Espacio y tamaño

El efecto de la escala o por qué los pimientos son huecos

◆ Federico Vázquez

El efecto de la magnitud o tamaño como determinante de la forma nos muestra cómo el espacio modela los cuerpos que observamos a nuestro alrededor. Se ha preguntado el lector ¿por qué los árboles poseen una estructura tan ramificada?, ¿por qué no existen gotas de agua del tamaño de una pelota de béisbol o de una sandía?, o ¿por qué el gorrión no ruge?

Para empezar a entender los efectos del tamaño consideremos los poliedros regulares y calculemos sus áreas y volúmenes tomando como base de comparación la longitud d que corresponde al largo de la arista considerada igual para todos los polígonos.

La conclusión de la tabla siguiente es que la superficie de los polígonos varía con d y el volumen con d^2. Más propiamente, decimos que la superficie de un polígono es proporcional al cuadrado del largo de su arista y que el volumen lo es al cubo. El factor de proporcionalidad (el número que aparece a la izquierda de d^2 y d^3 en la tabla) es distinto para cada polígono. Muchas otras propiedades físicas varían con el cuadrado de la distancia. Por ejemplo, en la propagación de energía, el flujo que cruza una unidad de superficie disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente de donde procede la energía. Así, la luz se hace más tenue, el sonido más suave y los campos gravitatorio, magnético y eléctrico más débiles conforme nuestros aparatos de medición se alejan de la fuente. Decimos que todos ellos siguen una ley del inverso del cuadrado de la distancia. ¿Por qué aparece un término d^2 en las fórmulas relativas a la propagación de la luz, el sonido y de los campos gravitatorio y electromagnético? La afirmación de que la energía decrece con el cuadrado de la distancia no supone tanto una descripción de la propia energía sino del medio en el que ella se propaga. Otros fenómenos varían en relación con el volumen, es decir, con d^3. Entre ellos está el peso. Éste se calcula como un factor por el volumen del objeto de que se trate. El factor depende de la densidad de su masa. El peso no representa ningún problema para un ratón, por ejemplo. Si cayera desde una altura de 900 m, sólo sufriría una pequeña contusión y sobreviviría. Pero ya un ser vivo del tamaño de una rata no resistiría

Dimensión lineal d	Superficie d^2	Volumen d^3
1	1	1
2	4	8
4	16	64
…	…	…
32	1 024	32 768

◆ Profesor-Investigador, Facultad de Ciencias

tal impacto; sin embargo, ella saldría ilesa si cayera desde un décimo piso, del que si cayera un hombre moriría sin duda. Una ballena moriría por su propio peso si tan sólo fuera sacada del agua y depositada en el suelo. Su muerte sobrevendría por asfixia pues sus pulmones se aplastarían por el peso de su cuerpo. De la tabla de anterior, podemos inferir otro hecho. Si un cuerpo tuviera dimensiones 32 veces más grandes que las de otro, tendría una superficie 1 024 veces mayor y ¡un volumen 32 768 veces mayor! Un cuerpo de gran tamaño tendría más volumen en relación con su superficie que otro pequeño. Esto acarrea diferencias muy notables en los seres vivos. Un organismo de gran envergadura pesa más y genera más calor que uno pequeño porque las funciones que generan calor están relacionadas con su volumen. Dicho organismo encontraría una mayor dificultad para disipar el calor producido por su metabolismo y para asimilar el alimento o captar el oxígeno que requiere pues estas funciones son dependientes de su superficie corporal. ¿Cómo compensa el organismo mayor su elevado volumen? Incrementando selectivamente sus superficies críticas, desarrollando estructuras verdaderamente complejas: ramificaciones, pliegues, cavidades, huecos, alargamiento de las zonas de intercambio de calor, etcétera. Para mantener su superficie más acorde con su volumen los grandes árboles desarrollan una ramificación abundante y un elevado número de hojas. Otros intentos para incrementar la superficie se encuentran en los procesos de ramificación de los sistemas circulatorios, como el de un ser humano por ejemplo. Aunque esto ocurre por razones distintas. Un organismo unicelular no requiere de complicaciones como ésas, ya que puede absorber directamente del medio el oxígeno y el alimento a través de su membrana. Pero cuando el organismo crece más allá de lo permitido para que sus funciones dependientes de su superficie mantengan el protoplasma, entonces la célula simplemente se divide. Es curioso percatarnos de la existencia de un análogo físico a lo anterior. Se trata de las gotas de agua. La gota de agua se forma por la existencia de las fuerzas de tensión superficial. Cuando el tamaño de la gota de agua sobrepasa cierto límite superior se vencen las fuerzas de tensión y la gota se divide como si fuera una célula. El hecho de que los animales pequeños respiran más frecuentemente, sus corazones laten también con más frecuencia o los sonidos que emiten son más agudos, tiene detrás algo en común. Una fibra muscular más corta, ya sea cardiaca, pulmonar o vocal, se contrae o vibra más rápidamente que otra más grande. Igual que una cuerda fina y corta vibra de forma más rápida que una larga y gruesa. Así, el corazón de la musaraña late 700 veces por minuto, el de un gato doméstico 120 veces, el del hombre 72, el del elefante 35 veces y el de la ballena tan sólo 15. Galileo analizó los efectos del tamaño en la forma de estructuras.

Él afirmó que de dos formas similares, la mayor es la más débil. Por ejemplo, imagine el lector dos manzanas suspendidas de sus respectivos tallos. Una con un diámetro dos veces mayor que la otra y el tallo de la mayor también dos veces más grande que el de la pequeña. ¿Por qué es más probable que caiga la más grande? El lector dirá: obvio, por ser la más grande. Pero, ¿qué pensaría si le recordara que el tallo es también el doble de grueso? La respuesta es efectivamente que la más grande pero por razones que tienen que ver con la tabla anterior. El área transversal del tallo de la manzana grande es sólo $2^2 = 4$ veces más grande que la del tallo delgado, mientras que su volumen (y por tanto su peso) es ¡$2^3 = 8$ veces mayor! El lector debe saber que la resistencia a la tensión depende del área transversal del tallo. La afirmación de Galileo no es ajena a los arquitectos. Por ejemplo, si una viga está soportada en sus extremos puede romperse por combamiento o pandeo. Al deformarse aparecen dos tipos de fuerzas. Uno, ya mencionado, son las fuerzas de tensión que aparecen en la parte inferior de la viga y tienden a estirarla por abajo. El otro son las fuerzas de compresión presentes en la parte superior de la viga. Estas fuerzas, huelga decirlo, surgen por la acción del propio peso de la barra. A medida que aumenta el tamaño de la barra su resistencia al combamiento se incrementa en menor medida que las fuerzas aplicadas debidas a su propio peso. Una viga cuyas dimensiones sean el doble que las de otra, tiene sólo ocho veces más resistencia a la tensión para superar una fuerza que es ¡16 veces superior!

Así, cualquier viga se romperá si aumenta excesivamente su tamaño. En la naturaleza las estrategias para contrarrestar los efectos de un aumento de tamaño consisten ya sea en emplear un material más resistente en las construcciones o en crear estructuras huecas reduciendo el peso. Veamos con más detalle esta última. Consiste básicamente en ordenar el material de construcción de acuerdo con una configuración más efectiva, retirándolo de los puntos en los que no es necesario y añadiéndolo en donde se requiera. De esto, existen ejemplos muy bonitos y por montones. El resultado último es lograr estructuras que tengan una resistencia igual a la que tendrían si fuesen sólidas. El pimiento, al igual que la vaina de algunas legumbres ilustran lo anterior. En su cavidad, una sencilla disposición triangular de nervios o tabiques o nervaduras producen el efecto deseado: menor peso con una resistencia equivalente. El lector puede tener un día la curiosidad de observar las vértebras de un pez. Ellas muestran un alto grado de oquedad, ligereza y resistencia por medio de una disposición adecuada de nervaduras. Los romanos usaron también esta estrategia en el diseño de sus construcciones. Ello les permitió la edificación de la cúpula del Panteón que es la que tiene un claro mayor sin soporte de toda Roma Antigua. Ellos emplearon agregados ligeros de piedra pómez y cavidades en el hormigón. Esta técnica la vemos en nuestros días con variantes.

Para terminar, dos referencias en las que el lector puede ampliar los temas anteriores son las siguientes: Peter S. Stevens, *Patrones y Pautas en la Naturaleza* (Barcelona, Salvat, 1989), Hermann Haken, *Fórmulas de Éxito en la Naturaleza* (Barcelona, Salvat, 1986).