

---

D'ARCY WENTWORTH THOMPSON  
(1860-1948)

---

ALBERTO ALDAMA \*  
JOSÉ LUIS GUTIÉRREZ \*\*  
PEDRO MIRAMONTES \*  
FAUSTINO SÁNCHEZ GARDUÑO \*

---

ABSTRACT. The second day of May 2010 was 150 years since D'Arcy Wentworth Thompson was born. He was a universal man who combined mathematics and biology within a framework of erudite classical knowledge in order to develop lines of thought that can explain the origins and evolution of biological patterns. Unfortunately, this important anniversary went unnoticed for the majority of the scientific community. In this essay, we recall the highlights of his work, stress the relevance and validity of his proposals and pay tribute to a scientist undeservedly forgotten by the mainstream of the current evolutionary school.

---

KEY WORDS. Morphology, evolution, biomathematics, biophysics, living patterns, structuralism, development biology.

---

Nuestro propio estudio de la forma orgánica que llamaremos *morfología* como lo hacía Goethe, es sólo una parte de otra, más extensa, *ciencia de la forma*, encargada de estudiar las configuraciones adoptadas por la materia en todos los aspectos y condiciones; esto es, en el sentido más amplio posible, de las configuraciones que son *teóricamente imaginables*.

D'Arcy Wentworth Thompson<sup>1</sup>

Este 2010 se cumplen ciento cincuenta años del nacimiento del naturalista excepcional, cuyas contribuciones a la ciencia de la forma y originalidad de métodos y propuestas motiva la publicación de este ensayo.

Relativamente poco conocido fuera del ámbito de quienes hacen biología matemática o de los grupos de interesados en aplicar la herramienta de los sistemas dinámicos a los procesos de la vida y desarrollar investigación en el campo de los sistemas complejos, D'Arcy W. Thompson fue

---

\*Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. / \*\*Programa de Dinámica No lineal y Sistemas Complejos, Universidad Autónoma de la Ciudad de México. / correspondencia: pmv@ciencias.unam.mx

científico y erudito; matemático y estudioso de los clásicos griegos y latinos, y un humanista y polígrafo incansable. Autor, con todas estas prendas, de un tratado monumental sobre el crecimiento y la forma; obra —dice Stephen Jay Gould <sup>2</sup>— descrita “más allá de cualquier comparación” como “el trabajo literario más fino [que puede hallarse] en los anales de la ciencia... escrita en lengua inglesa” y considerada “uno de los muy escasos libros sobre temas científicos escrito en este siglo [el XX] que seguramente perdurará mientras persista nuestra frágil cultura”.

Descendiente de marinos escandinavos establecidos en las islas británicas en tiempos inmemoriales y que trocaron sus temibles *drakkars* <sup>3</sup> por los barcos mercantes amparados por la Cruz de San Andrés del emblema nacional de los escotos, D’Arcy Wentworth Thompson nació en Edimburgo, capital de Escocia, el 2 de mayo de 1860, y terminó su fecunda y larga vida en junio de 1948 en Saint Andrews, en el extremo noreste de la bahía de su ciudad natal.

En abril de 1821, el abuelo Thompson era patrón y capitán de un buque mercante —a la vez casa y hogar de su familia— a bordo del cual la señora Thompson dio a luz al padre de D’Arcy. El recién nacido llegó en medio de buenos augurios: según la bitácora, el tiempo se había despejado luego de sortear una tormenta al doblar el Cabo de Buena Esperanza y virar el rumbo a Calcuta.

En *Science and the Classics*, nuestro Thompson pregunta <sup>4</sup>: “¿cómo fue que ese pequeño marinero (su padre) —cuyos ancestros siempre habían sido navegantes— se hizo profesor de griego?” En la alocución dirigida a la *Classical Association at Cardiff* el 9 de abril de 1929, D’Arcy festeja el centenario del nacimiento de su padre <sup>5</sup> y manifiesta su gratitud filial, pues la educación de aquel tripulante nacido a bordo del buque de su abuelo, tan lejana de las artes de marear, permitió a D’Arcy hijo adquirir una esmerada educación en humanidades; dominar el griego y el latín desde muy joven y leer, en su lengua original, a los clásicos de la Antigüedad. Esa formación, su práctica como naturalista y el dominio de la matemática de su tiempo, lo hicieron un personaje único en el mundo académico: un estudioso capaz de transitar sin tropiezos entre la filosofía, las letras, la matemática, el arte y la zoología.

La madre de D’Arcy murió de parto de su único hijo y el pequeño creció y fue educado, desde los tres años, en Edimburgo por su abuelo materno Joseph Gamgee, médico veterinario; entretanto, el padre, el profesor de letras clásicas, trabajaba en el *Queen’s College* de Galway, en la costa occidental de Irlanda, donde recibía las frecuentes visitas de su vástago. Así, del progenitor hereda el amor a las humanidades; del abuelo materno, el amor a la naturaleza y la ciencia. Thompson, el zoólogo matemático, el naturalista erudito, deja constancia de su pasión por ambas <sup>6</sup>:

¡La ciencia, los clásicos! Con palabras llenas de sabiduría, la primera dice: “quien se alimente de mí no podrá saciarse y padecerá hambre”; los clásicos, a su vez, claman: “quienes abren de nuestra fuente, seguirán sedientos y no les bastará lo que beban”. Ambos, a la par y de continuo, nos hacen más curiosos y multiplican nuestros canales de navegación hacia la felicidad.

D'Arcy recibió educación formal básica en la Academia de Edimburgo y en la universidad de la misma ciudad inició la carrera de medicina; luego, en Inglaterra, estudió y se graduó como *Bachelor of Arts* en zoología por el Trinity College de Cambridge donde fue, durante un lapso muy breve, ayudante de laboratorio. En 1884 obtuvo una plaza de profesor en la Universidad de Dundee, en Escocia, y desde 1917 y hasta su muerte, ocupó la cátedra de historia natural en la de Saint Andrews.

En la nota necrológica de Cecil Clifford Dobell <sup>7</sup> en el *Obituary Notices of Fellows of the Royal Society of London*, se refiere a su “más antiguo y mejor amigo” en los siguientes términos: *Fratri carissimo D'Arcy Wentworth Thompson Scoto haec acta mortui batavi D.D.D. Editor Anglus animalculum Elephanti* y da fe de los siguientes reconocimientos recibidos por D'Arcy a lo largo de su vida:

Sir D'Arcy Wentworth Thompson, Kt. (created 1937), C.B.; M.A., Litt.D. (Cantab.); D.C.L. (Oxon.); Hon. D.Sc (Dublin, Witwaterstrand, Delhi); L.L.D. (Aberdeen, Edinburgh). F.R.S. (1916: Vice-president 1931-1933: Darwin Medallist 1946). President, Roy. Soc. Edinburg (1934-1939). President, Classical Association, 1929; Scottish Class. Assoc. 1935. Member of many other learned societies in Britain and overseas (France, Poland, Russia, U.S.A., etc.). Scientific Adviser, Fishery Board for Scotland (1898-1939). Biologist, classical scholar, mathematician, and man of letters.

De entre la maraña de abreviaturas destaca que D'Arcy fue Caballero de la Reina (Kt.), doctorado por las universidades de Cambridge ('cantabrigiensis'), Oxford ('oxoniensis') y de Aberdeen, con títulos *honoris causa* en Irlanda, Sudáfrica y la India. Miembro de la *Royal Society* y “muchas otras asociaciones de estudiosos en la Gran Bretaña y ultramar”. Sin duda, el máximo homenaje que le confiere es el de llamarlo “matemático y hombre de letras”.

Además, aunque no aparece como una de sus distinciones académicas o sociales, Thompson fue fundador de la Dundee Social Union <sup>8</sup> en la que impulsó la compra de propiedades en los barrios bajos de la ciudad para, luego de remozarlas, ponerlas a disposición como viviendas de las familias más pobres de Dundee.

Es difícil encontrar en la historia de la ciencia en los siglos XIX y XX a un personaje más culto y reconocido que D'Arcy Wentworth Thompson. No obstante (o quizá debido a) la originalidad de sus contribuciones al estudio

del crecimiento y la forma, su visión dinámica de la morfogénesis, su espíritu de físico aplicado al estudio de los seres vivos y su propuesta de matematizar para hacer de la biología —como quería Da Vinci<sup>9</sup>— una “verdadera ciencia”, fueron muy pocos los biólogos de su tiempo, sus contemporáneos, y aun de la segunda mitad del siglo pasado, los que lo siguieron.

El éxito de la síntesis del seleccionismo darwiniano y la genética mendeliana —que culminó en la Conferencia de Princeton<sup>10</sup> de 1947 y ha dominado desde entonces el desarrollo de la ciencia de la vida— tuvo como consecuencia el hacer a un lado las líneas de investigación ajenas al programa del neodarwinismo, y en particular, llevó al olvido la obra de nuestro naturalista, polígrafo, biólogo matemático y físico biólogo (ambos, *avant la lettre*). Obra inmensa, generosa, elegante, sugestiva y, al cabo, incomprendida tal vez porque se adelantó casi setenta años al nacimiento de una disciplina académica legítimamente llamada *biología teórica* en la que, desde principios generales y poderosos, fuese posible formalizar las leyes que, como en la física, den cuenta de qué ocurre en la materia viva sin pasmarse ante su inmensa variabilidad.

#### OBRA

La formación académica y las influencias familiares de D’Arcy Wentworth Thompson le permitieron hacerse de una amplia cultura universal; no es exagerado decir que sus intereses fueron tan amplios como los de las grandes personalidades del Renacimiento o de los científicos humanistas de la Italia del *Quattrocento* —precursoras y adelantadas de la revolución científica del siglo XVI y las luces del XVIII— como Leonardo da Vinci o Galileo Galilei. En ese entonces las limitaciones de la separación disciplinaria no habían caído sobre el conocimiento y, en la filosofía natural, se trataba de comprender el mundo de la materia en todas sus escalas y formas de organización: de la cosmología a la vida, y de ésta a la mecánica de las proporciones.

Su dominio del griego y el latín clásicos permitió que D’Arcy leyera muy joven *Los Elementos* de Euclides y la obra de los anatomistas hipocráticos; tradujera directamente de la versión latina la *Historia animalium* de Aristóteles, y elaborara un glosario en inglés de los nombres de las aves y los peces en griego clásico. Perdida en la oscuridad de los siglos, la forma en que los helenos llamaban a esos organismos, nombres inexistentes ya en la lengua de los griegos modernos, los originales fueron rastreados amorosamente por D’Arcy en los vocablos usados por los pescadores contemporáneos en ambas riberas del Adriático.

Poseedor de dos de los idiomas ancestrales de buena parte de las lenguas vivas europeas, Thompson aprendió además a expresarse con

pulcritud y elegancia en alemán, francés e italiano, y era capaz de hacerlo tanto verbalmente, en charlas y conferencias, como en los ensayos que publicó a lo largo de su vida en esos idiomas <sup>11</sup>. Esto le facilitó acceder a las corrientes continentales del pensamiento biológico, soslayadas en la Gran Bretaña y el mundo anglosajón luego de la publicación de *El origen de las especies*.

Así, Thompson pudo leer a Goethe, a los pensadores de la *Naturphilosophie*—discípulos, seguidores y contribuyentes de la revolución científica del naturalista, poeta y filósofo de Weimar— y a los morfólogos racionalistas <sup>12</sup>, mayormente ignorados en la historia de las ciencias de la vida y que deberían reconocerse, como lo hizo explícitamente el propio Darwin, como fuentes importantes para sostener las tesis de *El origen*.

Estudioso autodidacta de la física de su tiempo, sabedor del desarrollo creciente de las ecuaciones diferenciales como instrumento de representación de procesos dinámicos, D'Arcy reconoció en el “modo de pensar matemático” una herramienta indispensable para el estudio del crecimiento y la forma de los seres vivos. Vio ahí instrumental para descubrir y representar las limitaciones estructurales que, de una manera difícilmente comprensible para sus contemporáneos, indicaba cauces estrechos para la evolución biológica, restringida a hacer lo que buenamente puede mientras se sujete a la constelación de leyes físico químicas que rigen el universo entero.

Como se lee en el epígrafe, D'Arcy ve en la matemática la manera de encontrar principios generales característicos de “todas las configuraciones teóricamente imaginables”, lo que abre la posibilidad de superar la pasión por los detalles de los naturalistas—cuya tradición permea hoy todavía la enseñanza y la práctica de la investigación en biología— para, en su lugar, captar lo esencial en la forma, la estructura o el comportamiento de las cosas y descubrir cómo, por encima de los accidentes, hay formas y estructuras.

A lo largo de su vida, D'Arcy publicó más de trescientos ensayos, reportes y textos en campos tan distintos como sus propios intereses intelectuales <sup>13</sup>, a la vez profundos e integradores. Su *opus magnum* es el tratado *On Growth and Form*, texto cuya segunda edición <sup>14</sup> tiene una extensión de mil ciento dieciséis páginas, sin redundancia ni desperdicio, donde se compendian su trabajo de zoólogo—dotado con las mejores prendas del oficio: dedicación, delicadeza, minuciosidad, empecinamiento, agudeza— su filosofía de la naturaleza y su propuesta epistemológica sobre cómo interrogarla en el lenguaje de la matemática para descifrar los jeroglíficos que podemos encontrar aquí y allá cuando se la estudia.

Luego de reconocerlo como el primer anatomista “completamente moderno”, porque su concepción de las estructuras iba de la dimensión de lo molecular a la de lo directamente visible, y su pensamiento transitaba sin

dificultad entre la docena de órdenes de magnitud que hay entre ambas, Peter Medawar <sup>15</sup> escribió que D'Arcy estaba convencido de que las leyes de las ciencias físicas se aplican a los organismos y éstos no hacen cosa alguna que contravenga aquellas leyes y aclara, para distinguir la posición thompsoniana del reduccionismo <sup>16</sup>:

Algunas veces, estas proposiciones son tomadas como si se quisiera decir que la biología es o pronto será nada más que una súper física y química.

En realidad, no se trata en absoluto de proponer tal cosa. La biología tiene que ver con nociones que le son contextualmente peculiares: la herencia, el desarrollo, la sexualidad; la acción refleja, la memoria, el aprendizaje; la resistencia a las enfermedades y las propias enfermedades. Estas cosas son tan parte de la física y la química como podrían serlo la tasa de interés [respecto] del Banco Central o la Constitución [con relación a] el Reino Unido <sup>17</sup>.

Con una visión cercana a la de lo que hoy llamamos *teoría de los sistemas complejos* —donde se trata de andar el camino para comprender el todo desde las partes, sobre la base de que las interacciones de éstas dan lugar a propiedades que emergen del comportamiento colectivo pero no están en los elementos componentes— Medawar advierte:

Equivocamos la dirección del flujo del pensamiento [de D'Arcy] cuando [suponemos que trata de] “analizar” o “reducir” los fenómenos biológicos en términos de pura física o química. [El] empeño es hacer exactamente lo contrario: ensamblar, integrar o unir nuestra concepción del fenómeno desde nuestro conocimiento particular de sus componentes. Esto es lo que D'Arcy creía y es, también, lo que cree hoy casi cualquier biólogo moderno confiable: que este acto de integración es, de hecho, posible.

Medawar <sup>18</sup> señala también que:

D'Arcy Thompson fue acusado algunas veces de pensar demasiado como géometra por su determinación de ver regularidad simple ahí donde otra persona de pensamiento riguroso pero estrecho diría que tal regularidad no existe: las esferas que veía no eran completamente esféricas; los polígonos, no eran regulares; las transformaciones, insuficientemente ortogonales; la trabécula ósea <sup>19</sup> es una representación inadecuada de los pares de fuerzas de tensión y extensión en los huesos. Se trata de una historia vieja y manida y, al hallarla en este nuevo contexto, creo que [quienes criticaban así] a D'Arcy, estaban completamente equivocados.

Si bien Medawar reconoce que “se puede eximir a Thompson de la acusación de buscar la simplicidad a todo trance y sin razón”, juzga que del equipo formado por el físico, el matemático y el biólogo que escribió *On Growth and Form*, el más débil era el último, aunque esta valoración está

basada, a título de ejemplo, en un juicio notablemente extraño, por erróneo, del estudio de Thompson sobre la razón de cambio en el crecimiento orgánico (capítulo III: "The rate of growth", pp. 78-284) en el que "aun el hombre común podría ver cierta perversidad en el razonamiento", porque <sup>20</sup>

... [a pesar de que] la *norma* <sup>21</sup> del crecimiento biológico —el estándar respecto al cual deben referirse todos los casos reales...— es el del interés compuesto, llamado a veces crecimiento logarítmico o exponencial... D'Arcy prefiere tratar con la curva del crecimiento aritmético o del 'interés simple'; con la primera derivada, la razón de crecimiento y con la segunda derivada, la aceleración del crecimiento. [Y] este tratamiento no sólo le oculta mucho de lo que tiene importancia sino que lo lleva a atribuírsela a cosas de poco peso; por ejemplo, al momento de la vida en el cual la razón de crecimiento aritmético tiene un máximo, visto como un punto de inflexión de la curva integral.

Desde luego, si una magnitud crece aritméticamente, su curva integral no tiene puntos de inflexión; Medawar no sólo yerra en esto sino que le atribuye a Thompson algo que éste nunca hace. Como en cada uno de los temas que aborda, el capítulo III es un tratado dentro del tratado; en todo caso, el modelo más simplificado es el de "la norma" invocada por Medawar, el del crecimiento exponencial (malthusiano, en un contexto demográfico) que, por cierto, no es la mejor representación de un proceso real por el hecho patente de que, al menos en este mundo, todo es acotado y está sujeto a limitaciones.

En todo caso, en las doscientas páginas que Thompson dedica a esta discusión, considera los factores limitantes, analiza la dinámica y provee un dilatado paisaje de situaciones en el que precisamente "la norma" es insuficiente. Así, al considerar la razón de crecimiento, va del desarrollo prenatal al de los órganos; del de los árboles al de las ballenas; del de las hormonas al estacional, etcétera, y con todos ellos exhibe su extraordinario talento para superar los detalles e integrar una sola teoría matemática del proceso que le interesa. Heterodoxia, sí; pero difícilmente se podría hallar debilidad en un biólogo que ha escrito todo esto y siempre lo ha hecho bien.

Más todavía si se considera que, merced a su intensa vida profesional como biólogo de campo, muchas veces los datos en los que se apoyan las reflexiones de D'Arcy son de primera mano. Por ejemplo, fue asesor del *Scotland Fisheries Bureau* y viajó al Estrecho de Bering y las Islas Pribilof para estudiar la dinámica de poblaciones y la explotación comercial de las focas. Por cierto, como resultado de este viaje, en 1896 publica "Mission to the Behering Sea", donde, en medio de la frialdad que se espera de un reporte científico lleno de tablas de datos y estadísticas, el adusto profesor escocés es capaz de conmover a los lectores de nuestros días al referir la despiadada matanza de cachorros <sup>22</sup>:

El grupo de exterminio estaba formado por diecinueve hombres, tres de los cuales llevaban garrotes de madera de metro y medio de largo. Las focas eran retenidas a unos cuantos cientos de metros de la costa, y se les dejaba avanzar en grupos o manadas hacia el campo de exterminio entre el grupo principal y el mar. El capitán Webster, garrote en mano, señalaba a sus hombres las focas de cada manada que debían ser sacrificadas.

#### EVOLUCIÓN BIOLÓGICA Y RESTRICCIONES ESTRUCTURALES

El mundo, la naturaleza, el universo entero, son un hervidero de formas y colores, de patrones y estructuras. Hacia donde se dirija la mirada, se encuentran pautas geométricas con patrones discernibles que de ninguna manera pueden confundirse con el azar, pero tampoco con los cuerpos geométricos perfectos (esferas, cubos, círculos, etc.) que se aprenden en la escuela. Esta afirmación es igualmente válida tanto para el mundo vivo como para el inerte. La sola observación de tal diversidad de regularidades nos conduce a hacernos, entre otras, las siguientes preguntas: ¿por qué los vertebrados tienen simetría bilateral?, ¿por qué en el pelaje de los felinos sólo existen franjas y motas?, ¿por qué en algunos reptiles se dan transiciones en los patrones de coloración entre las que se incluyen franjas compuestas de motas en la cola, a sólo motas en el resto del cuerpo?

También en el universo inanimado la diversidad de patrones es pasmosa. Por ejemplo, las regularidades observadas en las dunas del desierto nos hablan de que la sola interacción del viento con la arena es capaz de formar ondas como si se tratase de un fluido. Asimismo, son sorprendentes los patrones de color en movimiento que surgen en algunas reacciones químicas donde, debido sólo a mecanismos internos, se forman frentes de concentración que viajan, y cuya geometría es perfectamente reconocible: círculos concéntricos, espirales, etcétera.

Este breve recuento de regularidades observables nos conduce a una pregunta de mayor profundidad: ¿cómo explicar estas maravillas? Hubo un tiempo en que todo lo existente se creía obra divina. Pero hasta en los tiempos de mayor fervor religioso, siempre hubo —y habrá— escépticos, gente desconfiada de las verdades oficiales. La curiosidad y la crítica, el ejercicio de la razón para dudar sistemáticamente y hacer posible la capacidad de juzgar, son características distintivas de la ciencia, y uno de sus quehaceres más relevantes es encontrar la explicación del origen de las cosas y de los procesos en el universo.

Con relación a la vida en la Tierra, la explicación universalmente aceptada es que la estructura y la función de los seres vivos son el resultado de un larguísimo proceso de transformación de unos seres relativamente simples en otros más complejos. A mediados del siglo XIX, Charles Darwin culminó la propuesta que filósofos y naturalistas habían elaborado duran-

te más de dos mil años, desde Anaximandro hasta Geoffroy Saint-Hilaire y Lamarck. En *Sobre el origen de las especies por medio de la selección natural*, Darwin aporta una cantidad impresionante de evidencia empírica que no deja lugar a dudas sobre la mutabilidad de los organismos que pueblan el planeta y propone un mecanismo que da cuenta de cómo ocurre la evolución biológica.

A partir de él, excepto paradójicamente en el mundo anglosajón, el tema de la transformación de las especies dejó de tratarse en el ámbito de las parroquias y se trasladó a las aulas universitarias y los centros de investigación científica. Tanto en la primera mitad del siglo pasado como después de la Conferencia de Princeton de 1947, en que se sintetizaron la genética mendeliana y el naturalismo darwiniano <sup>23</sup>, la biología maduró y creció hasta llegar a ser la ciencia que es hoy. A pesar de sus éxitos, hay todavía partes fundamentales del proceso evolutivo que no se han explicado satisfactoriamente. La que nos interesa aquí es el problema del origen de las formas vivas, y es donde el trabajo de D'Arcy Thompson propone aproximaciones interesantes y sugestivas.

En otro lado <sup>24</sup>, dos de nosotros hemos abordado detalladamente por qué las explicaciones basadas en el mecanismo de la selección natural son insuficientes para comprender cómo surgieron las arquitecturas esenciales de los seres vivos; no basta considerarlos como resultado de un proceso histórico de diversificación y adaptación que se remonta hasta el origen de la vida misma. Fueron entonces los naturalistas que se formaron apenas después de la publicación de *Sobre el origen*, como William Bateson (1861-1929) y el propio D'Arcy Thompson, quienes se percataron de esta deficiencia.

Bateson se formó en la primera escuela de morfología adaptacionista inaugurada en Gran Bretaña por Thomas Huxley, Ray Lankester y Francis Balfour, e hizo una tesis sobre la embriología del hemicordado marino *Balanoglossus* y halló, por las semejanzas con los urocordados de la clase *Ascidiae*, posibles ancestros invertebrados de los vertebrados. Debido a los excesos especulativos en muchas reconstrucciones filogenéticas, a partir de 1885 Bateson se distanció de los adaptacionistas y manifestó un escepticismo creciente con relación a lo que cien años después Stephen Jay Gould llamaría "leyendas adaptacionistas". Bateson se dedicó entonces al estudio de la variación; al doblar el siglo, se convirtió en el mayor popularizador de los descubrimientos que el monje agustino Gregor Mendel había hecho entre 1856 y 1863 en el jardín de su monasterio <sup>25</sup>, base de la teoría factorial de la herencia que, a la postre, resultó esencialmente válida y se convirtió en la base de la genética <sup>26</sup>. Su actitud es una muestra de las reservas de una generación de naturalistas insatisfechos respecto al empeño de los evolucionistas de la primera hora por hallar adaptaciones en todos los rasgos de los seres vivos <sup>27</sup>.

A su vez, D'Arcy Thompson asumió la crítica del adaptacionismo que había decepcionado a Bateson; en particular, en la última sección del capítulo XVI de *On Growth and Form* ("Sobre la forma y la eficiencia mecánica") considera el problema de la filogenia y argumenta sobre por qué se yerra al tratar de estudiar la evolución de los vertebrados siguiendo cambios en componentes aisladas de la estructura ósea. Así como las vigas, los tirantes, las trabes y los pilares que forman un puente no sirven para cruzar un río si no se establece entre ellos la disposición relativa y el juego de fuerzas que les da la estructura propia de los puentes, las vértebras, el fémur, el íleon, las falanges, las costillas... las casi doscientas componentes óseas distintas que tienen, por ejemplo, los primates, no son un esqueleto sino cuando están dispuestas con absoluta precisión y con los esfuerzos y las tensiones necesarias para ser la estructura básica de soporte del organismo. Así, los cambios adaptativos no pueden manifestarse sólo en este o aquel elemento en tanto implican cambios integrales, en cascada, observables en la distribución y el orden corporal en conjunto, pues de otro modo se puede perder la coordinación necesaria para su funcionamiento <sup>28</sup>.

Porque la vida implica tanto estructura como función y ambas son inseparables; quien la estudie debe hacer suya la observación clásica de Aristóteles: el todo es más que la suma de las partes, y Thompson lamenta que Darwin no tenga dificultad en hacer suya la doctrina de la independencia (evolutiva) de los caracteres aislados, pues en *On the Origin* dice <sup>29</sup>:

... la selección natural tenderá, en el largo plazo, a cambiar *cualquier parte* de la organización tan pronto como, al cambiar los hábitos, se vuelva superflua sin que esto genere... el mayor desarrollo de otra parte. Inversamente, la selección natural puede dar lugar al mayor desarrollo de un órgano sin requerir, como compensación necesaria, la reducción de alguna parte adyacente.

En la búsqueda de la superación de las limitantes de explicaciones filogenéticas basadas en esta separación de lo que, en partes, pierde su sentido estructural, Thompson reconoce el papel de la herencia como uno de los grandes factores biológicos, pero insiste en considerar las restricciones mecánicas y fisiológicas como determinantes mayores de los cambios en la forma y sostiene:

... Los ritmos profundos de crecimiento que, como me aventuro a pensar, son la base principal de la herencia morfológica, conllevan semejanzas de forma persistentes mientras no haya fuerzas en conflicto; no obstante, si el medio ambiente y los hábitos se alteran y un nuevo sistema de fuerzas trastoca partes de la fábrica... seguramente no tardará en manifestarse en notorios e inevitables cambios de forma. Y si esto es realmente así, implicará que las modificaciones de la forma tenderán a manifestarse no tanto en fenómenos pequeños y *aislados*... sino en un cambio lento, *general* y más o menos uniforme o graduado

expandido sobre distintas partes correlacionadas y que, a veces, se extiende sobre grandes porciones o sobre todo el cuerpo.

Con esto, Thompson explica los motivos para plantear —en el capítulo XVII y último de su tratado sobre el crecimiento y la forma— una de sus contribuciones más originales: la “teoría de las transformaciones o de la comparación de formas relacionadas”.

#### LA TEORÍA DE LAS TRANSFORMACIONES

La definición matemática de la forma posee la mayor precisión; permite describir los objetos de la manera más sucinta posible, y descubrir homologías e identidades que no son obvias. Más aún, la geometría permite hallar en la misma estática de la forma las relaciones dinámicas que le dieron origen y las nuevas configuraciones que podrían derivarse desde el estado actual, de manera que podemos ver el diagrama de las fuerzas en equilibrio y además podemos discernir la magnitud y dirección de las fuerzas necesarias para mudar una forma en otra. Sin embargo, este tránsito hacia la matemática de lo vivo, implica aceptar de antemano la pérdida del detalle <sup>30</sup>:

Por una u otra razón, hay muchas formas orgánicas que [todavía] no podemos describir matemáticamente... pero ya somos capaces de hacerlo con el contorno de la concha de un caracol, la torsión de un cuerno, el borde exterior de una hoja, la trama del esqueleto, las líneas de flujo de los peces y las aves o el delicado encaje de las alas de un insecto. Si bien, para lograrlo, debemos aprender a eliminar y descartar, como hace el matemático; a guardar en la mente el tipo y hacer a un lado el caso singular con todos sus accidentes; y a hallar, en este sacrificar, lo que importa poco para conservar lo que importa mucho, una de las excelentes características del método de la matemática.

Aplicar tal método permite, por ejemplo, hacer uso de la geometría analítica, plana o del espacio, para comparar formas relacionadas entre sí mediante la transformación continua de una en la otra. La idea puede rastrearse hasta la invención de la perspectiva y los estudios del grabador alemán Alberto Durero (1471-1528): una figura dibujada en el plano se deforma en otra cuando las coordenadas del original se transforman mediante una función que preserva las “relaciones de contigüidad” original pero puede cambiar los ángulos y las dimensiones relativas. La teoría de las transformaciones, sucintamente, consiste en lo siguiente: se coloca el dibujo de algún organismo sobre un plano cartesiano y éste se distorsiona de acuerdo con la regla de asociación de una función continua del plano en el plano. En la figura 1 se muestra como ejemplo una transformación lineal *del plano en el plano*.

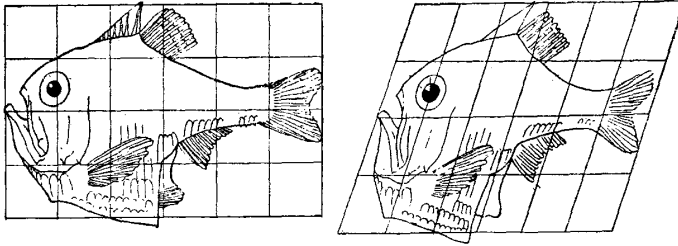


FIGURA 1  
El pez *Argyropelecus olfersii* se transforma en *Sternoptyx diaphana*.

La figura ofrece resultados notables, pero hay que interpretarla con cuidado, pues un ortodoxo de la teoría de la evolución por selección natural pudiera alegar que no hay relación de descendencia filogenética entre estas especies, y en esto tendría razón. Frente a esto, Thompson no pretende que la haya, simplemente establece que las diferentes estructuras del mundo vivo son variantes continuas de un plan arquitectónico (un *bauplan*).

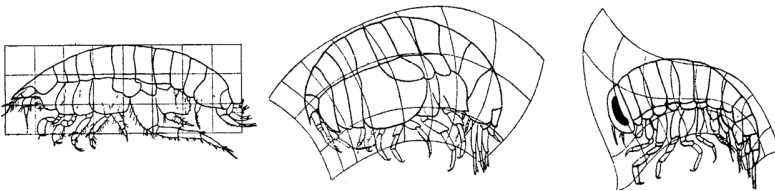


FIGURA 2  
*Harpinia plumosa*, *Stegocephalus inflatus* e *Hyperia galba*.

Todo esto permite llegar a una conclusión de la mayor importancia. Hay grupos de organismos para los que es imposible hallar una deformación continua de unos en otros: mientras que *Harpinia*, *Stegocephalus* e *Hyperia* se pueden transformar entre ellos, no hay manera de transformarlos en, digamos, el copépodo *Sapphirina*.

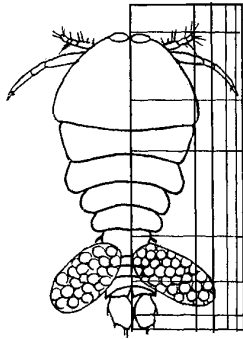


FIGURA 3  
*Sapphirina*.

Este hecho tiene mucha mayor relevancia de lo que parece a simple vista. La teoría de la evolución por selección natural se apoya fuertemente en dos postulados: que los organismos descienden con modificaciones de un ancestro común y, segundo, que las modificaciones morfológicas son graduales, acumulativas y, por así decirlo, continuas. A la luz de las transformaciones de Thompson, ambos postulados tienen que someterse a un escrutinio más cuidadoso. O bien los organismos no tienen un único ancestro común, o bien en la historia de la evolución se dieron cambios discontinuos en los planes esenciales de las formas vivas. Se vea como se vea, no hay manera de que dos de los postulados darwinianos se puedan sostener simultáneamente, pues son mutuamente excluyentes.

Thompson muestra cómo se aplica su teoría de las transformaciones para estudiar las relaciones en una veintena de casos, por lo demás suficientemente sugestivos de las posibilidades de extenderlo a muchos más, ubicados en muy distintos sitios del reino animal: las pezuñas de un bovino, un cordero y una jirafa; diferentes tipos faciales humanos en los estudios de Dureró; artrópodos de la subclase copépoda de distintos géneros; los caparazones de hasta seis variedades de cangrejo; los exoesqueletos de tres especies de distintas familias de amfípodos; la anatomía externa de pares de peces de distintas especies; estructuras óseas de distintos vertebrados; el hocico de tres especies de cocodrilos; la pelvis y los hombros de los dinosaurios, y los cráneos de mamíferos como el conejo, el tapir, el mandril, el caballo, el chimpancé y el ser humano.

Las transformaciones más simples son lineales; las otras, cuadráticas. Basado en ellas, Thompson discute las consecuencias taxonómicas y, al cabo, evolutivas de las clases de equivalencia que surgen cuando se agru-

pan los organismos en una misma clase si es posible transformar la forma de uno en la del otro <sup>31</sup>:

Después de haber transformado fácilmente nuestro diagrama coordinado del cráneo de un humano en el correspondiente diagrama de un simio o un mandril, se puede ir más allá y transformarlo en el de un perro con la misma facilidad y esto nos lleva a creer que los cráneos de cualesquiera dos mamíferos son transformables entre sí. Hay un algo, un algo esencial e indispensable, que es común a todos ellos, y que permanece *invariante* (como dicen los matemáticos). En estas transformaciones nuestras, cada punto puede cambiar de lugar, cada línea su curvatura, cada área su magnitud; pero, por otro lado, cada punto y cada línea siguen existiendo y preservan su orden y posición relativas a través de todas las distorsiones y transformaciones.

No obstante, aunque podríamos extender la invariancia al cráneo de cualquier vertebrado, no podríamos hacerlo con las estructuras homólogas de un insecto o un cefalópodo sin importar cuánto distorsionásemos el diagrama coordinado, porque son organismos esencialmente distintos y aparecieron en la historia de la vida recorriendo caminos filogenéticos independientes. La impronta de la eficiencia mecánica se manifiesta en toda la organización de cada forma viva.

La selección natural es un mecanismo omnipresente en la microevolución, pero los grandes cambios, por ejemplo, los que van de un *phylum* a otro en el reino animal —y son, por ello, responsables de la aparición de arquitecturas diferentes y no deformables una en otra— ocurren merced a las fuerzas de restricción y no se pueden explicar como resultado de la acumulación de cambios adaptativos diminutos; esto provee, según Thompson, una explicación más parsimoniosa y convincente que la de los adaptacionistas.

Más todavía, muestra un “principio de discontinuidad” incompatible con la idea del cambio gradual. Es significativo que *On Growth and Form* concluya así <sup>32</sup>:

Este [el principio de discontinuidad] no es un argumento opuesto a la evolución. Solamente sugiere que el parecido formal —que tomamos como guía confiable respecto de las afinidades entre los animales dentro de ciertos límites o grados de afinidad o cercanía— deja de servirnos porque, bajo ciertas circunstancias, deja de existir. Nuestras analogías geométricas son fuertes argumentos contrarios a la concepción de Darwin de [que la evolución ocurre merced a] variaciones interminables, pequeñas y continuas; ayudan a mostrar que los cambios discontinuos son una cosa natural, que las “mutaciones” (o cambios repentinos mayores o menores) deben ocurrir y dar lugar, una y otra vez, a nuevos “tipos”. Nuestro argumento indica, y aun prueba, como es de esperarse, que tales mutaciones —factibles sólo en unas, pocas y simples, líneas físico matemáticamente posibles— se repitan a sí mismas.

Uno de los programas de investigación más fecundos de la biología de nuestros días es el que, por su acrónimo en inglés, se llama *EvoDevo* o de la evolución y el desarrollo. Indudablemente, la herencia juega un papel fundamental en la preservación de las especies, porque lo igual engendra lo igual, pero la obra de D'Arcy Thompson y de muchos otros evolucionistas heterodoxos, como Brian Goodwin, Stuart Kauffman o Germinal Cocho, nos llevan hoy a rechazar la vieja idea de que todo esté escrito en el genotipo. Pensamos que la forma de los organismos resulta tanto de la información transmitida de una generación a la siguiente mediante el DNA, como de las restricciones que le impone al desarrollo la constelación de leyes físicas y químicas de las que no puede escapar organismo alguno.

De hecho, como en tantas otras cosas, D'Arcy W. Thompson se adelanta a su tiempo al considerar la emergencia de patrones espaciales, de estructuras geométricas discernibles en la naturaleza y, específicamente, en los seres vivos, como resultado de la dinámica de *autorganización* generada por los procesos físicos, internos y endógenos, propios de cada sistema. Por ello escribe <sup>33</sup>:

Tejido y célula, concha y hueso, hoja y flor, también son materia y, obedeciendo las leyes de la física, sus partes se mueven, se moldean, se ajustan. No hay excepciones a la regla: Dios siempre hace geometría. Los problemas de cómo se genera la forma son, en primera instancia, problemas matemáticos; los de su crecimiento, problemas físicos y el morfólogo es *ipso facto*, un estudioso de las ciencias físicas.

#### SEMEJANZAS CONCEPTUALES

Suele decirse que a pesar de la extraordinaria solidez de la obra de toda su vida, D'Arcy Thompson no hizo escuela. Tal vez esta afirmación sea cierta si el empeño por buscar a sus seguidores se restringe a quienes han hecho profesión de fe alrededor de las tesis del neodarwinismo. Para ellos, desde luego, Thompson es un *outsider*. Quizá esa corriente, por lo demás hegemónica hasta nuestros días, olvida que no hay nada más estéril que la uniformidad y que el conocimiento ha avanzado siempre merced a la controversia y el conflicto.

Con todo, el pensamiento thompsoniano crece y se multiplica; ha sido una presencia intelectual constante cuando estudiosos de muchas disciplinas se han planteado la posibilidad de establecer una disciplina académica que pueda llamarse legítimamente *biología teórica* <sup>34</sup> o cuando han abordado problemas de morfogénesis con el talante y el método de la física matemática propuesto por el zoólogo escocés.

Así, el destacado matemático y científico de la computación inglés, Alan Mathison Turing (1912-1954), en "The chemical basis of morphogenesis", plantea que su teoría propuesta no requiere más hipótesis que ciertas leyes físicas, de donde habrá de deducir los hechos morfogénicos. Con esto, sin

duda, se coloca en la línea del pensamiento de D'Arcy Thompson, según la cual, la explicación de la formación de patrones —de todos los patrones— hay que buscarla en los mecanismos físicos (en el sentido amplio de la palabra) subyacentes y no en otro lugar. De hecho, Turing precisa y propone que <sup>35</sup>:

... un sistema de sustancias químicas llamadas *morfógenos*, reaccionando y difundándose a través de un tejido, es adecuado para describir el principal fenómeno de la morfogénesis. Tal sistema, aunque puede, originalmente, ser muy homogéneo puede, más tarde, desarrollar un patrón o estructura debido a una inestabilidad del equilibrio homogéneo, disparada por una perturbación al azar.

La propuesta de Turing se plantea en términos de un sistema de dos ecuaciones diferenciales parciales no lineales de tipo *reacción y difusión* para el que es posible, mediante un análisis clásico, establecer las condiciones —tanto de la parte reactiva, como de la difusiva— para que se dispare el mecanismo que da origen a distribuciones de coloración conspicuas llamadas *patrones de Turing* <sup>36</sup>.

En 1994, el biólogo-matemático canadiense Brian Goodwin <sup>37</sup> publicó *How the Leopard Changed its Spots*, un libro donde podría insinuarse una polémica con el artículo del matemático escocés James D. Murray <sup>38</sup>, "How the leopard gets its spots". En éste, Murray popularizó parte de su trabajo sobre cómo operan los mecanismos de reacción-difusión asociados con la emergencia de patrones de coloración en el pelaje de algunos felinos; en aquél, Goodwin destaca el carácter cambiante de esas manchas. Ambos son, indudablemente, thompsonianos. Desde una visión de los sistemas complejos y la dinámica no lineal, el canadiense establece <sup>39</sup>:

La "nueva" biología, es la... de los sistemas complejos; [la que se] ocupa de la dinámica y de la emergencia del orden. Luego, todo en la biología cambia. En lugar de las metáforas de conflicto, competencia, genes egoístas, escalamiento de picos en los paisajes adaptativos... la evolución se ve como una danza. No tiene objetivo. Como Stephen Jay Gould dice [la evolución] "no tiene propósito, no avanza, no hay sentido de dirección. Es una danza a través del morfoespacio, el espacio de las formas de los organismos".

Los epígrafes de cada uno de los doce capítulos de los que consta *Life's Other Secret: The New Mathematics of the Living World* <sup>40</sup>—una de las obras del matemático británico Ian Stewart (1945-)— son citas de *On Growth and Form*. El primer secreto, dice Stewart, fue develado por Watson y Crick al descubrir la estructura de la molécula de DNA; el otro, es el que explica cómo emerge el orden, la estructura y la forma en todas las manifestaciones de la vida.

En 1998, a cincuenta años de la muerte de D'Arcy Thompson, tuvo lugar el congreso *On Growth and Form: Spatio-Temporal Patterning in Biology*, en la Universidad de Dundee. James D. Murray, Lewis Wolpert y Brian Goodwin constituyeron el comité científico y decidieron que el congreso se ocuparía de discutir la formación de patrones en biología del desarrollo, en sistemas de reacción-difusión, así como patrones y formas en morfometría. Peter Slater, quien, a la sazón ocupaba la cátedra que fue la de D'Arcy Thompson en el Departamento de Biología de la Universidad de Saint Andrews, fue el encargado del discurso inaugural.

Entonces, lejos de no haber hecho escuela, D'Arcy Thompson es considerado hoy como el iniciador de buena parte de los grandes temas de la ciencia de la vida del siglo XXI. La siguiente cita adelanta, por ejemplo, lo que hoy llamamos "clases de universalidad dinámica", en las cuales si las interacciones de las componentes de un sistema son las mismas, los patrones, las pautas, la forma que emerja de ellas, serán los mismos, independientemente de la naturaleza material de tales componentes <sup>41</sup>.

La morfología no es sólo el estudio de las cosas materiales y de sus formas, sino que tiene un aspecto dinámico bajo el cual se toman en cuenta, en términos de fuerzas, las acciones de la energía. Y bien vale la pena mencionar que, enfrentados con los hechos de la embriología o los fenómenos de la herencia, el lenguaje comúnmente usado por los libros parece darle demasiada importancia a los elementos materiales presentes, como si fueran las causas del desarrollo o de la transmisión de caracteres heredados. [Pero] La materia, por sí sola, no produce cosa alguna, no genera cambios, no hace nada.

Por supuesto, la materia es importante porque sin ella el universo no existe. Pero su papel es el de ser el sustrato de lo verdaderamente trascendente que son los *procesos*: partículas, genes o individuos tomados de uno en uno no bastan para explicar la maravillosa urdimbre de las acciones colectivas. Brian Goodwin explica esta idea como sigue:

El argumento es, simplemente, que en cualquier ciencia (física, química, biología), la composición molecular... no es suficiente para definir la forma. Se necesita, además, un entendimiento de los principios organizacionales que definen el orden en el espacio y el tiempo en el sistema estudiado, así como las condiciones iniciales y de frontera. Tal esquema teórico se conoce, en general, como "teorías de campo". En biología, estos principios se llaman "propiedades de campos morfogenéticos", y D'Arcy Thompson los ha descrito en términos de interacciones energéticas.

PARA TERMINAR

Finalmente, pedimos a los lectores que comparen las muchas citas de la obra de Thompson incluidas hasta aquí con las siguientes tres. La primera,

del artículo <sup>42</sup>, donde reflexiona sobre la visión de los griegos de los números irracionales:

La raíz cúbica de dos es otra historia. No podemos representarla mediante una fracción continuada ni como una serie de números puestos uno al lado del otro o en diagonal. Estoy casi seguro de que la importancia peculiar y el aire de misterio relacionado con el [así llamado] problema délico <sup>43</sup> surgió simplemente del hecho de que para calcular la raíz cúbica no se cuenta con recursos aritméticos como los que se utilizan para extraer, de forma fácil y precisa, una raíz cuadrada.

Y, más adelante, con relación a la biología:

El término técnico “exceso o defecto” es a veces utilizado, en especial por Aristóteles, con un sentido que evidentemente no es el aritmético, aunque es probable que sea más o menos análogo. Un solo ejemplo debe bastar. En el primer capítulo de la *Historia Animalium*, Aristóteles nos dice que, dentro de los límites de un *genus*, como un ave o un pez, la diferencia entre una forma o especie tiene una naturaleza de “exceso o defecto”; sus partes correspondientes difieren en cuanto a propiedad o accidente, o en cuanto al grado en el que están sujetos a tal o cual propiedad o accidente, o en número o en magnitud, en resumen, siempre, de alguna u otra manera, en la forma de exceso o defecto.

Por último, en un ensayo sobre la cosmología platónica <sup>44</sup>, donde como es su costumbre, cita y traduce directamente del griego:

Hay un pasaje de gran interés para el astrónomo y dificultad bien conocida para el estudioso de los clásicos en la alegoría de Platón de la visión de Er <sup>45</sup>, donde los espíritus contemplan los cielos, la tierra y todos los armoniosos movimientos del universo y miran los cuerpos celestes en sendos círculos concéntricos cuyas revoluciones se combinan para formar el círculo que gira alrededor del eje de la necesidad y la diosa sostiene el eje sobre su rodilla y da vuelta a la hebra que las moiras, dueñas del destino, enredan, desenredan y cortan.

¿Qué clase de persona tiene la capacidad de escribir sobre temas aparentemente tan lejanos? Sólo alguien poseedor de un espíritu verdadera y profundamente humanista. Hoy nos parece inconcebible que un solo individuo pueda desenvolverse con el aplomo y la gracia de Thompson en los terrenos del naturalismo, de la matemática y de la cultura y la filosofía griegas al mismo tiempo; esa es la esencia de la personalidad de D’Arcy y todo ello en una de las mejores prosas de la lengua inglesa.

## HERENCIA

Pese a lo profundo de sus ideas y a lo sólido de su obra, D'Arcy Wentworth Thompson no se cuenta entre los biólogos británicos más conocidos, estimados o famosos. En pocas palabras, su lugar en el *ranking* de la biología es muy bajo. Hay algunas posibles explicaciones. Podría ser que su personalidad, fuertemente estructuralista, haya sido hecha a un lado por la corriente británica, y mundial, de un funcionalismo a ratos acrítico. También puede ser que el gremio biológico lo desestime por buscar las explicaciones de los fenómenos biológicos en la física y, peor aún, en la matemática, traicionando desde el punto de vista de la ortodoxia, la larga tradición de buscar soluciones autocontenidas (“lo biológico se explica desde lo biológico”).

Podemos buscar las razones por las que D'Arcy ha sido relegado en relevancia, popularidad y fama, y puede verse en este hecho innegable: Una simple pesquisa en el “buscador” *Google* nos muestra que el número de entradas que tiene cae muy por debajo de las correspondientes a Alfred Russell Wallace, Julian Huxley, Thomas Huxley, John Maynard Smith, J.B.S. Haldane y, sin sorpresa de por medio, más de mil veces menos que las de Charles Darwin. La misma tendencia se puede comprobar analizando bases bibliográficas como el *PubMed*.

El caso es que D'Arcy Thompson ha sido condenado al ostracismo, aunque, como el hermano de Luis XIV, llegará el momento en que se le despoje de la máscara de hierro y recupere el honor que merece. Por el momento, es pertinente recordar las palabras de Ariel, el espíritu del aire que, bajo las órdenes del mago Próspero, provoca las tempestades —que dan el nombre a la obra de Shakespeare— y canta a Fernando, hijo del rey de Nápoles:

Tu padre, bajo la superficie del mar, a cinco brazas;  
de sus huesos está hecho el coral;  
aquellos que fueran sus ojos son perlas ahora:  
nada de él se desvanecerá  
sino que sufrirá un cambio marino  
y se convertirá en algo brillante y extraño <sup>46</sup>...

Nunca imaginó el bardo de Stratford que, siglos después, estos versos constituirían el mejor elogio a D'Arcy Thompson. ¿Qué mejor fortuna para aquél que yace olvidado en el fondo del mar que sus restos se transformen en joyas valiosas y, mejor aún, que su recuerdo tenga el mismo poder y valor que lo rico y misterioso que espontáneamente se aparta de lo mediocre?

- 1 D'Arcy Thompson, (1942). *On Growth and Form*. Cambridge University Press. p. 1026. Reproducido en 1992 por Dover Publications Inc.
- 2 Véase: Gould, Stephen Jay (1971). "D'Arcy Thompson and the Science of Form", *New Literary History*, Vol. 2, Num. 2. *Form and its Alternatives*, pp. 229-258
- 3 Naves vikingas de guerra, *dragones* en islandés.
- 4 D'Arcy Thompson, (1940). *Science and the Classics*. Oxford University Press, pp. 1-36.
- 5 Cuyo nombre también era D'Arcy Wentworth Thompson. D'Arcy padre se formó en Cambridge; fue director de estudios clásicos de la Academia de Edimburgo y, luego, profesor de griego en Irlanda; en 1859 se casó con Fanny Gamgee.
- 6 Ibid. "The one says (in Wisdom's words): They that eat of me shall yet be hungry. And the other says: They that drink of me shall be thirsty. And both alike continually enlarge our curiosity, and multiply our inlets to happiness."
- 7 Biólogo inglés. Vivió de 1886 a 1949 y se recuerda por sus contribuciones al estudio de los protozoarios intestinales del ser humano y la historia del ciclo vital de la *Endameba histolytica* en condiciones de cultivo, fue autor de una biografía del inventor del microscopio Antoni van Leewenhoek.
- 8 La *Christian Social Union* fue una organización, dentro de la Iglesia Anglicana, dedicada a estudiar de las condiciones y remediar las injusticias sociales que floreció en la Gran Bretaña a fines del siglo XIX y principios del XX.
- 9 *Nessuna humana investigazione si può dimandare vera scienza s'essa non passa per le matematiche dimostrazione*. L. Da Vinci. *Trattato della Pittura*. La obra completa está disponible en la internet.
- 10 Véase: Cocho Gil, Germinal (2002). "Ernst Mayr, la Conferencia de Princeton y una nueva visión del azar y la necesidad", en *Clásicos de la biología matemática*. Siglo XXI-CEIICH-UNAM. México.
- 11 Véase: Bushnell, George H. (1945). "A List of the Published Writings of D'Arcy Wentworth", Thompson en *Essays on Growth and Form. Presented to D'Arcy Wentworth Thompson*. (Le Gros Clark, W.E. y P.B. Medawar, Eds.) Oxford, Clarendon Press, pp. 386-400.
- 12 Sobre la influencia de los morfólogos racionalistas —maestros y creadores de la anatomía comparada— en la visión de D'Arcy Thompson, puede verse Miramontes P. y J. L. Gutiérrez (2002): "El problema de la generación de las formas vivas: De Geoffroy Saint-Hilaire a D'Arcy Thompson", en *Clásicos de la biología matemática*. México, CEIICH UNAM-Siglo XXI. México, pp. 47-66, *passim*.
- 13 Véase: Bushnell, George H., op. cit.
- 14 La primera se publicó en 1917 y constaba, aproximadamente, de ochocientas páginas. Corregida y aumentada, la segunda edición es de 1942; el autor se refiere a las fechas de ambas publicaciones en la "Nota introductoria": "Escribí este libro en tiempo de guerra y su revisión me ha mantenido ocupado durante otra guerra. Me dio solaz y empleo cuando la posibilidad del servicio militar me había dejado atrás debido a mi edad".
- 15 Peter Brian Medawar (1915-1987), zoólogo e inmunólogo educado en Oxford, nació en Petrópolis, Brasil; de madre británica y padre libanés, compartió con Frank Macfarlane Burnet en 1960 el Premio Nóbel de Medicina o Fisiología por su descubrimiento de la tolerancia inmunológica adquirida.

- 16 Véase: Medawar, Peter B. (1982), "D'Arcy Thompson on *Form and Growth*", en *Pluto's Republic*, Oxford Univerity Press, pp. 228-241.
- 17 Idem, p. 235.
- 18 Idem, p. 236.
- 19 Resultante de la osificación intramembranosa, consistente en pequeñas traves o vigas de colágeno que se intercalan para darle fuerza o rigidez a los huesos.
- 20 Medawar, Peter B., op. cit., p. 237.
- 21 Subrayado en el original.
- 22 Véase la p. 28 de Thompson, D'arcy W. (1987), "Mission to the Behring Sea", en *Her Majesty Stationery Office*. Londres. Harrison & Sons.
- 23 Véase Cocho, G. (2002), op. cit.
- 24 Véase Miramontes, P. y J.L. Gutiérrez (2004), op. cit.
- 25 Un recuento de los motivos de Mendel y las consecuencias inmediatas de su trabajo en la comprensión de cómo se preservan o cambian las características hereditarias puede hallarse en Gutiérrez, José Luis (2002), "Las leyes de Mendel y la ley del equilibrio génico de Hardy-Weinberg" en *Biología matemática. Una mirada desde los sistemas dinámicos*. (L. Esteva y M. Falconi, compiladores). México, Las prensas de Ciencias, FC-UNAM. México.
- 26 De hecho, a William Bateson se le reconoce haber sido la primera persona en usar el término "genética" para referirse al estudio de la herencia biológica.
- 27 Thompson previó que expresiones como "variación azarosa" y "sobrevivencia del más apto" se convertirían, andando el tiempo, en "causas perfectas" para, en manos de "inquisidores severos y diligentes", estorbar y prejulgar futuros descubrimientos.
- 28 Al cabo, sobre la base de consideraciones de este tipo, los morfólogos racionalistas, como Goethe y Geoffroy Saint-Hilaire, habían establecido, a fines del XVIII, las leyes de compensación y del contrapeso de crecimiento de la anatomía comparada, ciencia fundamental de la paleontología y, con certeza, de muchas de las observaciones clave del propio Charles Darwin en *Sobre el origen de las especies*.
- 29 La cita y el subrayado es de Thompson, quien refiere al lector a la p. 118 de la 6a. edición de *On the Origin*.
- 30 Véase *On Growth and Form*, pp. 1031-1032.
- 31 Ibid, pp. 1085-1086.
- 32 Ibid, pp. 1094-95.
- 33 Ibid, p. 10.
- 34 Véase Gutiérrez, José Luis (2002), "Conrad Hal Waddington, René Thom y la biología teórica", en *Clásicos de la biología matemática*. (Miramontes, P.; F. Sánchez Garduño y J.L. Gutiérrez, Eds.). México, CEIICH-UNAM, Siglo XXI. México.
- 35 A. M. Turing (1952), "The chemical basis of morphogenesis," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Series B, 237, pp. 37-72.
- 36 Éstos se originan a partir de un punto en el espacio de las concentraciones de las sustancias reaccionantes, el cual es estable ante perturbaciones temporales pero inestable ante perturbaciones espacio-temporales. Los detalles del análisis pueden verse en J. D. Murray (2007), *Mathematical Biology*. Springer-Verlag.
- 37 Brian Goodwin (1931-2009) fue biólogo por la universidad canadiense de McGill y se doctoró en matemáticas en la Universidad de Edimburgo.
- 38 James D. Murray (1931) se educó, precisamente, en la Universidad de Saint Andrews.

- 39 En su libro *How the Leopard Changed its Spots* (WeindelInfel & Nicholson, London, 1994), Brian Goodwin hace una revisión de los puntos de vista discordantes sostenidos por Darwin y Thompson respecto a la explicación de la emergencia de formas en los seres vivos.
- 40 John Wiley & Sons, 1999.
- 41 *On Growth and Form*, p. 19.
- 42 Thompson, D'Arcy Wentworth (1929), "Excess and defect; or the little more and the little less" in *Mind*, New Series, vol. 38, num. 149 (Jan., 1929), pp. 43-55.
- 43 Es decir, de la duplicación del cubo. El problema debe este nombre a una leyenda, según la cual los ciudadanos de Delos habrían consultado al oráculo de Delfos para saber cómo deshacerse de una plaga enviada por Apolo. El oráculo respondió que debían duplicar el tamaño del altar de Apolo, que era un cubo regular.
- 44 Thompson, D'Arcy W. (1910), "On Plato's 'Theory of Planets', Republic X. 616 E", en *The Classical Review*, Vol. 24, Número 5 (August, 1910), pp. 137-142.
- 45 Er es un lugar mítico, cuya leyenda presenta Platón al final de *La República* y que incluye su visión del cosmos y la vida después de la muerte.
- 46 *Full fathom five thy father lies;/ Of his bones are coral made;/ Those are pearls that were his eyes:/ Nothing of him that doth fade/ But doth suffer a sea-change/ Into something rich and strange.*