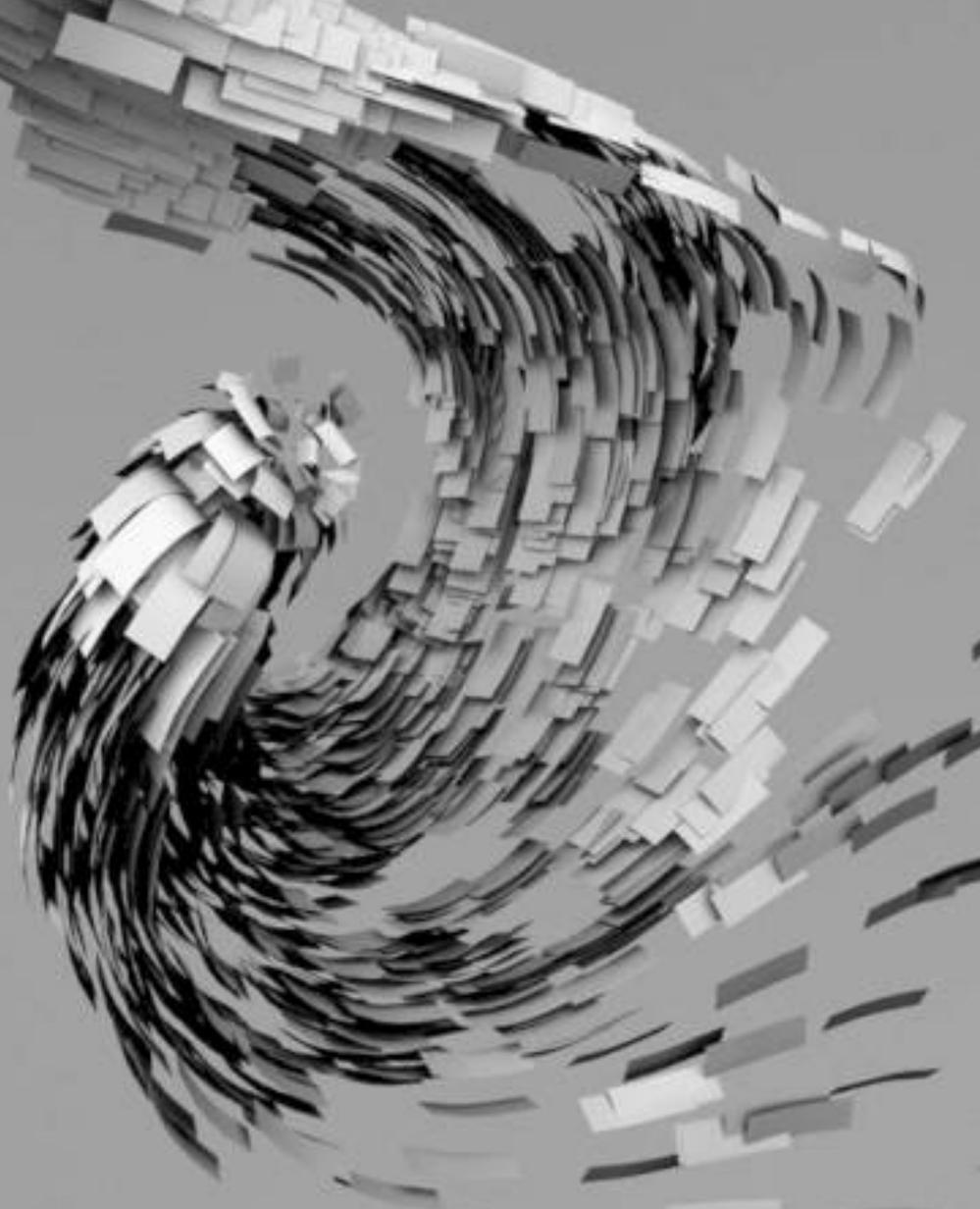


Fórmulas elegantes

Graham Farmelo (ed.)



METATEMAS

LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA

No cabe duda de que la ciencia desempeña un papel decisivo en nuestra cultura. Sin embargo, a menudo, las más iluminadoras teorías científicas tienen su fundamento en ecuaciones que, para muchos de nosotros, han sido siempre un coto vedado. Ya su aspecto se nos antoja un obstáculo insuperable a la hora de entenderlas, y han llegado a simbolizar el misterio y el miedo que inspira la ciencia moderna. *Fórmulas elegantes* intenta superar esta fractura presentando algunas de las grandes ecuaciones de la ciencia moderna al lector no especializado.

Para ello, Graham Farmelo ha reunido a un extraordinario equipo de científicos y divulgadores que han puesto todo su entusiasmo y habilidad en la tarea que les encomendó: desmenuzar y analizar, cada uno, una ecuación, explicando no sólo el significado de los términos y el alcance de la realidad que enuncian, sino también las circunstancias en que se concibieron. Así, *Fórmulas elegantes* consigue enseñar deleitando y abriarnos los ojos a la belleza e importancia de esas breves sucesiones de símbolos que resumen verdades eternas.

Graham Farmelo & Igor Aleksander & Peter Galison & Aisling
Fórmulas Irwin & Robert May & John Maynard Smith & Artur I. Miller &
elegantes Oliver Morton & Roger Penrose & Chistine Sutton & Steven
Weinberg & Frank Wilczek

NOTA DIETÉTICA

A falta de mejor criterio, he ordenado los ensayos según el orden cronológico de sus respectivas ecuaciones. Si el lector decide acometerlos en este orden, observará que el contenido en física es especialmente abundante en la primera mitad del libro. Si no le apetece esa dieta, le sugiero que olvide la cronología y satisfaga su apetito personal a capricho. No disfrutará menos, pues los ensayos fueron escritos para ser leídos de manera independiente.

Dicho esto, me gustaría agradecer a toda la plantilla de Granta Books el trabajo realizado para poner estos ensayos reunidos a disposición del lector. Quisiera dar especialmente las gracias a Sajidah Ahmad, Neil Belton, Louise Campbell, Angela Rose y Sarah Wasley, cuyas contribuciones excedieron los límites de sus cometidos editoriales.

Bon appétit
G. F.

Prefacio

Fórmulas elegantes

La ciencia es para los que aprenden; la
poesía, para los que saben.

Joseph Roux,
Meditaciones de un párroco, parte 1, n.º 71
(1886)

Durante una entrevista en la radio, concedida en mayo de 1974 para promocionar su colección *High Windows*, Philip Larkin decía que un buen poema es como una cebolla. Por fuera, ambos son agradablemente suaves y misteriosos y se van haciendo aún más suaves y misteriosos a medida que desprendemos sus sucesivas capas. Su ambición era crear la cebolla perfecta.

La poesía de la ciencia está contenida, en cierto modo, en las grandes ecuaciones y, como los ensayos de este libro demuestran, las ecuaciones también pueden ser *peladas*. Pero sus capas representan sus atributos y consecuencias, y no sus significados.

A pesar de los intentos de poetas y críticos literarios, nadie ha dado con una definición de poema que esté libre de controversia. No es el caso de los matemáticos cuando deben definir el término «ecuación». Una ecuación es, básicamente, la expresión de un equilibrio perfecto. Para los matemáticos puros —desconectados, normalmente, de la ciencia— una ecuación es una declaración abstracta, sin relación alguna con hechos concretos del mundo real. De modo que cuando esos matemáticos se enfrentan a una ecuación del tipo de $y = x + 1$, ven la x y la y como si fue-

ran símbolos totalmente abstractos y no representaciones de cosas que existen en la realidad.

Sería posible imaginar un universo en el que las ecuaciones matemáticas no tuvieran nada que ver con los fenómenos de la naturaleza. Lo curioso es que no es así. Los científicos plasman sistemáticamente sus leyes mediante ecuaciones en las que los símbolos representan magnitudes que los experimentadores pueden medir. Es precisamente esta representación simbólica lo que ha hecho de las ecuaciones matemáticas una de las armas más potentes del arsenal científico.

La más conocida de las ecuaciones científicas es $E = mc^2$, enunciada por primera vez por Einstein en 1905. Como muchas de las grandes ecuaciones, establece una igualdad entre cosas que, *a priori*, parecen ser por completo diferentes^[1] —energía, masa y la velocidad de la luz en el vacío—. Mediante esta ecuación, Einstein predecía que, dada una masa (m), si la multiplicamos dos veces por la velocidad de la luz en el vacío (representada por la letra c), el resultado es exactamente igual a su energía correspondiente (E). Como cualquier otra ecuación, $E = mc^2$ equilibra dos magnitudes como si se tratara de los brazos de una balanza, con el signo $=$ como punto de apoyo. Pero así como una balanza equilibra pesos, la mayoría de las ecuaciones equilibran otras magnitudes; $E = mc^2$, por ejemplo, equilibra energías. Nuestra celeberrima ecuación comenzó su andadura como una mera especulación einsteniana y sólo décadas más tarde pasó a formar parte del acervo científico, una vez los experimentadores constataron que estaba de acuerdo con las observaciones. Convertida en un tótem del siglo XX, $E = mc^2$ es hoy una de las pocas cosas sobre ciencia que cualquier participante en un concurso de televisión se supone que conoce.^[2]

Como todas las grandes ecuaciones científicas, $E = mc^2$ es, en muchos aspectos, similar a un poema. Al igual que

un buen soneto se echa a perder si cambiamos simplemente una palabra o un signo de puntuación, no cabe alterar lo más mínimo una ecuación como la citada sin convertirla en algo inútil. $E = 3mc^2$, por ejemplo, no tiene relación alguna con el comportamiento de la naturaleza.

Las grandes ecuaciones comparten también con la poesía cierta cualidad especial: la poesía es la forma del lenguaje más concisa y cargada de significado, del mismo modo que las grandes ecuaciones científicas son la forma más sucinta de expresar el aspecto de la realidad física que describen. $E = mc^2$ es enormemente potente: sus escasos símbolos concentran un conocimiento aplicable a toda conversión de energía, desde las que tienen lugar en las células de todos los seres vivos hasta las que se producen en una explosión cósmica lejana. Y lo que es más: al parecer, la ecuación lleva siendo válida desde el origen de los tiempos.

Del mismo modo que el estudio detallado de una gran ecuación lleva a los científicos a descubrir progresivamente cosas que no percibieron al principio, la repetida lectura de un buen poema desencadena invariablemente nuevas emociones y asociaciones. Las grandes ecuaciones suponen, para una mente dispuesta, un estímulo tan rico como la poesía. Y al igual que Shakespeare nunca pudo prever los múltiples significados que los lectores darían a «¿Debería compararte con un día de verano?» (soneto 18), Einstein no imaginó las miles de consecuencias que se derivarían de sus ecuaciones de la relatividad.

Sin embargo, existen grandes diferencias entre las ecuaciones científicas y la poesía. Un poema está escrito en un idioma concreto y pierde buena parte de su magia al ser traducido, mientras que una ecuación se expresa en el lenguaje universal de las matemáticas: $E = mc^2$ es lo mismo en inglés que en swahili. Por otra parte, los poetas buscan significados e interacciones múltiples entre palabras, en tanto

que los científicos tratan de que sus ecuaciones transmitan un significado lógico único.^[3]

El significado de una gran ecuación científica nos suele proporcionar lo que se denomina una ley de la naturaleza. Una famosa analogía debida al físico Richard Feynman sirve para clarificar esta relación entre ecuaciones y leyes.^[4] Imaginemos a alguien que presencia un juego que se desarrolla sobre un tablero de ajedrez. Si nadie le ha enseñado antes las reglas, podría tratar de deducirlas a partir de los movimientos de piezas que observa. Imaginemos ahora que los jugadores no están jugando su partida en un tablero de ajedrez normal, sino que mueven las piezas siguiendo un conjunto de reglas mucho más complicado y sobre un tablero con un número de casillas enorme. Para deducir las reglas del juego, el observador tendría que examinar partes de él de manera extraordinariamente cuidadosa, buscando pautas y reuniendo pistas repetitivas. Ése es, en esencia, el reto de los científicos. Los científicos observan de cerca la naturaleza —los movimientos de las piezas sobre el tablero—, tratando de descubrir sus leyes ocultas.

Decenas de pensadores se han rendido ante el enigma de por qué la mayoría de las leyes fundamentales de la naturaleza pueden ser expresadas mediante una simple ecuación. ¿Por qué cabe expresar tantas leyes como un imperativo absoluto, el que dos magnitudes aparentemente inconexas (las partes izquierda y derecha de la ecuación) sean exactamente iguales? En realidad, tampoco está claro por qué existen las leyes fundamentales.^[5] Según cierta afirmación popular, se debe a que Dios es matemático, una idea inútil que contesta a una cuestión profunda con una proposición imposible de verificar. Aun así, el designio divino ha sido, hasta no hace mucho, una explicación común para la eficacia de las ecuaciones científicas. Basta con ver la inscripción en el monumento a María Mitchell (1818-1889), la primera astrónoma profesional estadounidense, ubicado en

el Bronx Hall of Fame, seg6un la cual «Cada f6ormula que expresa una ley de la naturaleza es un himno de alabanza a Dios».

A6un m6as pol6emica que la procedencia de las ecuaciones cient6ficas es la cuesti6n de si 6stas son inventadas o descubiertas.^[6] El astrof6isico indoamericano Subrahmanyan Chandrasekhar hablaba por boca de los m6as grandes te6ricos cuando afirmaba que, cada vez que descubria un hecho nuevo o era presa de una nueva intuici6n, parecia ser algo «que siempre habia estado all6 y que 6l, simplemente, habia tenido la suerte de dar con ello». Bajo esta 6ptica, las ecuaciones que subyacen en los fen6menos del universo en cierto sentido «est6n ah6», ajenas a la humana existencia, de modo que los cient6ficos no ser6an sino arque6logos c6smicos que tratan de desenterrar unas leyes que han permanecido escondidas desde el principio de los tiempos. El origen de las leyes sigue siendo un completo misterio.

De los cientos de miles de investigadores que han poblado el mundo, muy pocos pueden presumir de que una ecuaci6n importante lleve su nombre. Dos cient6ficos particularmente expertos en el descubrimiento de ecuaciones fundamentales y notablemente conscientes del papel de las matem6ticas en la ciencia fueron Albert Einstein y el brillante f6isico te6rico brit6nico Paul Dirac. Sin que las matem6ticas fueran su especialidad, ambos destacaron por su habilidad para crear ecuaciones tan fecundas como los m6as grandes poemas. Y los dos tambi6n estaban convencidos de que las ecuaciones fundamentales de la ciencia ten6an que ser bellas.^[7]

La idea puede resultar extra6a. El concepto subjetivo de belleza es mal acogido en los c6rculos intelectuales y, desde luego, no tiene cabida en las cr6ticas acad6micas de arte.^[8] Sin embargo, la palabra acude autom6ticamente a nuestros labios —incluso a los de los cr6ticos m6as pedantes— cuando contemplamos la sonrisa de un ni6o, la imponente es-

tampa de una montaña o las exquisitas formas de una orquídea. ¿Qué queremos decir al afirmar que una ecuación es bella?^[9] Básicamente, que esa ecuación puede evocar en nosotros sensaciones similares a las que otras cosas que la mayoría de nosotros describimos como bellas producen. De manera similar a una gran obra de arte, una ecuación bella cuenta entre sus atributos mucho más que con el simple atractivo —poseerá universalidad, simplicidad, inevitabilidad y una especie de fuerza elemental—. Pensemos en obras maestras como *Manzanas y peras*, de Paul Cézanne, la cúpula geodésica de Buckminster Fuller, la interpretación de Lady Macbeth realizada por Judi Dench o la versión de Ella Fitzgerald de *Manhattan*. En mi primera contemplación de cada una de ellas sentí que estaba ante algo monumental en su concepción, fundamentalmente puro, libre de todo elemento inútil y ejecutado tan exquisitamente que su fuerza disminuiría si intentásemos cambiar cualquiera de sus atributos.

Una cualidad adicional de una gran ecuación científica es que posee una belleza útil. Ha de ajustarse a los resultados de todo experimento relevante y, además, predecir resultados de experimentos que nadie haya realizado aún. Este aspecto de la efectividad de una ecuación es semejante a la belleza de una máquina de precisión como la que imaginamos cuando en el filme de Stanley Kubrick *La chaqueta metálica* el recluta Gomer Pyle se pone a hablar de su rifle. El embrutecido *marine* alaba su meticulosa fabricación, deleitándose en las cualidades que lo hacen ideal para su letal propósito. No sería tan bello si no funcionase.

El concepto de belleza era especialmente importante para Einstein, el científico más preocupado por la estética de todo el siglo XX. Según su hijo mayor Hans, «Su carácter se parecía más al de un artista que al de un científico al uso. Por ejemplo, su mayor aspiración para una buena teoría no era que resultara correcta o exacta, sino que fuera

bella». En cierta ocasión, llegó a afirmar que «las únicas teorías físicas que estamos dispuestos a aceptar son las que resultan bellas», dando por supuesto que una buena teoría, a la postre, tenía que concordar con los experimentos. Dirac iba incluso más allá que Einstein en su convencimiento de que la belleza matemática era un criterio para establecer la calidad de una teoría fundamental,^[10] declarando que la cuestión era para él «una especie de religión». En los últimos años de su vida dedicó mucho tiempo a viajar alrededor del planeta y a dar conferencias sobre el origen de la gran ecuación que lleva su nombre, haciendo hincapié en que la búsqueda de la belleza había sido siempre su norte y una continua fuente de inspiración. Requerido para que expresara en pocas palabras su filosofía de la física durante un seminario dado en Moscú en 1955, escribió en letras mayúsculas sobre la pizarra: «Las leyes físicas han de ser matemáticamente bellas».

Para el resto de los mortales, ese esteticismo es un arduo e improductivo credo. El hecho es que, para la mayoría de los científicos, la belleza no es un concepto que les preocupe demasiado ni que les sirva de guía en su trabajo diario. Es cierto que las ecuaciones que usan poseen una belleza subyacente y las soluciones correctas de esas ecuaciones son más bellas que feas. Pero la belleza puede resultar engañosa. La ciencia está salpicada de restos de teorías que una vez parecieron bellas, pero que se demostró que estaban equivocadas —la naturaleza opinaba de otra manera—. A la hora de validar una nueva teoría, el criterio fundamental para la mayor parte de los científicos es comprobar que se ajusta a los experimentos.

La idea de que la ciencia avanza por medio de una combinación de experimentos y teoría basada en las matemáticas es relativamente moderna. Tuvo su origen en Florencia hace tan sólo trescientos cincuenta años —ayer, respecto a la historia de la raza humana—. Su progenitor fue Galileo, el primer científico moderno, quien observó que la ciencia

avanza mejor cuando trabaja sobre una estrecha franja de fen6omenos y asume que los resultados ser6an leyes que cabe describir mediante t6erminos matem6aticos precisos.^[11] El suyo fue uno de los m6as grandes y productivos descubrimientos de toda la historia de las ideas.

La ciencia se ha ido haciendo cada vez m6as matem6atica desde los tiempos de Galileo. Las ecuaciones son, actualmente, una herramienta cient6fica de primer orden y es casi un art6culo de fe para la mayor6a de los te6ricos —y, desde luego, para la mayor parte de los f6isicos— que existe una ecuaci6n fundamental que describe el fen6meno que est6n estudiando o que, alg6n d6a, alguien hallar6 la ecuaci6n id6nea. En cualquier caso, y tal como le gustaba decir a Feynman, podr6a resultar al final que las leyes fundamentales de la naturaleza no precisen ser expresadas mediante las matem6aticas, sino que se ajusten mejor a otros lenguajes, tales como las reglas que gobiernan una partida de ajedrez.

De momento parece que las ecuaciones son la manera m6as eficaz de expresar la mayor6a de las leyes cient6ficas fundamentales. Pero las ecuaciones no preocupan por igual a todos los cient6ficos, muchos de los cuales se las arreglan con las herramientas matem6aticas m6as rudimentarias. A este respecto, es muy ilustrativa una historieta en la que un matem6tico, un f6isico, un ingeniero y un bi6logo son preguntados por el valor num6rico de π . El matem6tico contesta secamente que «es igual a la circunferencia de un c6rculo dividida por su di6metro». El f6isico, en cambio, afirma que π vale «3,141593 m6as menos 0,000001». El ingeniero dice que vale «alrededor de 3» y, finalmente, el bi6logo pregunta: «¿Qu6 es π ?».

Por supuesto, se trata de un chiste. Algunos f6isicos tienen unos conocimientos matem6ticos escasos, algunos ingenieros aplican brillantemente las matem6aticas a la tecnolog6a y algunos bi6logos te6ricos son matem6ticos de primera. Pero, como toda caricatura, tiene una parte de verdad. Los ingenieros suelen tener un enfoque utilitario de las

matemáticas y le dan mucho valor a hacer buenas aproximaciones. Y, de entre todas las ciencias, la física es la más matemática y la biología, la menos. Desde los tiempos de Galileo, los físicos han tratado siempre de simplificar las cosas, subdividiendo las complejidades del mundo real en sus componentes más simples. Este reduccionismo no siempre es aplicable para los biólogos, cuyo objeto de estudio es el mundo vivo tan inmensamente complejo, con sus comunidades de organismos interrelacionados, cada uno de los cuales presenta una estructura enormemente compleja en términos moleculares. Y no olvidemos que la teoría biológica unificadora por excelencia es, en la superficie al menos, no matemática: *El origen de las especies*, el tratado en el que Darwin describe su teoría de la evolución mediante la selección natural, no contiene una sola ecuación. Lo mismo sucede con la teoría geológica de la deriva continental, en cuyos primeros trabajos (publicados poco después de la primera guerra mundial) no hallamos ecuación alguna.

Los ensayos de la presente colección reflejan la importancia de las matemáticas en las diferentes —aunque, a veces, solapadas— áreas de la ciencia a partir de 1900. La física está especialmente bien representada. Se analizan tres importantes aportaciones einstenianas (incluyendo $E = mc^2$ y la ecuación de la relatividad general) y otras grandes ecuaciones que han transformado nuestra visión del mundo subatómico. La ecuación de Dirac ocupa un lugar de honor: no sólo cumplió su misión de describir el comportamiento del electrón, sino que, inesperadamente, predijo la existencia misma de la antimateria: nada más y nada menos que la otra mitad del universo. No es extraño que el propio Dirac comentara: «Mi ecuación es más inteligente que yo».

Las ecuaciones de la física subatómica constituyen la base de lo que se denomina el «modelo estándar», un nombre demasiado prosaico para la teoría actual de las partículas fundamentales y sus interacciones (la cual, ironías del destino, deja fuera la fuerza más conocida de todas, la gra-

vedad). En el Ep6logo se contemplan juntas las ramas que han dado lugar al modelo, uno de los hitos intelectuales del siglo xx.

Dos de los ensayos echan un vistazo a sendas ecuaciones de la biolog6a moderna. El primero explica el modo en el que las ideas evolutivas pueden ser expresadas matem6ticamente, dando lugar a una perspectiva rica y diversa del mundo vivo, desde el comportamiento nupcial del ciervo rojo hasta la proporci6n entre machos y hembras en los avisperos. El segundo ensayo se refiere al denominado mapa cuadr6tico, una ecuaci6n enga6osamente simple de ecolog6a te6rica que puede ser utilizada para explicar las variaciones en la poblaci6n de peces en el estanque de un jard6n, la fluctuaci6n del n6mero de perdices en un coto de caza y una multitud de problemas similares. Esta ecuaci6n desempe6n6 un papel crucial en la historia de la teor6a del caos, pues result6 encarnar de forma notable el comportamiento ca6tico —es extremadamente sensible a las condiciones iniciales—. En buena parte, gracias a esta ecuaci6n —una ecuaci6n tan simple que los ni6os la pueden estudiar en la escuela— en la d6cada de 1970 los cient6ficos llegaron a la conclusi6n de que algunas ecuaciones que parecen predecir el futuro a partir de sucesos pasados son por completo inservibles para hacer tales predicciones, contrariamente a lo que la ciencia hab6a cre6do hasta entonces.

Otras dos ecuaciones incluidas en este volumen se refieren a las ciencias de la informaci6n y a la b6squeda de inteligencia extraterrestre. El primero de los ensayos contempla las ecuaciones debidas al decano de los te6ricos de la informaci6n, Claude Shannon, quien fue pionero en crear el aparato matem6tico que soporta lo que hoy conocemos como la revoluci6n de las comunicaciones. Las ecuaciones de Shannon son aplicables a cualquier tipo de transferencia de informaci6n, incluyendo Internet, la radio y la televisi6n.

La b6squeda de inteligencia extraterrestre (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence*, SETI) no parece un tema que

pueda dar lugar a una ecuación. ¿Cómo va a haber una ecuación para algo que quizá no exista? La respuesta es que la ecuación fundamental de SETI —creada por el astrónomo norteamericano Frank Drake— no efectúa predicciones; en lugar de ello, estructura nuestro modo de pensar sobre la probabilidad de que existan civilizaciones que se puedan comunicar con nosotros. Aunque no sea bella en el sentido de las de Dirac o Einstein, la fórmula de Drake ha aportado un poco de coherencia a un campo en el que la confusión abunda.

Los científicos no emplean sólo ecuaciones de tipo matemático. Los químicos, por ejemplo, usan ecuaciones que no están constituidas sólo por símbolos matemáticos, sino que incluyen letras que representan átomos, moléculas y sus parientes subatómicos. Muchas actividades industriales se basan en ecuaciones de esta clase, ecuaciones que describen interacciones cuyos detalles podemos inferir, pero que difícilmente podríamos observar a simple vista. Hemos recogido un conjunto especial de reacciones químicas en este libro, en representación de esta rama de la ciencia. Esas ecuaciones maravillosamente sencillas constituyeron la base para comprender las causas de la reducción de la capa de ozono, la presencia de compuestos químicos denominados CFC (clorofluorocarburos) en la atmósfera terrestre. A comienzos de la década de 1980, esas simples ecuaciones alertaron a la humanidad sobre el riesgo de una catástrofe ambiental.

Los autores de este libro son prestigiosos científicos, historiadores y escritores. Han analizado todas y cada una de las facetas de su ecuación —las capas de la cebolla de Larkin— y han puesto de relieve las más fascinantes, evitando en lo posible entrar en excesivo detalle matemático. El resultado es un conjunto único de reflexiones personales sobre algunas de las ecuaciones básicas de la ciencia moderna, unas ecuaciones que debido a su concisión, poten-

Graham Farmelo & Igor Aleksander & Peter Galison & Aisling
Fórmulas Irwin & Robert May & John Maynard Smith & Artur I. Miller &
elegantes Oliver Morton & Roger Penrose & Chistine Sutton & Steven
Weinberg & Frank Wilczek

cia y simplicidad fundamental pueden ser contempladas como auténtica poesía del siglo xx.

En mi colección de poesía, en la estantería que hay justo encima de mi mesa, se halla un ejemplar de *High Windows*. Lo leí por primera vez cuando era un bisoño estudiante de física subatómica y trataba a duras penas de entender sus ecuaciones fundamentales y de apreciar su belleza. La colección me la regaló un amigo, un estudiante de literatura inglesa seguidor de las ideas de Larkin, pocos días después de que fuera publicada. Su mensaje fue el mismo que quisiera transmitir ahora al lector: «Que le aprovechen las cebollas».

Graham Farmelo
Agosto de 2001