho de otra manera: ¿a qué debe asignarse más peso: a la observación primaria y concreta, o a las ideas que ordenan y proporcionan sentido a un conjunto grande de datos?

Las dos historias relatadas muestran que la buena ciencia consiste en evaluar de forma crítica los datos empíricos en función de las ideas teóricas que los ponen en contexto. Un fósil individual de caracol difícilmente pueda poner en cuestión una compleja construcción de ideas acerca de la estratigrafía y el pasado geológico probable de una región, por más que su estructura conceptual contuviese partes oscuras o imperfectas. Lo mismo se puede decir acerca del metal díscolo. De hecho, sucedió que, a pesar de todo el cuidado que se había puesto, la observación (o como diría un científico, el dato experimental) era incorrecta, porque las técnicas de medición no eran adecuadas o porque era necesario tomar la capacidad calorífica a altas temperaturas.

Una de las bellezas de los cuerpos de teoría es que ayudan a decidir en qué datos confiar y cuáles revisar. Pero es una belleza no exenta de peligros, porque así como una teoría puede revelar lo que era invisible, puede

llevarnos a ignorar alguna faceta de la realidad que asoma bajo nuestras propias narices.

## De alumno a maestro

La humillación de Darwin no cayó en saco roto. En su viaje de estudio por las colinas de los Midlands ingleses y de Gales, Sedgewick no se cansó de demostrar cómo opera la ciencia geológica: caminando, haciendo innumerables observaciones en el campo, obteniendo numerosos datos y tratando de acomodar lo que se observa en el marco de lo que se sabe y se cree, en un cuidadoso proceso de modificación de las ideas y de calibración de lo que se mira y se busca.

En pocos días, el maestro y el alumno reelaboraron la concepción vigente sobre la geología de esa región particular de las islas británicas y el segundo aprendió una lección para toda su vida. En poco tiempo zarpó en su histórico viaje a bordo del *Beagle*, durante el cual aplicó y hasta superó lo aprendido de Sedgewick. Llevó consigo un libro que le proporcionaba un nuevo y ambicioso marco teórico a la geología, escrito por Charles Lyell (1797-1875).

Darwin aprendió a leer la naturaleza en el espejo de ese nuevo marco general, que le resultó no solo ordenador sino también altamente inspirador, dos atributos centrales de las teorías científicas. Al final de su viaje, poco quedaba del estudiante avergonzado por Sedgewick. En pocos años más publicó su poderoso marco teórico: la teoría de la evolución por selección natural.

En *El origen de las especies*, Darwin dedicó dos capítulos a argumentar por qué el registro fósil, tan fragmentado, debe ser tomado con cautela a la hora de analizar las fortalezas y debilidades de su teoría. No solo un caracol tropical en una cantera inglesa: el registro fósil en su totalidad debía ser puesto en tela de juicio. La transformación era, para entonces, completa: había aprendido la fuerza de los marcos teóricos. El alumno se había convertido en maestro.

## En el aula

Sedgewick y Mendeleiev conocían perfectamente los complejos caminos por los que opera la ciencia. Como Darwin en su juventud, los alumnos de ciencias tienen dificultades en apreciar esa característica de la investigación científica. No es infrecuente que piensen que los datos son siempre confiables y que deben acumularse hasta que su sentido resulte obvio. O que crean que una simple observación brillante puede hacer desmoronar de un solo golpe el castillo de una teoría científica.

Como sucedió con Darwin, la visión ingenua del proceder científico debe ser reemplazada por otra más real, producto del trabajo educativo. ¿Cómo puede hacerse? La historia relatada sugiere que una excelente manera es salir a caminar por las colinas del oeste de Inglaterra con el mejor geólogo del momento, para hacer ciencia con él. Pero esto difícilmente resultará posible para los docentes y alumnos que lean este texto. Algunos podrán hacer excursiones por la llanura pampeana, la Patagonia o los Andes centrales, por donde también anduvo Darwin con la lección aprendida de Sedgewick. Pero todos pueden ganar en la comprensión de la tarea científica valiéndose del análisis de ciertos cuerpos de teoría y su génesis, con la precaución de destacar, al hacerlo, las características que hemos puntualizado.

En otras palabras, aunque no se recurra a palabras difíciles, es necesario tener claro el criterio epistemológico implícito en lo que se desea enseñar. En nuestra concepción de la naturaleza de la ciencia y de las características de las teorías científicas, debemos incluir la no siempre fácil relación entre las observaciones, los datos que obtenemos de ellas y las ideas teóricas que nos permiten entenderlos. Los alumnos, idealmente, deberían poder enfrentarse con datos divergentes y resolver las dudas y temores que ellos les generan. También se los debería orientar a que observen cómo los científicos han lidiado con esas cuestiones.

Es parte de la madurez científica de un estudiante apreciar que (aun en un caso tan simple como el de la curva presentada a continuación) es más razonable aceptar como verdadero aquello que dedujimos con muchos datos, aunque entre en cierto conflicto con cada uno de los datos individuales que registramos. Las teorías amplias nos indican el orden general de las cosas y nos dicen qué hacer o no hacer con moluscos díscolos y metales desconcertantes.

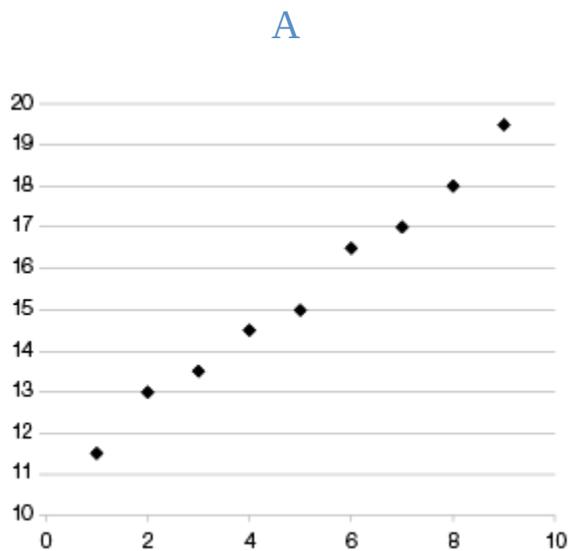
## Un experimento muy simple

---

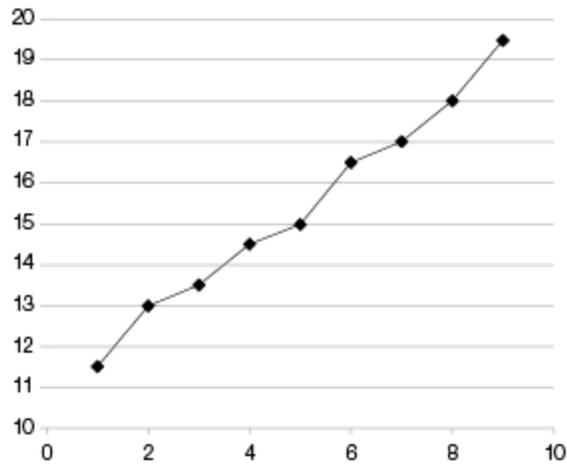
---

Imaginemos que realizamos en el aula una medición sencillísima con una masa de agua fría que se calienta lentamente por contacto con su entorno más caliente, el cual actúa como una fuente constante de calor. Con determinada frecuencia, digamos cada minuto, medimos la temperatura del agua. Queremos saber si aumenta de manera regular, es decir, a velocidad constante. Obtenemos los datos y los registramos en un gráfico de temperatura en función del tiempo. ¿Qué hacer con esto?

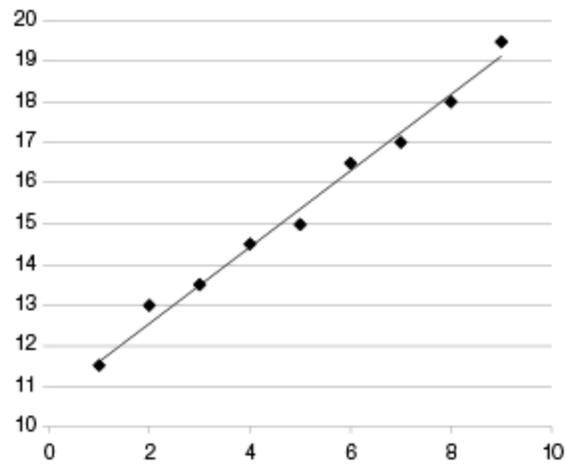
**Gráfico 1.** Temperatura (grados Celsius) versus tiempo (minutos)



B



C



Los puntos nos dan cierta idea, pero mejor sería saber qué pasa con la muestra de agua en todo momento, a pesar de que no medimos la temperatura a cada instante, sino solo en ciertos momentos con intervalos de un minuto entre cada medición. Es probable que la primera reacción de los alumnos sea unir los puntos con segmentos de recta, pero un poco de reflexión indica que esto no sería una buena descripción de la realidad, porque parece extraño que la tasa de calentamiento cambie de repente cada vez que a nosotros se nos ocurre tomar una medición (como puede verse por los cambios de pendiente en cada segmento del

gráfico 1.B). Sin duda, la mejor aproximación a la realidad del fenómeno es la curva que mejor acomode los datos, que puede obtenerse a simple “ojo” o matemáticamente, evaluando diferentes funciones por el método de los cuadrados mínimos (este elige la curva conocida para la cual la suma de los alejamientos de cada punto sea mínima). Por uno u otro camino, no hay duda de que llegaremos a una recta inclinada como indica el gráfico 1.C.

Si queremos saber la temperatura del agua entre dos de nuestras mediciones, la curva sin duda nos dará una buena respuesta. Pero si nos preguntamos cuál era la temperatura a los 2 minutos de empezada la medición, nos encontramos ante dos respuestas divergentes: el dato que efectivamente medimos (13 grados) y el número que nos devuelve la curva que mejor refleja el conjunto de todos los datos (12,6 grados). ¿En qué confiar: en el dato tomado por nosotros, o en el que resulta de la curva? ¿Cuál es más *real*?

La curva es una entidad teórica, una visión hipotética –y, si se quiere, aventurada– de la realidad, basada en datos observables y en ciertas suposiciones, como la de que los fenómenos naturales tienen cierta regularidad. Sin embargo, como acomoda muchos datos, y no solamente uno, *para sacar conclusiones generales* podemos confiar más en ella que en cualquiera de las observaciones individuales, que pudieron haber sufrido la influencia de innumerables circunstancias inadvertidas, incluso errores en el procedimiento o los instrumentos de medición.

---

---

## Bibliografía

Barlow, N. (ed.) (1958 [1887]), *The Autobiography of Charles Darwin 1809-1882*, Londres, John Murray. En castellano, se puede consultar C. Darwin, *Autobiografía*, en [fierasysabandijas.galeon.com/enlaces/libros/darwauto.pdf](http://fierasysabandijas.galeon.com/enlaces/libros/darwauto.pdf).

Browne, J. (1995), *Charles Darwin. Voyaging*, Nueva Jersey, Princeton University Press.

Scerri, E. R. (2007), *The Periodic Table: Its Story and Significance*, Óxford - Nueva York, Oxford University Press.

---

[3]Este capítulo no responde a la misma estructura que los anteriores. Fue publicado originalmente en la revista *Ciencia Hoy*, con el subtítulo “Tensiones entre datos y teorías”.

## 18. Cierre

Hasta aquí, nuestra vuelta al mundo de las teorías en 16 viñetas. Espero que el viaje les haya resultado educativo y ameno. Quedan algunas cosas en el tintero que intentaré abordar en estas últimas páginas.

La primera gran cuestión que merece algún detenimiento, en especial para docentes o educadores, es cómo usar exactamente estas viñetas en contextos educativos como las clases de ciencia. Tal y como están en el libro, son breves y muy condensadas, en un intento por abordar varios aspectos de las teorías en el mínimo espacio posible. Voy a tratar de mostrarles que las viñetas pueden usarse como núcleos de cristalización para proyectos más amplios, ricos y efectivos para la enseñanza de los contenidos encerrados en cada una de las teorías.

Por otro lado, bien podríamos preguntarnos cómo se generan nuevas viñetas o situaciones para enseñar la naturaleza de la ciencia que hagan uso de su historia. ¿Cómo se construyen estas viñetas? ¿De dónde se puede sacar la información? La respuesta no es fácil, pero sin duda hay pistas y consejos que pueden orientar en este desafío.

Y por último, me gustaría compartir con ustedes algunas ideas acerca de la noción de teoría en la vida cotidiana. La idea de cuerpo teórico como instrumento que otorga sentido a las observaciones puede parecer algo muy específico de la ciencia y del pensamiento científico. Sin embargo, quiero argumentar que nosotros construimos teorías en nuestra vida cotidiana, y advertir esto con algunos ejemplos nos puede ayudar a comprender la naturaleza de las teorías en el mundo de la ciencia.

Adentrémonos en la recta final.

**El uso de las viñetas para estructurar secuencias de clases**

Sugiero que pensemos cada una de las viñetas de este libro como el núcleo donde cristaliza algo más grande, pausado y complejo. Analicemos un ejemplo, y a partir de allí, algunas variantes y posibilidades.

Tomemos la viñeta sobre el ancestro común, en la que se discute cómo Darwin elaboró la idea de la evolución por modificaciones sucesivas (recordemos que su teoría de la evolución tiene varios componentes, y que el texto no aborda el otro gran componente, el de la selección natural). Imaginemos entonces que deseamos enseñar aspectos de la naturaleza de la ciencia en el momento en que nos toca o cuando hemos elegido introducir a nuestros alumnos en la teoría de la evolución de Darwin. Una viñeta tan apretada y sintética como la de este libro puede ser de valor si se la entregamos a los estudiantes tal cual como está aquí: quizá pueda servir para ofrecer una síntesis, como material para una evaluación o bien para disparar una discusión o una serie de ejercicios cortos. Por otro lado, una unidad de ancestro común seguramente tomará más de una clase para que el grupo pueda elaborarla, y quizá una viñeta tan corta no cubra todo el material necesario o con la profundidad requerida. Pero –¡*attenti* que aquí está la clave!– la viñeta nos puede servir como hoja de ruta para elaborar una secuencia didáctica que explore las ideas esenciales y, a la vez, sea consistente con los aspectos epistemológicos de la estructura de las teorías.

La viñeta arranca describiendo las observaciones básicas que indujeron a Darwin a sostener la “descendencia con modificación”, es decir, la evolución. Cada una de estas observaciones puede ser el punto de partida para nuestra clase. Repasemos. Las observaciones fueron:

1. la clasificación en forma de grupos dentro de grupos (que es, como quizá hayan advertido, la clasificación linneana clásica de la biología);
2. la similitud fundamental de estructuras con funciones diferentes (lo que los biólogos llaman “homología”), y
3. la distribución geográfica de especies afines (incluidos los fósiles).

Una secuencia didáctica de ancestro común puede componerse de módulos que exploren, con ejemplos concretos y detalles abundantes, cada una de estas observaciones básicas.

En un primer módulo de actividades, los alumnos pueden clasificar una serie de seres vivos, usando fotos de alta calidad. Si los animales o las plantas se eligen con astucia, los alumnos arribarán a esquemas clasificatorios bastante consistentes con la clasificación clásica. La pregunta que queda picando es por qué esa clasificación y no otra.

En otro módulo los alumnos podrán estudiar la distribución de algún animal (o planta) interesante. Los edentados que aparecen en la viñeta son un buen ejemplo, pero también muchos de fauna de islas, como los pinzones que tanto impactaron a Darwin. O mejor aún, las calandrias de Galápagos, que son parecidas pero diferentes a las calandrias argentinas. El docente, mediante preguntas problematizadoras, puede poner sobre el tapete cuestiones enigmáticas respecto de la distribución de las especies. ¿Por qué las calandrias de Galápagos se parecen a las de la Argentina aunque viven en ambientes diferentes? ¿Por qué no hay calandrias en ambientes similares de África o Asia?

Otro módulo podría consistir en actividades que exploren la homología, por ejemplo, comparando huesos o partes de extremidades. La pregunta clave aquí será por qué estas estructuras se parecen si en realidad cumplen funciones diferentes.

Estos módulos pueden distribuirse en clases consecutivas o pueden ser temas que exploren diversos grupos de estudiantes de manera simultánea (incluso como proyectos en los que ahondar, investigar por su cuenta, buscar detalles), para luego hacer una puesta en común en la que cada uno exponga las cuestiones que no logró resolver. Esta última opción pondrá de relieve de forma más dramática el hecho de que la gran belleza del cuerpo teórico es que conecta y da sentido a observaciones independientes y a veces dispares, y que ayuda a resolver esas cuestiones que quedaron abiertas en los trabajos de los alumnos. Podría ser emocionante ver que la idea de ancestro común resuelve elegantemente los enigmas de cada uno de los grupos.

En la discusión general en la que convergen los problemas de cada módulo conceptual de observaciones, el docente puede introducir la idea de ancestro común y mostrar cómo en cada caso la idea arroja luz sobre las cuestiones por resolver. El último paso consistirá en explorar las consecuencias y predicciones de esta idea. El docente podrá, a través de diálogos, sugerir que si la idea de ancestro común es cierta –y en principio en ese momento los alumnos aún no saben si en realidad lo es–, entonces

uno debería esperar ciertas cosas. Esas predicciones están explícitas en la viñeta y de nuevo nos sirven de guía para ordenar nuestra clase. Debería haber fósiles de formas intermedias. ¿Los hay? Este es un buen proyecto para que los estudiantes vuelvan a investigar en la bibliografía y la web, y compartir lo que encuentren. *Archaeopteryx* y *Tiktaalik roseae* son solo dos ejemplos. Hay otros y muy interesantes: el linaje terrestre de las ballenas, otros dinosaurios con plumas, el punto de divergencia entre humanos y chimpancés.

Por último, es importante no perder la oportunidad de reflexionar con los alumnos acerca de la naturaleza de la ciencia. Una vez que han terminado de recorrer la idea de ancestro común, han estudiado las observaciones iniciales, analizado la función de acomodación de las ideas teóricas y reflexionado sobre las predicciones y consecuencias del modelo, están listos para, en un ejercicio mental (que bien podríamos llamar de “metacognición epistemológica”) advertir y tomar conciencia de las partes y los aspectos de la teoría como teoría en sí. En otras palabras, enfrentar ejercicios similares a los que proponemos en este libro: distinguir observaciones de nociones teóricas, acomodación de predicción, etc. E incluso ir más allá y poder discutir que estas características no son exclusivas de la teoría del ancestro común, sino que son propias de este tipo de conocimiento. En suma, que puedan aprender, no solo cómo opera la evolución, cómo llegamos a la idea de la evolución, sino además, y sobre todo, qué es una teoría, para qué sirve, cómo se construye y hasta dónde llega como forma de conocimiento. Ni más ni menos que aprender ciencia y naturaleza de la ciencia al mismo tiempo.

En todas o casi todas las viñetas con las que trabajamos aparecen en primer lugar las observaciones clave iniciales, que son, en esencia, el problema por resolver o la etapa inspiradora de la formulación teórica. Esos fenómenos observables podrán ser proporciones entre elementos que reaccionan, la forma de los continentes, el movimiento de los astros, cómo se heredan las características, la manera en que interactúan ciertos objetos a diferentes temperaturas, etc., etc., etc. En cada caso, estos conjuntos de observaciones iniciales son la hoja de ruta para clases enteras. Para desarrollar la teoría atómica, nos convendría explorar primero las leyes gravimétricas y volumétricas, y para desarrollar la idea de calor, podemos comenzar la exploración con mediciones termométricas, y así con cada una de las teorías.

El docente, además, puede agregarle a la viñeta toda suerte de detalles históricos que la hagan más apasionante, que resalten la estructura de su relato y que traigan otros elementos interesantes de la naturaleza de la ciencia, más allá de la estructura de los cuerpos teóricos. Por ejemplo, podrá mostrar cómo colaboran científicos a la distancia, cómo se comunican entre sí, cómo resuelven sus diferencias, cómo establecen prioridades de autoría o colaboran o compiten, cómo se financia la ciencia o cómo esta influye y es influida por otros aspectos de la cultura.

### Otros usos de las viñetas

Tal como están presentadas –en su mínima expresión, podríamos decir– las viñetas también resultan útiles. El texto condensado puede ser un insumo para que los estudiantes elaboren producciones propias que expandan la idea, identificando aspectos que no están claros, despejando estos puntos oscuros con la ayuda de textos y discusiones. La viñeta, entonces, puede ser el punto de partida, y los productos finales serán monografías, presentaciones orales, infografías, redes conceptuales o debates grupales. El ejercicio mismo de identificar qué se entiende y qué no de un texto técnico tiene valor metacognitivo: es fundamental aceptar que no siempre uno entiende todo y que hay herramientas para despejar las dudas que presenta una fuente de información.

Las viñetas se pueden usar en combinaciones estrambóticas para comparar y contrastar diferentes teorías. Justamente, uno de los argumentos de este libro es que resulta importante reconocer que los cuerpos teóricos tienen características estructurales comunes más allá del contenido de las ideas dentro de la teoría. Conocer y reconocer estas características nos ayuda a “leer” teorías nuevas a las que nunca estuvimos expuestos. Esta tarea es más filosófica que científica, pero no está de más en un aula de ciencias.

Las viñetas pueden también ser un recurso para cerrar un tema, a modo de síntesis, o para evaluar los aprendizajes de los alumnos.

Enseñar ciencias no es fácil, no solo porque los conceptos son técnicos y se requieren herramientas matemáticas. No es fácil por las mismas razones que hacen que valga tanto la pena enseñarlas: porque son sutiles y variadas. Enseñar ciencias no es solo hacer experimentos, y observaciones; no es

meramente método ni tampoco un conjunto de ideas claras; no es resolver problemas. Es todo eso y más, y cada área, cada disciplina, cada tema guarda su enfoque, su mirada, sus excepciones, sus ideas profundas. Las teorías están entre los elementos más desatacados y a la vez más escondidos de la ciencia, porque sus contenidos muchas veces son el pan de cada día y se encuentran frente a nuestras narices, pero su estructura íntima y su base de validez son más complejas de lo que parece a primera vista.

### ¿Cómo se pueden construir viñetas históricas?

La construcción de una viñeta o relato histórico desde cero es un trabajo que les compete a los historiadores de la ciencia. Se trata de una tarea altamente profesional, que no cualquiera puede hacer, en la que se analizan fuentes históricas en el marco de teorías propias de la historia de la ciencia, de la sociología y de la filosofía. En realidad de lo que estamos hablando aquí es de cómo armar una viñeta o relato para usar en el aula a partir de los materiales elaborados que ya están dando vueltas por allí. En ese sentido, la “receta” es fácil de transmitir, aunque no siempre tan fácil de implementar.

Lo primero que hay que tener en cuenta para que una viñeta sea útil en el aula es que nunca debe ser expuesta como una mera anécdota. Su fin no debe limitarse a dar brillo dramático a un episodio, sino explorar una idea fuerte de la naturaleza de la ciencia. Las viñetas de este libro están armadas específicamente para poner de relieve las características de las teorías científicas, pero podríamos contar con otro conjunto de relatos para subrayar o mostrar el modo en que los científicos enfrentan un debate. O el rol de la casualidad en los descubrimientos. O la manera en la que la tecnología influye en la capacidad de descubrir. O miles de etcéteras. Pero lo importante aquí es que el docente o autor curricular decida de antemano qué quiere contar de fondo con esa viñeta, trascender la anécdota y morder en el corazón conceptual de la naturaleza de la ciencia o del pensamiento científico.

Esto quiere decir que los docentes deben tener una agenda (o currículo) de aquello que quieren enseñar acerca de la naturaleza de la ciencia y el pensamiento científico. Deben saber adónde quieren llegar desde lo filosófico (epistemológico, para ser más precisos) y sociológico. Estas

“agendas” son necesarias, pero no de fácil adquisición. En verdad no están explícitas en los diseños curriculares y no se enseñan ni se discuten con suficiente profundidad en la mayor parte de las avenidas de formación docente tradicionales. Esto suena terrible, porque desplaza el problema de la viñeta histórica a otro mucho más profundo y complicado. Lamentablemente, así es. No obstante, esto no implica que debamos sentarnos a esperar que algunos capos en el más allá definan la agenda epistemológica de la educación en ciencias en el nivel nacional, internacional o galáctico. Todos podemos avanzar un poco de a poco. Y para eso hay que leer sobre historia, filosofía y sociología de la ciencia. Hay muchos libros y artículos y cada uno de ellos nos llevará a otros. Y hay una forma aún más sencilla, útil y poderosa: ¡leer viñetas hechas por otros!

Estos “otros” suelen ser historiadores de la ciencia. Ellos a su vez consultan fuentes primarias (documentos escritos generalmente por los propios científicos protagonistas de las viñetas) y secundarias (es decir, elaboraciones hechas por otros pensadores o historiadores). Existen muchos trabajos que comentan acerca de episodios de la ciencia. Y en los comentarios aparecen justamente las cuestiones relevantes de la filosofía y la sociología de la ciencia, los modos en que los científicos piensan y actúan cuando hacen ciencia. Es decir que el fondo de la cuestión, el corazón duro que debemos morder, está, la mayoría de las veces, servido en bandeja por otro que se dedica a eso. Solo se trata de encontrarlo. Una vez hallado, simplemente (¿simplemente?) habrá que reconstruirlo en un formato útil para el aula, presentando las cosas en el orden adecuado, ocultando, parafraseando, expandiendo por aquí y comprimiendo por allá. Un primer recurso al que acudir es la lista de material histórico presentada y curada en el sitio web de Expedición Ciencia ([expedicionciencia.org.ar/historia-de-la-ciencia](http://expedicionciencia.org.ar/historia-de-la-ciencia)).

Entonces, una vez que tenemos el tema de la historia –es decir, las ideas profundas de la naturaleza de la ciencia que queremos explorar– y el argumento –es decir, los detalles del episodio de ese momento de la historia, con sus personajes–, hay que encontrar la estructura del relato. Hay bastante material escrito sobre qué estructura tiene que tener un relato para que produzca los efectos que buscamos. En un primer análisis, podemos reconocer una presentación, un nudo y un desenlace. Pero con una mirada más educativa, hay quienes reconocen que existen paralelismos entre la estructura de un relato y los pasos con los que se construyen las ideas a

nivel cognitivo en quien aprende. Una hipótesis interesante es que un buen relato desde el punto de vista educativo es aquel que presenta tres elementos: el inicial y el final son casi antitéticos y el del medio es la forma de transitar entre uno y otro. Por ejemplo, en su versión más simple, hay una situación en la que un investigador tiene una pregunta, o no sabe algo, o cree una determinada cosa, y en un proceso de investigación o descubrimiento puede contestar esa pregunta o redefinir su idea. El “drama” consiste en resolver una situación y llevarla a su “opuesto”. Del problema a la solución, de la pregunta a la respuesta, del prejuicio al descubrimiento. Sin embargo, a fin de cuentas, estos son análisis a posteriori y muchos autores generan relatos fascinantes y estremecedores sin necesidad de recetas. A veces la intuición nos lleva a buena puerto.

## El amigo gurú

A todos nos ha pasado que conocemos a alguien y en una tarde que se vuelve noche nos hipnotizan sus ojos, y comenzamos a hablar y compartir, y de pronto el mundo gira alocadamente y conversamos de la vida, la muerte, dios, la mente, las estrellas, las relaciones humanas y la vida extraterrestre. Y nos despedimos con un beso prometedor y queremos dar saltitos. Y después, en la semana que sigue la cosa se vuelve más confusa. La persona en cuestión no nos devuelve los llamados o, por momentos, está cortante y tensa. Nos volvemos a encontrar y todo va bien, pero por momentos resulta imposible leer lo que le pasa. ¿Por qué a veces se ríe y está relajada, y otras parece que se quisiera ir a su casa? En circunstancias como estas, con el corazón herido de dudas de amor, solemos recurrir a un amigo. Creo que todos tenemos –o deberíamos tener– un amigo que sabe más del tema amoroso, o que tiene una increíble percepción acerca de las relaciones humanas y las cuestiones del alma. Es el amigo gurú. Así que cuando no entendemos lo que le pasa a la persona que nos gusta, recurrimos al amigo gurú, que nos cita en un café y nos pide que relatemos todo. Todo. Nosotros le contamos que conocimos a esta persona y que no sabemos qué siente, que creemos que gusta de nosotros, pero... “¡No, no, no!”, interrumpe nuestro amigo gurú. “No me digas lo que creés que pasa. Eso dejámelo a mí. Contame exactamente lo que pasó. Todo”. El amigo gurú

hace lo que haría un médico (después de todo, ¿no queremos una cura?). El médico no quiere que le digamos lo que nos parece que tenemos. “Doctor, creo que tengo una hernia de disco a nivel de L4, quizá con pinzamiento del nervio ciático”. “Eeh, gracias, señor (o señorita), pero le pediría que se limite a decirme qué siente; del diagnóstico me encargo yo”. Y si fuera un científico, nos diría: “Oh, por favor, ahorrame tus malditas conclusiones y dame los datos crudos”. Entonces nosotros procedemos a narrar con horripilante detalle todas las cosas que pasaron y no pasaron, las caras, las palabras, las entonaciones, los silencios, las miradas, los encuentros y los desencuentros. El amigo gurú reflexiona unos segundos, sonrío para un costado y dictamina. “Tiene miedo”, afirma. “¿Eh?”. “Tiene miedo. Dijiste que cortó muy mal con un novio/a anterior, que sufrió mucho, que está volviendo a empezar. Tiene miedo”. De repente, ¡zas!, todo tiene sentido. “Es verdad”, decimos mirando adentro de nuestra cabeza todos los detalles de nuevo, “tiene miedo”. De pronto la idea del miedo hace que todo encaje. Podemos mirar todo lo que pasó de nuevo, pero esta vez a través del cristal de esta nueva concepción del universo, y ahora, las cosas tienen un nuevo significado. Además, como si esto fuera poco, a partir de ese momento mágico con nuestro amigo gurú, en las últimas citas encontramos patrones que encajan perfectamente con la idea de “tiene miedo”. Y más aún: con la ayuda de nuestro amigo, ahora podemos predecir lo que la persona de nuestros anhelos va a hacer cuando nosotros actuemos de tal o cual forma. Obviamente el miedo de otra persona, como cualquiera de sus sentimientos, no es accesible a nuestra observación directa, sensorial (a menos que seamos telépatas). No podemos observar el miedo, pero podemos conjeturar que está ahí, lo imaginamos, y si todo encaja y tiene sentido cuando suponemos que existe, vamos a concluir que existe. Hemos podido acceder a un mundo invisible a través de nuestra imaginación y podemos constatar si la realidad se comporta de forma coherente con esta idea imaginaria. *Voilà!* Nuestro amigo gurú nos ha regalado una teoría acerca del comportamiento de la persona que nos gusta. Y la teoría es útil, es profunda y nos llena de la hermosa sensación de que hemos accedido a la realidad detrás de la realidad.

**Simplemente no te quiere**

Toda esta disquisición sobre el amor y las teorías científicas me lleva a recordar una película bastante mala, pero que no tiene desperdicio desde el punto de vista epistemológico. *Simplemente no te quiere*, dirigida por Ken Kwapis (2009) y protagonizada por varias estrellas de Hollywood, abre con una escena en una plaza en la que un nene le pega a una nena. Llorando, ella acude a su mamá, que le dice que el chico le pegó porque gusta de ella. Una voz en *off* nos dice que ese evento arruinó su vida puesto que, desde entonces, cada vez que un hombre la maltrata cree que es porque, en el fondo, gusta de ella.

Ya de adulta, la chica en cuestión (que se llama Gigi), se topa con Alex, quien, cual gurú, le explica que cuando un hombre no la llama, no es porque está estresado, de viaje o con la mamá enferma, sino simplemente porque no está interesado en ella. Gigi tiene toda suerte de ideas bizarras para explicar por qué los hombres se comportan como lo hacen con ella y Alex insiste en que todos esos comportamientos tienen explicaciones mucho más sencillas: basta con asumir que no están interesados y punto. Desde una perspectiva científica (o filosófica, para ser más exactos) lo que Alex propone es la navaja de Occam. Frente a un conjunto de fenómenos u observaciones, la explicación probablemente cierta, y por la que la ciencia debe optar, es siempre la más sencilla. Este es uno de los criterios para escoger entre dos teorías que compiten por explicar el mismo conjunto de datos. Gigi tiene teorías barrocas y Alex le propone que la realidad es seguramente más simple de lo que ella supone.

Pero la filosofía de las teorías científicas no termina ahí en este edulcorado *film* de sábado lluvioso. Resulta que Alex, que es el dueño de un bar y se las sabe todas, nunca, nunca se enamora, obviamente. *Too cool*. Hasta que por fin le toca. Lo interesante es cómo se da cuenta de que está enamorado. La escena es así. Tiene una reunión con todo el *staff* de su bar. Primero habla con un tal Tyrone y le dice que cuando cubra el horario de 4:00 a 6:00 ayude con las mesas. Tyrone le responde que hace 18 meses que él cubre la franja de 8:00 a 10:00. Entonces Alex se dirige a otro: “Luis, vos cubrís de 4:00 a 6:00”. Sus empleados le contestan que Luis renunció hace 10 meses. Ya algo enojado Alex se pregunta en voz alta si hay alguna razón para tener esa reunión; todos lo miran con cara de confusión y la reunión se desbanda. En ese instante, Alex le habla a su secretaria, que también es su amiga: “Kelli Ann, ¿me llamó alguien?”. Ella contesta: “No desde la última vez que me preguntaste, que fue hace 11 minutos”, y de pronto tiene una

revelación, lo mira y exclama: “Dios mío, ¿cómo se llama?”. “¿Quién?”, pregunta Alex. “¡La chica!”, dice ella. “No hay chica”, dice él. “Ah, pero yo sé”, dice ella. Y acá viene la parte epistemológica. Kelli Ann le da pruebas a Alex de lo que sucede, pruebas irrefutables: “No podés enfocarte, ¿no? Saltás cada vez que suena el teléfono. Chequeás tu *e-mail* cien veces por día. Te gustaría poder componer canciones. Sentís la necesidad de mencionar su nombre porque sí en cualquier conversación. Siempre es igual, y ahora te pasó a vos”. El rostro de Alex muestra que va comprendiendo lo que le sucede y, casi abatido, simplemente dice: “*Shit!*”. “Bienvenido a mi mundo”, le dice Kelli Ann.

Lo que de veras es gracioso de esta escena es que su estado emocional, el hecho de que está enamorado, le resulta invisible a Alex. Para la mayoría de las personas, los sentimientos propios son directamente observables (bueno, no siempre). Son los sentimientos de los otros los que nos resultan inaccesibles de manera directa, y por eso debemos recurrir a sus comportamientos y palabras y a la ayuda de nuestros amigos gurúes. Pero lo que pasa dentro de nosotros lo podemos ver. Para Alex esto no es así: no tiene el menor registro de lo que siente. Su amiga puede deducirlo a partir de sus comportamientos. Él no lo ve y es necesario que Kelli Ann le muestre cómo la idea de que él está enamorado es la mejor explicación posible de lo que le ocurre, es decir que es el modelo teórico que mejor acomoda todas sus pautas de comportamiento. Alex se rinde ante la evidencia –como buen científico– y acepta lo que le pasa, no porque lo vea, sino porque le da sentido a otro montón de observaciones.

En fin, estas últimas anécdotas amorosas quizá no sean prueba de que los cuerpos teóricos viven con nosotros todos los días. De hecho, los cuerpos teóricos son construcciones bastante sofisticadas. Pero, sin duda, se levantan sobre estructuras de pensamiento que nosotros usamos en ámbitos que no son la ciencia, como el amor. Y en todo caso nos sirven a modo ilustrativo para proyectar las características básicas de las construcciones teóricas sobre un plano más familiar, como puede ser estar enamorado y tratar de dilucidar una situación misteriosa en el mundo de los sentimientos.

## Palabras finales

Espero que quede claro, al final finalísimo de este recorrido, que las teorías son objetos preciosos, creaciones de orfebre que tienen costados inusitados y a veces delicados y difíciles de entender. Son, además, variadas y complejas. La buena noticia es que la realidad es aún mucho más enigmática, compleja, variada y difícil. Las teorías son justamente dispositivos mentales que nos simplifican la vida, que nos dan una visión más envolvente pero más sencilla de la realidad. En este libro miramos las teorías a través de ciertos prismas, con simplificaciones e idealizaciones que yo mismo impuse cuando elegí los relatos y también cómo contarlos. No lo hice con ánimo de distorsionar la realidad, sino en un esfuerzo por darle sentido a la multitud de cosas que pasan en la ciencia para generar ideas y tratar de entender el mundo. En otras palabras, al conversar de teorías científicas e intentar analizarlas, estamos generando una teoría sobre las teorías. Esto es lo que hacen los epistemólogos. Y como toda teoría, estas visiones sobre el quehacer de los científicos están idealizadas, simplificadas, no acomodan todos los casos, tienen agujeros y excepciones. Pero esta teoría es útil y quizá una descripción elegante del modo en que funcionan las cosas. Espero que, como las buenas teorías, les sirva a los lectores para realizar su propia lectura de la realidad, que descubran que con esta visión pueden acomodar nuevas observaciones en otros cuerpos teóricos e ideas científicas que no aparecen en este libro, que puedan incluso predecir qué tipo de estructuras encontrarán en otras teorías antes de haberlas visto. Espero, también, que hayan aprendido a convivir con la incerteza y algo de indeterminación para ganar en gran poder explicativo. Espero que las ideas de este libro, como pasa con las buenas teorías, les resulten bellas y los inciten a buscar más, a tratar de ponerlas a prueba, a encontrar confirmaciones y contraejemplos. Las teorías nos llevan a concepciones que escapan a nuestra primera vista, y nos invitan. Quizá la ciencia no se trate de otra cosa: de dejar lo que aparece a primera vista y darle otra mirada, y después otra. Espero que este libro los invite a nuevas miradas y que cuando lo vuelvan a leer, encuentren otra más.

## Referencias

- Adúriz-Bravo, A. (2005), *Una introducción a la naturaleza de la ciencia*, Buenos Aires, FCE.
- (2009), “La naturaleza de la ciencia ‘ambientada’ en la historia de la ciencia. Enseñanza de las ciencias”, número extra VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, Barcelona, pp. 1177-1180.
- Bao, L. y otros (2009a), “Learning and Scientific Reasoning”, *Science*, 323: 586-587.
- (2009b), “Learning of Content Knowledge and Development of Scientific Reasoning Ability. A Cross Culture Comparison”, *American Journal of Physics*, 77(12): 1118-1123.
- Beck-Winchatz, B. y R. Parra (2013), “Finding Out What They Really Think. Assessing Non-Science Majors’ Views of the Nature of Science”, *College Teaching*, 61(4): 131-137.
- Bybee R. y B. McCrae (2011), “Scientific Literacy and Student Attitudes. Perspectives from PISA 2006 Science”, *International Journal of Science Education*, 33(1): 7-26.
- Chalmers, A. (2008), *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?*, Madrid, Siglo XXI de España.
- Conant, J. B. (1948), *On Understanding Science. An Historical Approach*, New Haven, Yale University Press [ed. cast.: *La comprensión de la ciencia. Un famoso científico explica la ciencia y su misión actual*, Barcelona, Plaza & Janés, 1963].
- (1951), *Science and Common Sense*, New Haven, Yale University Press [ed. cast.: *La ciencia y el sentido común*, Buenos Aires, Kraft, 1953].

- (comp.) (1957), *Harvard Case Histories in Experimental Science*, Cambridge, Harvard University Press.
- Ding, L., X. Wei y K. Mollohan (2016), “Does Higher Education Improve Student Scientific Reasoning Skills?”, *International Journal of Science and Mathematics Education*, 14(4): 619-634.
- Duschl R. A., H. A. Schweingruber y A. Shouse (2007), *Taking Science to School. Learning and Teaching Science in Grades K-8*, Washington, National Academies Press.
- Duschl, R. A. y J. Osborne (2002), “Supporting and Promoting Argumentation Discourse in Science Education”, *Studies in Science Education*, 38(1): 39-72.
- EC (European Commission) (2007), *Science Education Now. A Renewed Pedagogy for the Future of Europe*, The Rocard Report, Bruselas, EC; disponible en [ec.europa.eu](http://ec.europa.eu).
- Egan, K. (1989), “Memory, Imagination and Learning. Connected by the Story”, *Phi Delta Kappan*, 70(6): 455-459.
- Furman, M. y M. Podestá (2009), *La aventura de enseñar ciencias naturales*, Buenos Aires, Aique.
- Gellon, G. (2008), “Historia de la ciencia. Un recurso para enseñar”, *El Monitor*, 16, disponible en [expedicionciencia.org.ar/wp-content/uploads/2015/06/Gellon-El-Monitor-Historia-de-la-ciencia.pdf](http://expedicionciencia.org.ar/wp-content/uploads/2015/06/Gellon-El-Monitor-Historia-de-la-ciencia.pdf).
- (2010), “Modelos teóricos en pugna. El caso Dalton vs. Gay-Lussac”, en L. Galagovsky (comp.), *Didáctica de las ciencias naturales. El caso de los modelos*, Buenos Aires, Lugar.
- Gellon, G., E. Rossenvasser Feher, M. Furman y D. Golombek (2018), *La ciencia en el aula. Lo que nos dice la ciencia sobre cómo enseñarla*, Buenos Aires, Siglo XXI.
- Harlen, W. y A. Qualter (2004), *The Teaching of Science in Primary Schools*, Londres, David Fulton Publishers.
- Hernández, C. A. (2005), “¿Qué son las ‘competencias científicas’?”, presentado en Foro Educativo Nacional, 11 de octubre, disponible en

[www.acofacien.org](http://www.acofacien.org).

Hoffmann, R. (2003), “Why Buy That Theory?”, *American Scientist*, 91:9-11.

Juvonen, N., Disco, M., Stroman, G. (prods.), Kwapis, K. (dir.) (2009), *He’s just not that into you*.

Kenealy, P. (1989), “Telling a Coherent ‘Story’. A Role for the History and Philosophy of Science in a Physical Science Course”, en D. E. Herget (comp.), *The History and Philosophy of Science in Science Teaching*, Proceedings of the First International Conference, pp. 209-220.

Kwapis, K. (dir.) (2009), *He’s just not that into you* [en cast.: *Simplemente no te quiere*].

Kind, P. y J. Osborne (2017), “Styles of Scientific Reasoning. A Cultural Rationale for Science Education?”, *Science Education*, 101(1): 8-31.

Klassen, S. (2009a), “The Construction and Analysis of a Science Story. A Proposed Methodology”, *Science and Education*, 18(3-4): 401-423.

— (2009b), “The Relation of Story Structure to a Model of Conceptual Change in Science Learning”, *Science and Education*, 19(3): 305-317.

Klimovsky, G. (2005), *Las desventuras del conocimiento científico. Una introducción a la epistemología*, Buenos Aires, AZ.

Klopfer, L. E. (1964), *History of Science Cases (HOSC)*, Chicago, Science Research Associates.

— (1969), “The Teaching of Science and the History of Science”, *Journal of Research in Science Teaching*, 6(1): 87-95.

Kolstoe, S. (2000), “Consensus Projects. Teaching Science for Citizenship”, *International Journal of Science Education*, 22(6): 645-664.

Kubli, F. (1999), “Historical Aspects in Physics Teaching. Using Galileo’s Work in a New Swiss Project”, *Science and Education*, 8(2):

137-150.

- Kuhn, D. (2010), "What is Scientific Thinking and How Does it Develop?", en U. Goswami (comp.), *Handbook of Childhood Cognitive Development*, Malden, Wiley Blackwell.
- Levinas, M. L. (2012), *Las imágenes del universo. Una historia de las ideas del cosmos*, Buenos Aires, Siglo XXI.
- Martin, B. E. y W. Brouwer (1991), "The Sharing of Personal Science and the Narrative Element in Science Education", *Science Education*, 75(6): 707-722.
- Matthews, M. R. (1994), *Science Teaching. The Role of History and Philosophy of Science*, Nueva York, Routledge.
- Minzi, A. (2018), "Aprender competencias científicas en la universidad: estudio de la incidencia de un curso cuatrimestral con enfoque en la indagación", tesis de maestría, Universidad de San Andrés.
- Monk, M. y J. Osborne (1996), "Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum: A Model for the Development of Pedagogy", *Science Education*, 81(4): 405-424.
- Saavedra, A. y V. Opfer (2012), "Teaching and Learning 21st Century Skills: Lessons from the Learning Sciences", *Phi Delta Kappan*, 94(2): 8-13.
- Stinner, A. (1992), "Contextual Teaching in Physics. From Science Stories to Large-Context Problems", *Alberta Journal of Science Education*, 26(1): 20-29.
- Wandersee, J. H. (1990), "On the Value and Use of the History of Science in Teaching Today's Science. Constructing Historical Vignettes", en D. E. Herget (comp.), *More History and Philosophy of Science in Science Teaching*, Tallahassee, Florida State University, pp. 278-283.
- (1992), "The Historicality of Cognition. Implications for Science Education Research", *Journal of Research in Science Teaching*, 29(4): 423-434.

Zimmerman, C. (2007), "The Development of Scientific Thinking Skills in Elementary and Middle School", *Developmental Review*, 27(2): 172-223.

# Créditos de las imágenes

**Figuras 1, 2, 5, 8, 13 y 16:** Ilustraciones de Elías Gellon-Maxon.

**Figura 3:** Fotografía de Sven Brinkhoff y Oona Schumacher.

**Figura 4:** Fotografía Archivos Federales Suizos, dominio público.

**Figuras 6, 11, 12:** Ilustraciones de Elías Gellon-Maxon y Gabriel Gellon.

**Figura 7:** Ilustración de Gabriel Gellon.

**Figura 9:** Template from Crick and Watson's DNA molecular model, 1953. Uploaded by Mrjohncummings. Science Museum London / Science and Society Picture Library.

**Figura 10:** Ilustración original de Galileo Galilei.

**Figura 14:** Ilustración original de Walther Flemming.

**Figura 15:** Karyotype of a human male. National Human Genome Research Institute. Wikimedia Commons.