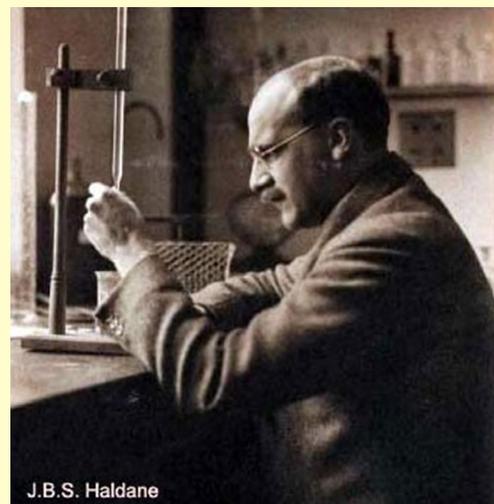
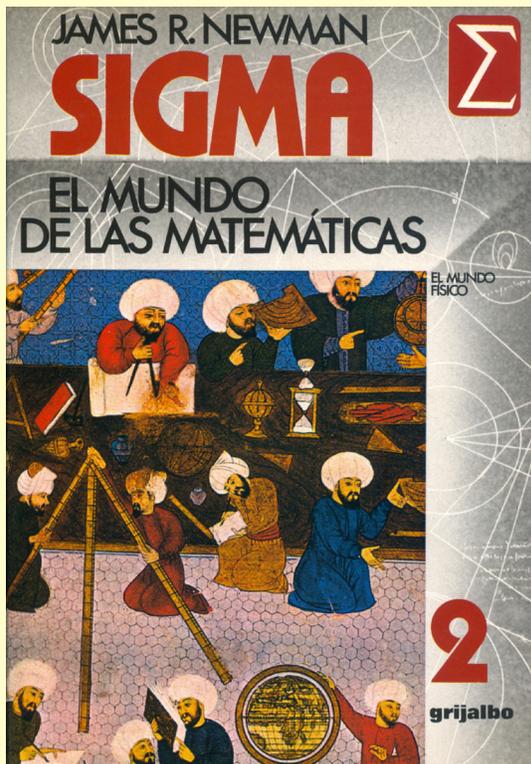




Leyendo a...

EL tamaño adecuado de J. B. S. Haldane



J.B.S. Haldane

El tema de este artículo se extrajo del libro Sigma: El mundo de las matemáticas, una monumental publicación de 6 tomos con recopilaciones de obras matemáticas presentadas y comentadas por James R. Newman, elegidas y ordenadas de tal manera que permitieran mostrar la evolución histórica y la relación de las matemáticas con las más diversas ciencias. El segundo tomo, "Las matemáticas y el mundo físico", constituye una antología de diversas obras de autores como Galileo, Bernoulli, Bragg, Schrödinger, Heisenberg y Eddington, por nombrar solo algunos.

Eureka, Enseñanza de las Ciencias Físicas, diciembre 2014

2



LAS MATEMATICAS Y EL MUNDO FISICO

La Matemática del Movimiento, por Galileo Galilei
 Teoría cinética de los gases, por Daniel Bernoulli
 La longitud, por Lloyd A. Brown
 John Couch Adams y el descubrimiento de Neptuno,
 por Sir Harold Spencer Jones
 Números atómicos, por H. G. J. Moseley
 Los rayos Röntgen, por William Bragg
 Los cristales y el futuro de la física, por P. Le Corbeiller
 ¿Qué es el cálculo de variaciones y cuáles son sus aplicaciones?,
 por Menger
 Las burbujas de jabón, por C. Vernon Boys
 El problema de Plateau, por Courant y Robbins
 Ley periódica de los elementos químicos, por Mendeléief
 Mendeléief, por Bernard Jaffe
 Matemáticas de la herencia, por Mendel
 El tamaño adecuado, por J. B. S. Haldane
 Matemática de la selección natural, por J. B. S. Haldane
 La herencia y la teoría cuántica, por E. Schrödinger
 Sobre la magnitud, por W. Thompson
 El principio de incertidumbre, por Werner Heisenberg
 Causalidad y mecánica ondulatoria, por E. Schrödinger
 Las constantes de la Naturaleza, por Eddington

También, en el segundo tomo se presentan obras en que se relacionan las matemáticas con la química y la biología, tales como "Ley periódica de los elementos químicos" de D. Mendeléief, "Matemáticas de la herencia" de G. Mendel, "El tamaño adecuado" y "Matemáticas de la selección natural" de J.B.S. Haldane. De este último autor se reproduce completo el clásico artículo de 1928 "El tamaño adecuado", en el que el biólogo y genetista Haldane estudia lo que acontece cuando se cambia el tamaño de las estructuras realizadas por el hombre y la naturaleza.

La temática de este artículo se aborda muy poco en los textos de Física. Entre una de las excepciones podemos recordar el capítulo 4 del texto Física del Physical Science Study Committee (PSSC), de la década de los años sesenta del siglo XX, la sección 4.5 que tenía por título "Escalas - La Física de Liliput". Entre los recursos audiovisuales del PSSC estaba una película clásica acerca del tema de esta sección, que tenía por título "Cambios de escala", que abordaba asuntos tratados en el cine como la imposible existencia de un gorila del tamaño de King Kong, entre otros temas de cambios de escalas. Esto tiene relación también con la eventual existencia de animales y personas de tamaños colosales que son mostrados en el cine de ciencia - ficción y que el estudio de este artículo y otros indican que es imposible su existencia desde un punto de vista físico.



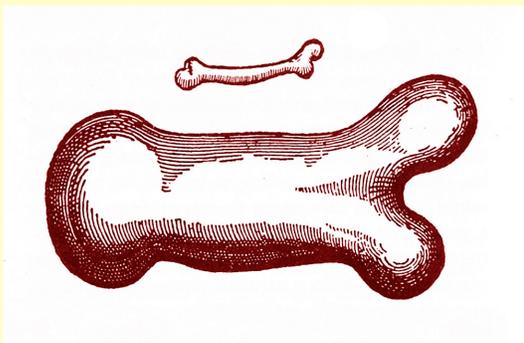
Tomos de **Sigma: El mundo de las matemáticas**.

Se invita al lector a deleitarse con la lectura de este artículo y seguir profundizando en el tema, puesto que las referencias bibliográficas que se citan al final de este artículo indican lo interesante y la importancia para el mundo biológico. En la edición de este artículo en el libro Sigma: El mundo de las matemáticas, antecede un extracto de una obra de Galileo Galilei, en la que comenta, ya en su época, acerca de este tema y la cita es la siguiente:

"De lo que ya se ha demostrado, pueden ver claramente la imposibilidad de incrementar el tamaño de las construcciones del arte o de la naturaleza hasta alcanzar dimensiones infinitas. Análogamente, pueden ver la imposibilidad de construir buques, palacios o templos de enormes proporciones de manera que sus remos, patios, vigas piezas de hierro y, en resumen, todas las partes restantes se mantengan juntas. Ni la naturaleza puede producir árboles de extraordinario tamaño, porque las ramas se romperían bajo su propio peso. Así, también sería imposible reforzar las estructuras óseas de los hombres, de los caballos y de los otros animales de manera que se mantuvieran juntas y cumplieran sus funciones normales si estos animales tuvieran que incrementar enormemente su altura; ya que este incremento de altura se conseguiría solamente empleando un material mucho más duro y fuerte que el usual, o agrandando el tamaño de los huesos y cambiando, de esta manera, su figura hasta que la forma y apariencias de los animales sugiriera una monstruosidad. Quizás esto es lo que pensaba nuestro docto poeta cuando al describir un enorme gigante dice:

*Es imposible calcular su altura.
De modo que su tamaño rebasa cualquier medida."*

Galileo Galilei



Dibujo de Galileo como ejemplo de escala.

El tamaño adecuado

Las diferencias más evidentes entre los distintos animales son de tamaño, pero por alguna razón los zoólogos han dedicado poca atención a ellas. En un extenso tratado de zoología que tengo ante mí no encuentro ninguna indicación de que el águila sea más grande que el gorrión, o que el hipopótamo sea más gordo que la liebre, aunque se hacen algunas admisiones a regañadientes en el caso del ratón y la ballena. Pero, aún así, es fácil demostrar que una liebre no podría ser tan grande como un hipopótamo, o una ballena tan pequeña como un arenque. Para cada tipo de animal existe el tamaño más conveniente, y un cambio de tamaño importante acarrearía inevitablemente un cambio de forma.

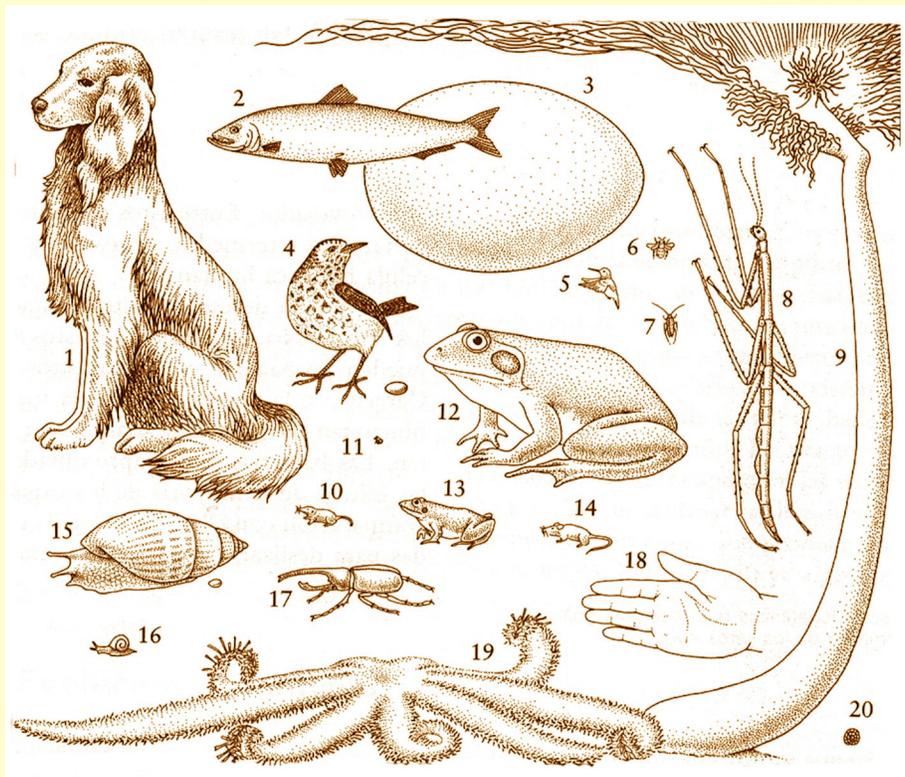
Tomemos el más obvio de todos los casos posibles, y consideremos un hombre gigante de sesenta pies de alto, más o menos la estatura del gigante Pope y del gigante Pagan de los *Pilgrim's Progress* ilustrados de mi niñez. Estos monstruos no solo eran diez veces más altos que Cristian, sino que también eran diez veces más anchos y diez veces más gruesos, de modo que su peso total era mil veces el de éste, o sea unas ochenta o noventa toneladas. Por desgracia, la sección de sus huesos solo era cien veces más grande que la de Cristian, de manera que cada centímetro cuadrado de los huesos del gigante tenía que soportar diez veces más peso que un centímetro cuadrado de hueso humano. De la misma manera que el hueso del muslo humano se rompe bajo un peso diez veces mayor que el del hombre, las piernas de Pope y Pagan se habrían roto cada vez que dieran un paso. Sin duda, por ello estaban sentados en la imagen que recuerdo. Pero esto disminuye la admiración de uno por Cristian y Jack, el gigante Killer.

Volviendo a la zoología, supongamos que una gacela, esta preciosa criatura de largas y delgadas piernas, se vuelve grande: romperá sus huesos, a menos que haga una de estas dos cosas. Puede hacer sus piernas cortas y gruesas como las del rinoceronte, de manera que cada libra de peso tenga aún la misma área de hueso que la soporte. O puede comprimir su cuerpo y extender las piernas oblicuamente hacia fuera para ganar estabilidad, como la jirafa. Menciono estos dos animales porque pertenecen al mismo orden que la gacela, y ambos son mecánicamente acertados y notables corredores.



Los organismos de mayor tamaño. Todos los seres se han dibujado a la misma escala. 1. La mayor ave voladora (albatros); 2. El mayor animal conocido (ballena azul); 3. El mayor mamífero terrestre extinto (Baluchitnerium), junto a una figura humana como punto de comparación; 4. El animal terrestre vivo más alto (jirafa); 5. Tyrannosaurus; 6. Diplodocus; 7. Uno de los mayores reptiles voladores (Pteranodon); 8. La mayor serpiente extinta; 9. Longitud de la mayor tenia encontrada en el hombre; 10. El reptil vivo más largo (cocodrilo de África occidental); 11. El mayor lagarto extinto; 12. La mayor ave extinta (Aepyomis); 13. La mayor medusa (Cyanea); 14. El mayor lagarto vivo (dragón Komodo); 15. Oveja; 16. El mayor molusco bivalvo (Tridacna); 17. El mayor pez (tiburón ballena); 18. Caballo; 19. El mayor crustáceo (cangrejo araña del Japón); 20. El mayor escorpión marino (Euriptérido); 21. Sábalo real; 22. La mayor langosta; 23. El mayor molusco (calamar gigante, Architeuthis); 24. Avestruz; 25. Los primeros 32 metros del mayor organismo conocido (secoya gigante), superpuestos a un alerce de 30 metros. (De Ref. 2)

La gravedad, simple incomodidad para Cristian, era el terror de Pope, Pagan y Dispair. Para el ratón y cualquier animal más pequeño, no presenta prácticamente ningún peligro. Pueden tirar un ratón a un pozo de mina de mil yardas; cuando llega al fondo, da un ligero salto y se va. Una rata probablemente se mataría, aunque puede caer sin peligro del undécimo piso de un edificio; un hombre se mataría, un caballo reventaría. Puesto que la resistencia que el aire presenta al movimiento es proporcional a la superficie del objeto que se mueve, dividan la longitud, la anchura y la altura de un animal por diez; su peso se reduce a una milésima, pero su superficie sólo a una centésima. Así, la resistencia a la caída en el caso de un animal pequeño es, relativamente, diez veces mayor que la fuerza impulsiva.



Criaturas de tamaño medio. 1. Perro; 2. Arenque común; 3. El mayor huevo (Aepyomis); 4. Tordo cantor con su huevo; 5. El pájaro más pequeño (colibrí) con su huevo; 6. Abeja reina; 7. Cucaracha común; 8. El mayor insecto con forma de bastoncillo; 9. El mayor pólipo (Branchiocerianthus); 10. El menor mamífero (musaraña voladora); 11. El menor vertebrado (una rana tropical); 12. La mayor rana (rana Goliat); 13. Rana común de la hierba; 14. Ratón doméstico; 15. El mayor caracol terrestre (Achatina) con su huevo; 16. Caracol común; 17. El mayor caracol escarabajo (escarabajo Goliat); 18. Mano humana; 19. La mayor estrella de mar (Luidia); 20. El mayor protozoo de vida libre (un nummulites extinto). (De Ref. 2)

Por lo tanto, un insecto no teme a la gravedad; puede caer sin peligro y adherirse al techo con muy poco esfuerzo. Puede apoyarse en formas elegantes y fantásticas, como el falangio. Pero existe una fuerza que para el insecto es tan terrible como la gravedad para el hombre. Es la tensión superficial. Un hombre que sale del baño lleva consigo una película de agua de una décima de milímetro de espesor. Pesa aproximadamente una libra. Un ratón mojado transporta más o menos su peso en agua. Una mosca mojada tiene que soportar muchas veces su propio peso y, como todo el mundo sabe, una mosca mojada con agua o cualquier otro líquido está en una situación ciertamente muy grave. Un insecto que busca bebida está en un peligro tan grande como el hombre que se inclina sobre un precipicio en busca de alimento. Si cae en las garras de la tensión superficial del agua -es decir, se moja- es probable que permanezca así hasta ahogarse. Pocos insectos, como los escarabajos de agua, se las ingenian para ser impermeables; la mayoría se mantiene bien alejada de su bebida, mediante una larga trompetilla.

Naturalmente, los altos animales terrestres tienen otras dificultades. Tienen que bombear su sangre a alturas mayores que el hombre y, por tanto, necesitan una presión sanguínea mayor y unos vasos sanguíneos más fuertes. Muchos hombres mueren de apoplejía, especialmente cerebral, y este peligro es, desde luego, todavía mayor para un elefante o una jirafa. Pero los animales de todas las clases encuentran dificultades en el tamaño por la razón siguiente. Un animal típicamente pequeño, un coco o un infusorio microscópico, tiene una piel lisa, a través de la cual puede absorber todo el oxígeno que necesita, un tubo digestivo recto, con la superficie suficiente para tragar su alimento, y un riñón simple. Si se incrementaran sus dimensiones diez veces en todas direcciones, su peso aumentaría mil veces, y para poder usar sus músculos tan eficientemente como su imagen en miniatura necesitaría, por día, mil veces más alimento y oxígeno, produciendo una cantidad mil veces mayor de productos de desecho.

Ahora bien, si su forma quedara inalterada, su superficie solo aumentaría cien veces, y cada minuto debería entrar, por milímetro cuadrado de piel, una cantidad diez veces mayor de oxígeno, y, por milímetro cuadrado de intestino, una cantidad diez veces mayor de alimento. Cuando ha alcanzado el límite de su poder absorbente, su superficie debe incrementarse mediante algún artificio especial. Por ejemplo, una parte de la piel puede alargarse hacia fuera formando crestas o agallas, o introducirse hacia adentro formando pulmones, y, de esta manera, incrementar la superficie de absorción de oxígeno en proporción al tamaño del animal. Un hombre, por ejemplo, tiene cien metros cuadrados de pulmón, De modo análogo, el tubo digestivo, en vez de ser liso y recto, se enrolla, presentando, además, una superficie aterciopelada, y los demás órganos también se complican. Los animales superiores no son más grandes que los inferiores porque sean más complicados. Son más complicados porque

son más grandes. Lo mismo puede decirse de las plantas. Las plantas más sencillas, como las algas verdes que crecen en el agua estancada o en la corteza de los árboles, son simples células redondas. Las plantas más altas incrementan una superficie desarrollando hacia el exterior hojas y raíces. La anatomía comparada es, en gran parte, la historia de la lucha para incrementar la superficie en proporción al volumen.

Algunos de los métodos para aumentar la superficie son útiles hasta cierto nivel, pero no capaces de una adaptación muy extensa. Por ejemplo, mientras que los vertebrados transportan el oxígeno desde las agallas o pulmones a todo el cuerpo por medio de la sangre, los insectos toman el aire directamente, en todas las partes de su cuerpo, por medio de pequeños tubos escondidos llamados tráqueas, que se abren a la superficie en muchos puntos diferentes. Ahora bien, comoquiera que por sus movimientos respiratorios no pueden renovar el aire de la parte exterior del sistema traqueal, el oxígeno tiene que penetrar en las ramas más finas por difusión. Los gases pueden difundirse fácilmente en recorridos muy pequeños, no mucho mayores que la longitud media descrita por una molécula de un gas entre los choques con otras moléculas. Pero cuando tienen que recorrerse espacios tan extensos - desde el punto de vista de una molécula - como un milímetro, el proceso se realiza muy lentamente. Así pues, las partes del cuerpo de un insecto que estuvieran a más de un cuarto de pulgada del aire estarían siempre faltas de oxígeno. En consecuencia, los insectos difícilmente pueden tener más de media pulgada de espesor. Los cangrejos de tierra están constituidos según el mismo plan general que los insectos, pero son mucho más pesados. Sin embargo, al igual que nosotros, distribuyen el oxígeno mediante la sangre y, por lo tanto, son capaces de crecer mucho más que cualquier insecto. Si los insectos hubieran encontrado un método para impulsar el oxígeno a través de sus tejidos, en lugar de esperar que se absorba, habrían podido perfectamente llegar a ser tan grandes como los bogavantes, aunque otras razones les habrían impedido llegar a ser tan grandes como el hombre.



Gulliver es capturado por los liliputienses.

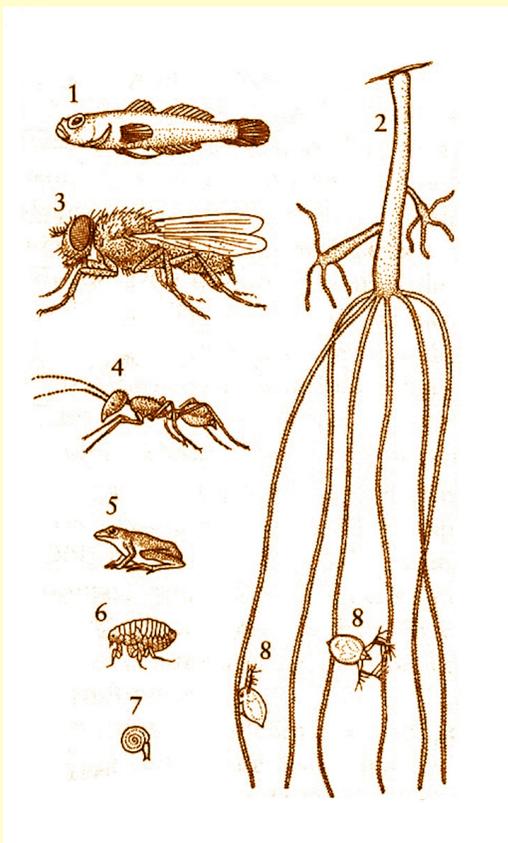
Exactamente las mismas dificultades ligan a los voladores. Un principio elemental de la aeronáutica es que la velocidad mínima necesaria para mantener un aeroplano de forma dada en el aire varía como la raíz cuadrada de su longitud. Si sus dimensiones lineales se multiplican por cuatro, debe volar con doble lentitud. Ahora, la potencia necesaria para la velocidad mínima crece más rápidamente que el peso de la máquina. Así, el aeroplano más grande, que pesa sesenta y cuatro veces más que el aeroplano más pequeño, necesita ciento veintiocho veces su potencia para sostenerse. Aplicando el mismo principio a los pájaros, encontramos que pronto se alcanza el límite de su tamaño. Un ángel cuyos músculos desarrollaran la misma potencia, a igual de peso, que los de un águila o una paloma, necesitaría un tórax que sobresaliera cerca de cuatro pies para albergar los músculos empleados en sus vuelos, mientras que para economizar peso sus piernas deberían reducirse a meros soportes. En realidad, un pájaro grande como el águila o como el milano no se mantiene en el aire por mover sus alas; en general, se le ve elevarse, es decir balancearse en una columna de aire ascendente. E incluso el elevarse se hace más y más difícil cuando el tamaño aumenta. Si no fuera por esto, las águilas podrían ser tan grandes como los tigres, y tan terribles para la aviación como aeroplanos enemigos.

Pero ya es hora que pasemos a las ventajas del tamaño. Una de las más obvias es que permite mantenerse caliente. Todos los animales de sangre caliente pierden, en reposo, la misma cantidad de calor por unidad de área de piel, para lo cual necesitan una provisión de alimento proporcional a su superficie, y no a su peso. Cinco mil ratones pesan como un hombre. Su superficie combinada y su consumo de alimento u oxígeno son, más o menos diecisiete veces las del hombre. De hecho, un ratón come cerca de un cuarto de su peso en comida cada día, que emplea principalmente, en mantenerse caliente. Por la misma razón, los animales pequeños no pueden vivir en países fríos. En las regiones árticas no hay reptiles o anfibios, ni mamíferos pequeños. El mamífero más pequeño de Spitzberg es el zorro. Los pájaros pequeños emigran en invierno, mientras que los insectos mueren, aunque sus huevos pueden sobrevivir a la helada seis meses o más. Los mamíferos más afortunados son los osos, las focas y las morsas.

De manera similar, el ojo es más bien un órgano ineficaz hasta que alcanza gran tamaño. La parte posterior del ojo humano, en la cual se forma una imagen del mundo exterior, y que corresponde a la película de una cámara, está compuesta de un mosaico de bastoncillos y conos, cuyo diámetro es poco mayor que la longitud media de una onda luminosa. Cada ojo tiene cerca de medio millón y para que dos objetos puedan distinguirse, sus imágenes deben caer en bastoncillos o conos distintos. Es obvio que con menos bastoncillos y conos que fueran más grandes, veríamos con menor precisión. Si fueran dos veces más anchos, dos puntos tendrían que estar dos veces más separados para que pudiéramos distinguirlos a una distancia dada.

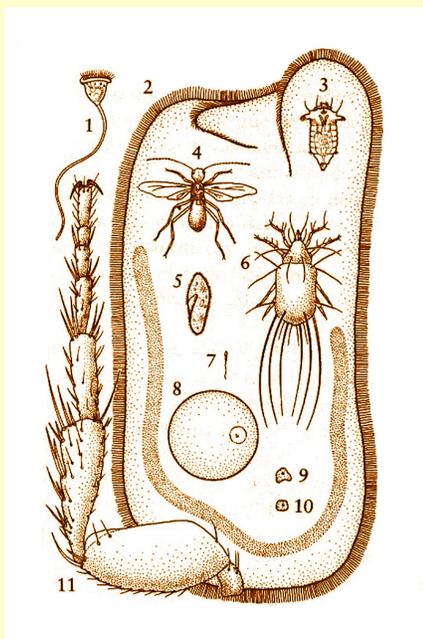
Pero si su tamaño disminuyera y su número aumentara, no veríamos mejor. Ya que es imposible formar una imagen definida más pequeña que la longitud de una onda luminosa. De aquí que el ojo de un ratón no sea un modelo a escala reducida del ojo humano. Sus bastoncillos y conos no son mucho menores que los nuestros, y, por lo tanto, los tiene en cantidad mucho menor. Un ratón no podría distinguir un rostro humano de otro a seis pies de distancia. Para que puedan servirles de algo, los ojos de los animales pequeños deben ser, en proporción a sus cuerpos, muchos mayores que los nuestros. Por otra parte, los grandes animales sólo necesitan ojos relativamente pequeños, y los de la ballena y del elefante son poco mayores que los nuestros.

Por razones más profundas, este mismo principio general es cierto para el cerebro. Si comparamos el peso del cerebro de un conjunto de animales muy similares, como son el gato, el guepardo, el leopardo y el tigre, encontramos que a medida que el cuerpo se multiplica por cuatro, el peso del cerebro solamente se duplica. Los animales más grandes, con huesos proporcionalmente mayores, pueden economizar en lo que se refiere a cerebro, ojos y otros órganos.



Criaturas pequeñas, observables a simple vista. 1. Uno de los peces más pequeños (Trimmatomnanus); 2. Hidra común, expandida; 3. Mosca doméstica; 4. Hormiga de tamaño medio; 5. El invertebrado más pequeño (una rana tropical, la numerada con el 11 en la figura anterior); 6. Pulga (*Xenopsylla cheopis*); 7. El menor caracol de tierra; 8. Pulga de agua *Daphnia*. (De Ref. 2)

Estas son unas pocas consideraciones, que muestran que para cada tipo de animal hay un tamaño óptimo. No obstante, aunque Galileo demostró lo contrario hace más de trescientos años, la gente todavía cree que si una pulga fuera tan grande como un hombre podría dar saltos de mil pies en el aire. De hecho, la altura a la que puede saltar un animal es casi más independiente de su tamaño que proporcional a él. Una pulga puede dar un salto cerca de dos pies, un hombre, de cerca de cinco. El saltar a una altura dada, si despreciamos la resistencia del aire, requiere un gasto de energía proporcional al peso del que salta. Pero si los músculos empleados en el salto forman una fracción constante del cuerpo del animal, la energía desarrollada por gramo de músculo es independiente del tamaño, con tal que se desarrolle con suficiente rapidez en el animal pequeño. De hecho, los músculos de un insecto, aunque pueden contraerse más rápidamente que los nuestros, parecen menos eficaces; si no, una pulga o una langosta podrían elevarse seis pies en el aire.



Las menores criaturas observables a simple vista y algunos animales microscópicos grandes y células. 1. Vorticella, un ciliado; 2. El mayor protozoo ciliado Bursaria); 3. El menor animal pluricelular (un rotífero); 4. El menor insecto volador (Elaphis); 5. Otro ciliado (Paramecium); 6. Ácaro del queso; 7. Espermatozoo humano; 8. Óvulo humano; 9. Ameba de la disentería; 10. Célula hepática humana; 11. Extremidad anterior de la pulga (numerada 6 en la figura anterior). (De Ref. 2)

Así como existe un tamaño óptimo para cada animal, también sucede lo mismo para cada institución humana. En el tipo griego de democracia todos los ciudadanos podían escuchar a una serie de oradores y votar directamente las cuestiones de legislación. De aquí que sus filósofos supusieran que una pequeña ciudad era el mayor estado democrático posible. La invención inglesa de un gobierno representativo hizo posible una nación democrática, y esta posibilidad fue realizada primeramente en Estados Unidos y, más tarde, en otras partes. Con el desarrollo de la radiodifusión, se ha hecho todavía más fácil para cada ciudadano el escuchar las opiniones políticas

de los oradores representativos y, el futuro, quizá se pueda ver el retorno del estado nacional a la forma de democracia griega. Igualmente, el referéndum sólo ha sido posible con la institución de los periódicos.

Para el biólogo, el problema del socialismo se presenta en gran parte como un problema de tamaño. Los socialistas radicales desean dirigir cada nación como un simple asunto de negocios. Supongo en Henry Ford no encontraría muchas dificultades en gobernar Andorra o Luxemburgo sobre unas bases socialistas. Casi tenía más hombres en su nómina que la población de estas. Es concebible que un sindicato de Ford, si pudiéramos encontrarlos, hicieran que Bélgica Ltd. o Dinamarca Inc. siguieran su curso.

Pero mientras que la nacionalización de ciertas industrias es una posibilidad obvia en el mayor de los estados, no puedo imaginarme un Imperio Británico o unos Estados Unidos completamente socializados más fácilmente que un elefante dando saltos mortales o un hipopótamo saltando una valla.



Giant Despair captures Christian and Hopeful.

Ilustración de un gigante.

El tratamiento didáctico de la lectura del artículo de J.B.S. Haldane, y de las referencias que se citan, podría hacerse en diversas asignaturas, como lo ha hecho el profesor que escribe estas notas, tales como Introducción a la Física, Mecánica en los niveles de Educación Media y universitaria. También se incluyó el tema en uno de los capítulos de una asignatura electiva denominada "La ciencia – ficción como estrategia didáctica en la enseñanza de las ciencias" que se ha impartido durante varios años. Por ejemplo, se pueden plantear las siguientes actividades:

- Hacer una descripción de los conceptos físicos que trata el autor del artículo y que repercuten en su estructura biológica.
- ¿Pueden existir hombres y animales gigantes como los que se mencionan en el artículo? Justificar sobre la base de las leyes físicas involucradas.
- ¿Pueden existir hombres y animales pequeños, tales como los que se mencionan en el artículo? Justificar sobre la base de las leyes físicas involucradas.
- ¿De qué manera la fuerza de gravedad altera y limita el tamaño de los animales y de las construcciones realizadas por el ser humano?
- Profundizar algunas de las situaciones planteadas en el artículo de Haldane en las referencias seleccionadas que se citan al final.

Otras referencias acerca del tema:

1. James R. Newman (9ª edición, 1983) Sigma: El mundo de las matemáticas. Volumen 2, Ediciones Grijalbo.
2. Thomas A. McMahon y John Tyler Bonner. (1986) Tamaño y Vida. Biblioteca Scientific American, Prensa Científica Editorial Labor.
3. Robert W. Williams (1963) Change of scale. Revista American Journal of Physics, september 1963.
4. Physical Science Study Committee (PSSC) (1967) Física. 2ª edición, Editorial Reverte.
5. Herbert Lin (1982) Fundamentals of zoological scaling. Revista American Journal of Physics, january 1982.
6. Georges Barnes (1989) Physics and size in biological systems. Revista The Physics Teacher, april 1989.
7. Michel Wautelet (2001) Scaling laws in the macro-, micro- and nanoworlds. Revista European Journal of Physics 22 (2001) 601-611.
8. M. Moreno Lupiáñez y Jordi José Pont (2002) De King Kong a Einstein: La Física en la ciencia – ficción. Ediciones UPC.
9. Damien Divivier y Michel Wautelet (2006) From the microworlds to King Kong. Revista Physics Education 41, september 2006.
10. Marina Milner-Bolotin (2009) Exploring scaling: From concept to applications. Revista Science Education review, 8(3) 2009.

Selección y notas: Juan Espinoza G.