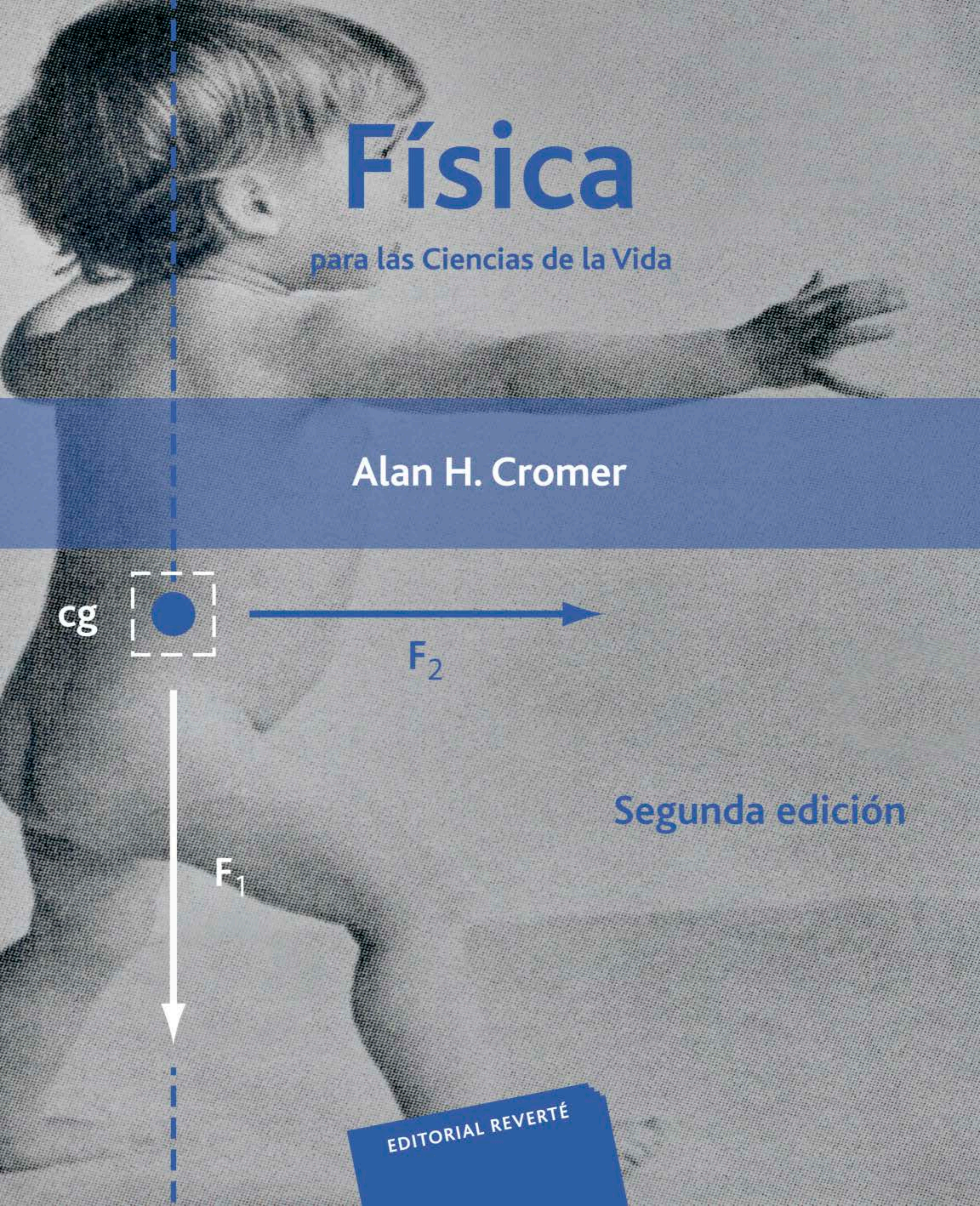
# Física

## para las Ciencias de la Vida

Alan H. Cromer




Segunda edición

EDITORIAL REVERTÉ

# Física

## para las Ciencias de la Vida

Segunda edición

# Física

## para las Ciencias de la Vida

Segunda edición


Alan H. Cromer

Professor of Physics

Northeastern University



EDITORIAL REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

*Título de la obra original:*

**Physics for the Life Sciences**
**Second Edition**

*Versión original publicada en lengua inglesa por:*

**McGraw-Hill Book Company, New York, U. S. A.**



*Edición en español:*

Edición en papel:
© Editorial Reverté, S. A., 1984
ISBN: 978-84-291-1808-7

© Reverté ediciones, S. A. de C. V., 1996
ISBN: 978-968-6708-31-8

Edición e-book (PDF):
ISBN 978-84-291-9414-2

*Versión española por:*

**Dr. D. José Casas Vázquez**
Profesor de la Universidad Autónoma de Barcelona

*y*

**Dr. D. David Jou Mirabent**
Profesor Adjunto de la Universidad Autónoma de Barcelona

**Propiedad de:**

**EDITORIAL REVERTÉ, S. A.** y
Loreto, 13-15. Local B
08029 Barcelona. ESPAÑA
Tel: (34) 93 419 33 36
reverte@reverte.com
www.reverte.com

**REVERTÉ EDICIONES, S. A. DE C. V.**
Río Pánuco 141 Col. Cuauhtémoc
C. P. 06500 México, D. F. - México
Tel: (52) 55.5533.5658
reverte@reverte.com.mx
www.reverte.com



# 855

**A MARJORIE**
**POR TODO**

**Para siempre**

# Prólogo

*Este libro tiene por finalidad proporcionar a los estudiantes de biología, farmacia, medicina, terapéutica física, educación física y demás ciencias afines los conocimientos de física que necesitan para su trabajo profesional. La selección del material se ha hecho pensando que fuese apropiado para las ciencias de la vida y conveniente como curso de introducción a la física. Estos criterios han producido algunos cambios en el acostumbrado énfasis de los temas, pero no han limitado la amplia visión de conjunto que se exige de un texto de física general.*

*Como los estudiantes de ciencias de la vida no comprenden en muchos casos por qué necesitan seguir un curso de física se subraya en cada ocasión la adecuación del material del libro a los procesos de la vida. Para lograr esto utilizamos ejemplos biológicos reales que ilustran cada principio físico e incluimos muchos problemas que relacionan la física con las ciencias de la vida. Mi experiencia me dice que esta manera de tratar los temas hace que aumente el interés de los estudiantes que de otro modo no tienen motivación alguna para estudiar física.*

*En este libro las matemáticas se reducen al álgebra elemental, ya que muchos estudiantes, aun los que han estudiado cálculo, no dominan suficientemente las matemáticas avanzadas y no sacarían provecho de su utilización. Usando solamente matemáticas sencillas, el estudiante puede concentrarse directamente en la física.*

*En respuesta a las sugerencias de los que han utilizado la primera edición, se han añadido los siguientes temas: movimiento armónico simple, impulso, transporte de calor, aberración en las lentes e instrumentación. Para dejar espacio a estas adiciones se han suprimido los siguientes temas: máquinas simples, deducción de la velocidad del sonido, relatividad y lentes gruesas. Otros cambios de importancia son: la nueva redacción del capítulo 5 (Energía), retrasando cualquier mención al calor hasta el capítulo 11, donde éste puede ser tratado con propiedad, y un aumento de la discusión del biomagnetismo para incluir la investigación contemporánea.*

*El libro está dividido en seis secciones: Mecánica, Propiedades de la Materia, Calor y Termodinámica, Fenómenos Ondulatorios (que incluye la Óptica), Electricidad y Magnetismo, y Física Moderna.*

*Los capítulos 2, 4, 5 y 6 de la Parte I (Mecánica) abarcan los conceptos básicos de fuerza, aceleración y energía necesarios para el resto del libro. Los capítulos 2 y 3 constituyen una unidad completa sobre la estática apropiada para los estudiantes de terapéutica física y educación física.*

*El concepto de escalas de semejanza que se introduce en el capítulo 1 vuelve a utilizarse en los capítulos 5 y 6 para sacar relaciones interesantes entre el tamaño y la función en los animales.*

*El capítulo 7 de la Parte II (Propiedades de la Materia) abarca las propiedades estáticas y dinámicas de los fluidos y las aplica a la respira-*

*ción y a la circulación. En los capítulos del 8 al 10 se dan las propiedades específicas de gases, líquidos y sólidos que tienen importancia para la biología.*

*La Parte III (Calor y Termodinámica) se divide en un capítulo dedicado al calor (capítulo 11), que analiza la primera ley de la termodinámica, el calor específico y el transporte de calor, y un capítulo sobre termodinámica (capítulo 12), que estudia las transformaciones termodinámicas, la segunda ley de la termodinámica y la entropía.*

*El tratamiento que de la termodinámica se hace en el capítulo 12 va más allá de la acostumbrada discusión introductoria para así desarrollar los conceptos de entropía y energía libre que son tan importantes para comprender la dinámica de las reacciones químicas.*

*En la Parte IV (Fenómenos Ondulatorios) se habla del sonido, la luz y la óptica. Como esta sección es independiente de la Parte II, puede estudiarse antes que ésta.*

*Los principios básicos de la electricidad y el magnetismo desarrollados en la Parte V se aplican a fenómenos bioeléctricos (Cap. 18), fenómenos biomagnéticos (Cap. 19) e instrumentación biomédica (Cap. 20).*

*En el capítulo 21 de la Parte VI (Física Moderna) se estudian los fundamentos de la Física Cuántica y la importancia que tiene para la química. El capítulo 22 desarrolla los conceptos de la Física Nuclear necesarios para entender los modernos avances en medicina nuclear.*

*El último o los dos últimos apartados de la mayoría de los capítulos contiene material avanzado o aplicaciones especializadas que pueden suprimirse sin perder por ello continuidad. Mediante la inclusión u omisión de estos apartados, se pueden ajustar la longitud y nivel del curso a las necesidades de la clase. Al final de cada capítulo se incluye una colección de problemas, los más difíciles de los cuales se han marcado con un asterisco (*).*

*Quiero demostrar mi agradecimiento a los muchos lectores de la primera edición que encontraron tiempo para enviarme sus sugerencias sobre cómo mejorar el libro. Cada una de ellas ha sido estudiada cuidadosamente y en su mayoría se han incluido en esta edición. El manuscrito final ha sido cuidadosamente revisado por Ms. Alice Macnow (McGraw-Hill), los Profesores Rexford E. Adelberger (Guilford College), Charles D. Teaque (Eastern Kentucky University), Eugene A. McGinnis (University of Scranton) y John E. Mulhern, Jr. (University of New Hampshire). Estoy muy agradecido por su ayuda en la corrección de errores y en la clarificación de párrafos confusos. La responsabilidad del resultado final, con todos los errores que hayan quedado sin corregir, es enteramente mía.*

ALAN H. CROMER

# Índice analítico

# MECANICA I

Durante miles de años los filósofos han especulado acerca de la naturaleza del mundo físico. Hace más de 2000 años los antiguos griegos hicieron considerables avances en algunos problemas aislados, pero hasta que Galileo y Newton no establecieron las leyes de la mecánica, no fue posible un conocimiento coherente de los fenómenos físicos. La mecánica es el estudio de las condiciones que hacen que los objetos permanezcan en reposo *(estática)* y de las leyes que rigen su movimiento *(dinámica)*. Estas leyes son de alcance universal y se aplican tanto al movimiento de un satélite alrededor de la Tierra como al movimiento de un corredor por una pista. Más aún, la mecánica es la base sobre la que se apoya el resto de la Física.

# Capítulo 1 Medida

La mente humana adscribe muchos atributos diferentes a las personas y a las cosas, tales como longitud, peso, color, belleza y patriotismo. Algunos atributos son fáciles de medir y otros no, ya que existen procedimientos bien definidos para medir la longitud y el peso, pero no la belleza o el patriotismo. [El color es un caso intermedio, pues si bien puede asignarse un valor numérico a cada color (Apart. 15.4), no pueden éstos, en cambio, ordenarse.] La física es el estudio de los atributos medibles de las cosas. Los conceptos básicos de la física se definen en función de las medidas, y el objetivo de las teorías físicas es el de establecer relaciones entre los resultados de las medidas. Una teoría física, cualquiera que sea el modo abstracto de expresarla, es a la larga un enunciado acerca de operaciones concretas llevadas a cabo en un laboratorio.

## 1.1. LOS ORÍGENES INTELECTUALES DE LA FÍSICA

La física moderna es la confluencia de dos corrientes intelectuales bastante diferentes. Una puede remontarse a los primitivos filósofos del Asia Menor, quienes, según registra la historia, fueron los primeros hombres que se preguntaron acerca de la naturaleza fundamental (*physis*) del mundo material. A menudo su razonamiento era más especulativo que científico, pero estaba libre de toda la mitología que oscurecía las mentes de la mayoría de los hombres de aquel tiempo. En las colonias griegas del Asia Menor (Jonia), especialmente en la ciudad de Mileto, los filósofos Tales (640?-546 a.C.), Anaximandro (610-545 a.C.), Anaxímenes (?-525 a.C.) y otros desarrollaron el concepto de unidad en el mundo físico. Ellos creían que a pesar de las diferencias aparentes entre los objetos materiales tales como rocas, árboles, nubes y caballos, existe una igualdad subyacente a todas las cosas. Cada uno de ellos tenía una idea distinta de la naturaleza de esta esencia universal (Tales pensaba que era el agua y Anaxímenes que el aire), pero su importantísimo concepto de la unidad de la materia persiste aún como doctrina principal de la física de hoy.

Los filósofos jónicos fueron también auténticos hombres de ciencia, y partiendo de los antiguos trabajos de los egipcios y babilonios consiguieron importantes avances en matemáticas, astronomía, geología y biología. Su obra fue continuada en la Grecia continental en el siglo V a.C. y en las ciudades helénicas (en particular Alejandría) en los siglos III y IV a.C. El gran Arquímedes de Siracusa (287-212 a.C.) vivió en este último período. Su trabajo en estática e hidrostática es de enfoque muy moderno, y se avanzó tan poco en los 1800 años siguientes que él mismo no habría tenido ninguna dificultad para entender la obra de Galileo (1564-1642 d.C.). De hecho, Arquímedes pudo ser el punto de partida de la segunda corriente de ideas que, junto con la primitiva búsqueda por parte de los griegos de la naturaleza fundamental de las cosas, constituye la física moderna. Pero, desgraciadamente, la mayor parte de sus escritos estuvieron perdidos para Europa durante mucho tiempo, y así hubo que esperar hasta Galileo para ver surgir de manera clara la segunda corriente.

Galileo fue quien desarrolló el moderno método de estudio de los sistemas simples por medio de la medida experimental y el análisis matemático. Estudió el movimiento de los objetos que se deslizan por planos inclinados y llegó a distinguir las características propias del movimiento de las que no lo son. La característica propia era corrientemente una magnitud medible, tal como la masa del objeto o el tiempo necesario para recorrer una distancia fija. Trató de encontrar la relación entre estas medidas numéricas y de expresar los resultados en términos matemáticos. Resultó que las conclusiones de una de estas investigaciones podían a menudo resumirse de modo muy simple, por ejemplo: La distancia recorrida a lo largo de una pendiente es proporcional al cuadrado del tiempo. Galileo demostró que las leyes de la naturaleza (o al menos algunas de ellas) obedecen a ecuaciones matemáticas simples, y desde entonces los físicos han continuado la búsqueda de relaciones matemáticas entre los resultados de sus medidas.

Así, pues, ¿qué es la física? Es una motivación y un método. La motivación es la misma que la de los griegos: encontrar la naturaleza fundamental de las cosas. Pero el método es el de Galileo: investigar sistemas simples por medio de la experimentación y el análisis matemático. Los problemas que se estudian parecen unas veces pueriles y otras esotéricos: Galileo ponía a rodar bolas por una pendiente, Joule daba vueltas a una rueda de paletas en el agua, Rutherford hacía experimentos con raros elementos radiactivos. Sin embargo, muchas veces los resultados conducen a percepciones claras y profundas de la naturaleza de las cosas, que cumplen el objetivo de los filósofos griegos por caminos que sólo ellos podrían imaginar.

En este libro vamos a estudiar el método de la física y algunos de sus resultados obtenidos en los 400 años transcurridos desde Galileo. Estos resultados son importantes para cualquiera que se interese por la naturaleza de las cosas, puesto que son de aplicación universal en todo el mundo material, incluidos los organismos vivos.

En efecto, como vamos a ver en este libro, la física es esencial para comprender el mecanismo de muchos procesos biológicos, tales como el movimiento del cuerpo, el flujo de la sangre y el habla. Además, quizás el misterio de la vida misma pueda ser algún día comprendido en términos de las leyes fundamentales de la física.

## 1.2. MEDIDA

La física trata de las cosas que pueden ser medidas. Lo que puede medirse depende en gran manera del estado en que se halla la tecnología. Por ejemplo, la radiación emitida por las sustancias radiactivas no se podía medir antes de descubrir dispositivos para detectar tal radiación. El dominio de la física crece continuamente a medida que los nuevos descubrimientos extienden el campo de posibles medidas. Todas las ciencias cuentan con las medidas hasta cierto punto, pero normalmente la medida es subsidiaria del fin principal. Así, un zoólogo podría medir cuidadosamente el peso de sus ratones experimentales para determinar el efecto de un medicamento sobre su crecimiento. Esta medida es inherente al problema de la función metabólica del medicamento. En física, sin embargo, el objeto de interés primordial es la propia medida. Esto es así porque un determinado concepto, como puede ser la longitud, el tiempo o la temperatura, sólo se entiende en función del método utilizado para medirla. Esta manera de definir las cosas se denomina *operacionalismo*, y su uso evita asignar a un concepto un significado metafísico injustificado e introducir connotaciones extrañas y posiblemente falsas.

Consideremos, por ejemplo, el concepto de longitud. De manera operacional, la longitud de algo se define como el número obtenido cuando se realiza un conjunto de operaciones que recibe el nombre de *medida de su longitud*. Estas operaciones se pueden ilustrar siguiendo los pasos dados al medir la longitud de una habitación:

1. Marcar dos puntos, uno a cada extremo de la habitación, para definir el intervalo exacto a medir (puntos $A$ y $B$ de la Fig. 1.1.*a*).
2. Extender una cinta de agrimensor (bastaría con un trozo de cordel) entre estos dos puntos para definir la línea recta entre ellos.
3. Coger una varilla graduada y ponerla a lo largo de la cinta estirada, con un extremo en el punto $A$. Marcar donde toca el otro extremo de la varilla (punto $C$ de la Fig. 1.1.*c*) y desplazar la varilla a lo largo de la cinta hasta que el extremo anterior esté alineado con esta marca (Fig. 1.1*d*). Repetir esta operación hasta alcanzar el punto $B$.
4. Cuando se alcanza el punto $B$, la varilla estará en la posición que aparece en la Fig. 1.1*e*. Marcar sobre la varilla el punto en que toca a $B$.
5. La *longitud* (en metros) es el número de marcas sobre la cinta, más la fracción de varilla desde la última marca ($E$) hasta el punto $B$.

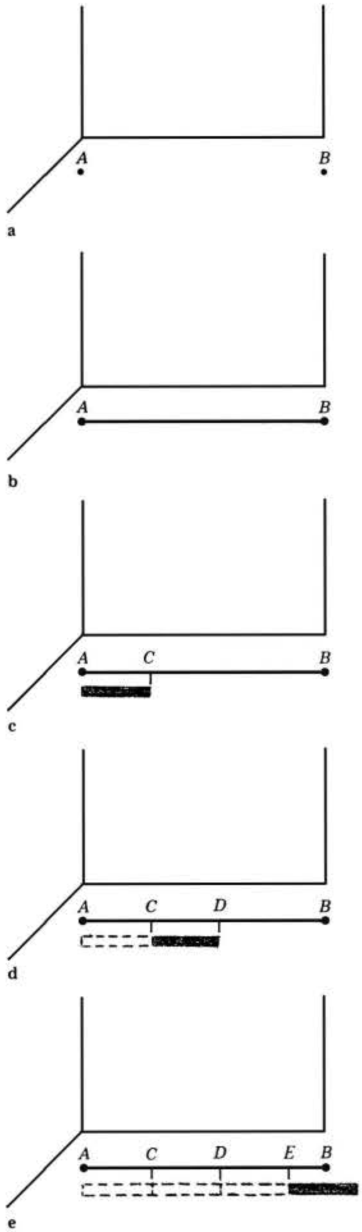



FIGURA 1.1
Pasos necesarios para medir la longitud de una habitación.

Vemos que, detallando el procedimiento real utilizado para medir una longitud, nos evitamos tener que decir algo acerca de la naturaleza esencial del espacio o la distancia (lo cual sería metafísica). Longitud es lo que se mide con una regla, y para hacer física no se necesita conocer nada más.

Las medidas se hacen siempre con respecto a un patrón, denominado *unidad*. En nuestro ejemplo, la unidad es el metro, y el resultado final se expresa como tantos metros, pongamos 3,7 m. Ésta se puede convertir en otras unidades si se conoce la longitud del metro en función de estas unidades. Por ejemplo, la conversión de metros a centímetros es

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

de modo que la longitud de la habitación puede expresarse como

$$3{,}7 \text{ m} \times 100 \text{ cm/m} = 370 \text{ cm}$$

la conversión de metros a pies es

$$1 \text{ m} = 3{,}28 \text{ pies}$$

luego la longitud puede expresarse también como

$$3{,}7 \text{ m} \times 3{,}28 \text{ pies/m} = 12{,}1 \text{ pies}$$

**Ejemplo 1.** Si se sabe que un litro es igual a 0,264 galones, ¿cuántos litros son 20 galones?
Una dificultad corriente al convertir unidades consiste en saber si se divide o se multiplica por el factor de conversión. Para saber cómo se ha de proceder en este caso, escribimos en primer lugar la relación entre litros (l) y galones (gal).

$$1 \text{ litro} = 0{,}264 \text{ gal}$$

Como queremos pasar de galones a litros, hemos de hallar el número de litros por galón dividiendo ambos miembros de la ecuación anterior por 0,264 gal

$$\frac{1 \text{ litro}}{0{,}264 \text{ gal}} = \frac{0{,}264 \text{ gal}}{0{,}264 \text{ gal}}$$

o bien

$$1 = 3{,}79 \text{ l/gal}$$

Por lo tanto, hay 3,79 litros por galón (3,79 l/gal) y

$$20 \text{ gal} = (20 \text{ gal})\ (3{,}79 \text{ l/gal}) = 75{,}8 \text{ l}$$

Obsérvese que si se tratan las unidades como símbolos algebraicos, las unidades correctas aparecen en el resultado final después de algunas simplificaciones.
De manera semejante, para convertir litros en galones se ha de multiplicar el número de litros por el factor

$$1 = 0{,}264 \text{ gal/l}$$

En un tiempo, el metro y el pie fueron los respectivos patrones nacionales de longitud de Francia e Inglaterra. En la actualidad, el metro es el patrón científico de longitud en todos los países y el patrón nacional en la mayoría de ellos, excepto en los Estados Unidos. (Incluso el Reino Unido está llevando a cabo la conversión al sistema métrico.) El sistema métrico se describe en el Apéndice V y las conversiones entre unidades inglesas y métricas aparecen en la página de guarda de la cubierta delantera.

Se dan muchos casos de interés en los que no es posible la medida directa de una longitud por medio de una varilla graduada, y han de utilizarse métodos indirectos. Sin embargo, incluso en una medida indirecta se ha de acudir en algún momento a una medida tipo varilla.

Por ejemplo, para medir la distancia $d$ entre dos puntos $A$ y $B$ en ambas orillas de un río se emplea un teodolito (Fig. 1.2). Se escoge un tercer punto $C$ en la orilla del topógrafo y se dirigen visuales con el teodolito en $B$ y en $C$ para medir los ángulos $\theta_1$ y $\theta_2$ †. La longitud $b$ de la línea base $BC$ se mide con una cadena y una varilla graduada, del modo descrito anteriormente. A partir de estas medidas puede calcularse $d$ utilizando la ley de los senos.

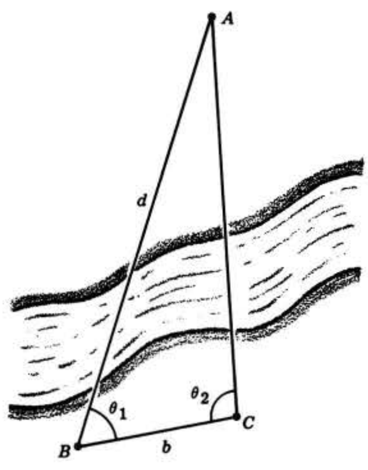



**FIGURA 1.2**
**La distancia $d$ entre los puntos $A$ y $B$ a una y otra orilla de un río se halla midiendo la distancia $b$ y los ángulos $\theta_1$ y $\theta_2$.**

† $\theta$ es la letra griega theta.

Sin embargo, en este libro evitaremos la trigonometría tanto como nos sea posible, y problemas como éste los resolveremos *gráficamente* haciendo un dibujo a escala.

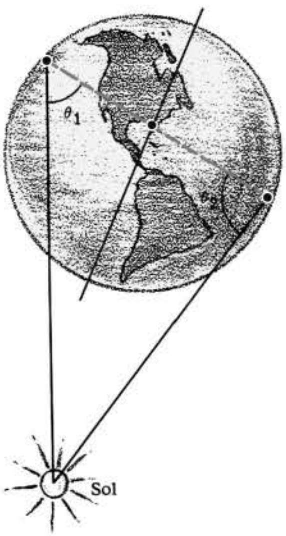



FIGURA 1.3
La distancia al Sol se halla midiendo los ángulos $\theta_1$ y $\theta_2$ desde dos puntos situados sobre la Tierra y cuya separación se conoce.

**Ejemplo 2.** ¿Cuál es la distancia $d$ de la fig. 1.2, sabiendo que $b = 0{,}50$ km, $\theta_1 = 80°$, y $\theta_2 = 85°$?

Un dibujo a escala se empieza eligiendo una escala apropiada. En este ejemplo, si $b = 0{,}5$ km, se puede usar la escala

$$10 \text{ cm} = 1 \text{ km}$$

Con esta escala se traza una línea $BC$ de 5 cm de larga. Para dibujar las líneas que forman los ángulos $\theta_1$ y $\theta_2$ desde los puntos $B$ y $C$ se emplea un transportador; las líneas se prolongan hasta que se cortan en el punto $A$. Por último, se mide la distancia $AB$ con una regla y se hace la conversión inversa a las unidades originales. Por ejemplo, supongamos que se obtiene para $AB$ 19,2 cm. Según nuestra escala, el factor de conversión es 0,1 km/cm, luego

$$19{,}2 \text{ cm} = 19{,}2 \text{ cm} \times 0{,}1 \text{ km/cm} = 1{,}92 \text{ km}$$

El método gráfico no es tan exacto como el trigonométrico, pero conceptualmente es mucho más simple y se adapta perfectamente a la mayoría de nuestros fines. Al final de este capítulo se dan algunos problemas de topografía como preparación para los vectores del capítulo siguiente.

Las grandes distancias sobre la Tierra se miden mediante una serie de *triangulaciones* como ésta, e incluso el tamaño de la Tierra se determina esencialmente de este modo. Una vez que se conoce el tamaño de la Tierra, se puede hallar su distancia al Sol midiendo al mismo tiempo el ángulo del Sol desde dos puntos diferentes de la Tierra y empleando como línea base la distancia conocida entre estos puntos (Fig. 1.3). La distancia al Sol se utiliza entonces para medir la distancia a una estrella (cercana) tomando como línea base el diámetro de la órbita Tierra-Sol (Fig. 1.4). De este modo, incluso las medidas astronómicas están relacionadas, a menudo a través de un gran número de pasos intermedios, con una medida directa de distancia hecha con cadena y varilla graduada.

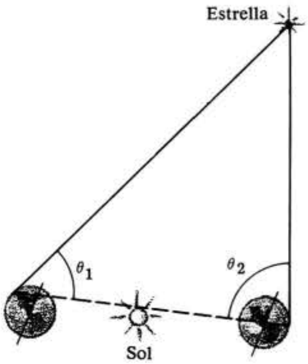



FIGURA 1.4
La distancia a una estrella se halla utilizando el diámetro de la órbita Tierra-Sol como línea base.

Otros conceptos necesitan otros métodos de medida. El tiempo es particularmente sutil. Para medir el tiempo es necesario un dispositivo que repita de manera continua cierto suceso, de tal modo que el intervalo entre dos sucesos pueda tomarse como la unidad de tiempo. Para este fin resulta muy conveniente la rotación de la Tierra sobre su eje, y la unidad de tiempo sería el día sideral, es decir, el tiempo que tarda una determinada estrella en pasar por el cenit en dos noches sucesivas. (Éste no es igual al día solar medio, o de 24 horas, que es el tiempo entre dos pasos sucesivos del Sol por el cenit promediado sobre el año.)

Los relojes son dispositivos mecánicos construidos para repetir un suceso una y otra vez. Se calibran comparándolos con la rotación de la Tierra, y las discrepancias entre el reloj y la Tierra se atribuyen a inexactitudes en uno u otra. Los relojes atómicos son más exactos que la Tierra, la cual no gira con absoluta uniformidad debido a la fricción de las mareas.

La unidad normal de tiempo es el *segundo* (s), que es 1/86 400 del día solar medio en el año 1900. Éste no es igual a 1/86 400 de un día cualquiera de 24 horas porque la velocidad de rotación de la Tierra ha cambiado desde 1900. La Tierra, al igual que un reloj, se retrasa un poco, y para corregir esto se añadió un segundo extra al día 30 de julio de 1972.*

La longitud y el tiempo son dos dimensiones fundamentales en la Física. Solamente introduciremos otras tres dimensiones fundamentales (masa, temperatura y carga); todas las demás se definirán en función de éstas. Por ejemplo, la velocidad (media) $v$ de un automóvil en una carrera es la distancia $d$ recorrida por el automóvil (obtenida midiendo la pista de carreras y el número de vueltas efectuadas) dividida por el tiempo total empleado (medido con un cronógrafo). En general, la velocidad media se define por la ecuación

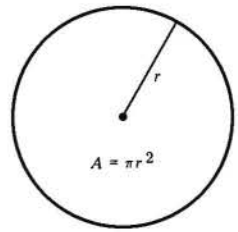


**FIGURA 1.5**
**Círculo de radio *r*.**

$$v = d/t$$

Las *dimensiones* de una magnitud física son los símbolos de las magnitudes fundamentales (o derivadas) que la definen. Designamos las dimensiones de una magnitud escribiendo dichos símbolos entre corchetes. Así, las dimensiones de longitud y tiempo son simplemente $[l]$ y $[t]$, y las dimensiones de velocidad se obtienen de su definición como longitud dividida por tiempo, o $[l/t]$.

Las dimensiones de área y volumen también están relacionadas con $[l]$. Para medir el área (o el volumen) de alguna cosa se requieren ciertas medidas de longitud y algunos cálculos matemáticos. Así, el área de un círculo requiere la medida de su radio $r$ (Fig. 1.5). Si $r = 2{,}5$ m, el área $A$ es

$$A = \pi r^2 = \pi \times (2{,}5\ \text{m})^2 = 6{,}25\pi\ \text{m}^2 = 19.6\ \text{m}^2$$

La unidad en este caso es el metro cuadrado (m²) y la dimensión es $[l^2]$. Análogamente la unidad de volumen es el metro cúbico (m³) y la dimensión es $[l^3]$.

Por ejemplo, el volumen de una esfera de radio 2,5 m es

$$V = \frac{4\pi}{3} r^3 = \frac{4\pi}{3} \times (2{,}5\ \text{m})^3$$
$$= \frac{4\pi}{3} \times 15{,}6\ \text{m}^3 = 65{,}4\ \text{m}^3$$

Como hicimos notar anteriormente, se pueden utilizar diversas unidades para medir el área y el volumen, pero la dimensión de cada una de estas magnitudes es siempre la misma.

* Desde 1967 el segundo ha sido definido por medio de un reloj de cesio, que es un reloj atómico controlado por transiciones electrónicas del cesio. Asimismo, el metro se define actualmente como 1 650 763,73 veces la longitud de onda en el vacío de la luz anaranjada emitida por el criptón al ser excitado eléctricamente.

## 1.3. PRECISIÓN, CIFRAS SIGNIFICATIVAS Y ERROR EXPERIMENTAL

Existe un límite en la precisión de una medida cualquiera, que depende del equipo utilizado y de la habilidad del experimentador. Por ejemplo, si para medir el tamaño de este libro se utilizase una regla graduada en centímetros y décimas de centímetro, es decir, milímetros, el resultado tendría una precisión de 0,1 cm, la división más pequeña de la regla. Si se hubiese de medir la longitud de una habitación, la precisión sería probablemente más pequeña porque la regla tendría que deslizarse a lo largo del suelo, como mostraba la Fig. 1.1. En cada paso se ha de marcar sobre el suelo la posición del extremo de la regla, lo cual introduce en la medida una fuente adicional de error.

La determinación de la precisión de una medida es tan importante como la medida misma, y cada experimentador debería dar el resultado de su medida y una estimación de su precisión. Una medida del tamaño de este libro podría expresarse como $24{,}2 \pm 0{,}1$ cm. El símbolo $\pm$ (que se lee «más o menos») quiere decir que la longitud real se cree que está comprendida entre 24,1 y 24,3 cm. La cantidad 0,1 cm es la *incertidumbre* o *error* en la *medida*.

Existen dos clases distintas de error que pueden entrar en una medida, errores *accidentales* y errores *sistemáticos*. Se introduce un error accidental cada vez que la regla graduada se desliza por el suelo al medir la longitud de la habitación. La marca hecha en el suelo para indicar el extremo de la regla no puede ponerse nunca exactamente en el extremo, sino que quedará más bien un poquito a un lado u otro. Una vez que la regla se desplaza, se introduce otro error accidental cuando la parte delantera de la regla se alinea con la marca trazada. Otra vez la regla quedará ligeramente a un lado u otro de la marca. La característica de un error accidental es que tan probable es hacer el resultado final demasiado grande como demasiado pequeño. Los errores accidentales son inevitables, pero con un trabajo bastante penoso se pueden hacer muy pequeños. Así, repitiendo una medida un gran número de veces y promediando los resultados, disminuiremos mucho los errores accidentales.

Normalmente, un error sistemático es el resultado de un defecto en el equipo o en el procedimiento experimental. Al medir la longitud de la habitación habrá un error sistemático si la regla graduada es un poco más larga que 1 m (instrumento defectuoso) o si la marca se hace de tal manera que queda siempre delante de la regla (procedimiento defectuoso). En cualquiera de los dos casos, la medida daría una longitud menor que la verdadera longitud de la habitación por muchas veces que la repitiéramos. El único modo de detectar y eliminar los errores sistemáticos en un experimento es comprobar una y otra vez los instrumentos y el procedimiento.

A veces, el error indicado por un experimentador es únicamente su estimación del error accidental. No hay procedimiento razonable para hacer la estimación de un error sistemático ya que si se sospecha que existe uno, el experimentador, de ordinario, volvería atrás y repetiría su trabajo hasta eliminarlo.

A menudo no es necesario indicar explícitamente el error asociado a un número medido puesto que, por convenio, la cantidad de dígitos empleados para expresar el número indica aproximadamente el error.

Si la longitud de este libro se da como 24,2 cm sin la estimación del error, habría que suponer que la longitud verdadera se halla probablemente entre 24,15 y 25,25 cm, es decir, que el error es del orden de 0,05 cm. Aunque en este caso el error es en realidad de 0,1 cm, la diferencia entre estos dos tipos de estimación del error carece de importancia en la mayoría de los casos. De ordinario es suficiente conocer el número de *cifras significativas* en una medida.

El número de cifras significativas es el número de dígitos dignos de confianza en la medida. Hay tres cifras significativas en la longitud 24,2 cm, puesto que incluso se sabe que el último dígito es 1, 2 o 3, y no, con toda seguridad, 5, 6 o 7. Sería incorrecto dar como resultado 24,20 cm, porque esto implicaría que la medida era exacta hasta cuatro cifras significativas. Pero en este caso nada se sabe acerca del último dígito, que podría ser tanto 3 (p. ej., 24,23) como 7 (por ejemplo, 24,17).

Cuando se trata de grandes números, puede surgir un problema al indicar el número de cifras significativas de modo correcto. Por ejemplo, la distancia desde la Tierra al Sol es de unos 149 500 000 km. ¿Cuántas cifras son significativas? La distancia no se conoce con seguridad hasta el medio kilómetro (de modo que no todos los ceros pueden ser significativos), pero se puede conocer dentro del intervalo $\pm 5000$ km (así que el primer cero después del 5 sería significativo). Para evitar malentendidos es conveniente a menudo utilizar potencias de 10 para expresar un número como el anterior. El número se da entonces en la forma $149{,}50 \times 10^6$ km. El primer factor indica todas las cifras significativas y el segundo dice cuántos lugares hacia la derecha ha de correrse la coma decimal. (En el Apéndice I se discute el uso de las potencias de 10 con más detalle.)

En el transcurso de un cálculo, el número de dígitos puede aumentar más allá de lo significativo del resultado. En tal caso, el número final se redondearía para dejar solamente las cifras significativas.

**Ejemplo.** Supongamos de nuevo que como longitud de este libro se obtiene $24{,}2 \pm 0{,}1$ cm y como anchura $19{,}5 \pm 0{,}1$ cm. A partir de estas medidas se calcula el área del libro que es

$$24{,}2 \text{ cm} \times 19{,}5 \text{ cm} = 471{,}90 \text{ cm}^2$$

Sin embargo, no todos los dígitos del resultado final pueden ser significativos. En un extremo, la longitud puede ser realmente 24,3 cm y la anchura 19,6 cm, de modo que el área es unos 476 cm². En el otro extremo, la longitud puede ser sólo de 24,1 cm y la anchura de 19,4 cm y, así, el área es de unos 468 cm² solamente.

Como regla general, el resultado de un cálculo no puede tener más cifras significativas que dígitos hay en la cifra menos significativa utilizada en el cálculo. En este último ejemplo, los dos números que intervenían en el cálculo tenían cada uno tres cifras significativas, de modo que el resultado final debería redondearse a tres cifras significativas y expresarse como 472 cm².

**OBSERVACIÓN.** El uso de cifras significativas para indicar la precisión de un resultado no es tan exacto como dar los errores reales, pero es suficiente para la mayoría de nuestros fines. En el último ejemplo, pongamos por caso, es discutible si el último dígito de 472 es realmente significativo. No es necesario discutir esto aquí. El punto importante es que los dos últimos dígitos de 471,90 no son sin duda alguna significativos.

Algunas magnitudes que son fundamentales en la Física se miden de nuevo cada pocos años, cuando se dispone de nuevas técnicas para mejorar la precisión. Por ejemplo, la velocidad de la luz en el espacio vacío (el vacío) es una constante universal de la naturaleza, y su determinación exacta es importante en muchas áreas de la Física y la Astronomía. La velocidad de la luz se expresa corrientemente en kilómetros por segundo (km/s) y se halla midiendo la distancia que una vibración luminosa recorre en 1 s. En 1862 encontró Foucault que la velocidad era de $298\,000 \pm 500$ km/s, o, como deberíamos escribirla, $(2{,}980 \pm 0{,}005) \times 10^5$ km/s. Obsérvese que el primer cero después del 8 es significativo y los otros no.

Desde 1862 la velocidad de la luz ha sido medida con precisión creciente por un gran número de investigadores. La Tabla 1.1 recoge algunas de estas medidas para mostrar cómo el número de cifras significativas ha aumentado a lo largo de los años. Las medidas más recientes no corrigen, en general, a las más antiguas sino aumentan solamente la precisión del resultado.

Una interesante excepción a esto es la medición de 1935 realizada por Michelson, Pease y Pearson. Su resultado difiere de la medición de Grosse de 1967 en 18 km/s, o sea, 9 veces su error estimado. Para reducir el error accidental a sólo 2 km/s repitieron su medida más de 2000 veces. Desgraciadamente tuvieron en su experimento un insospechado y considerable error sistemático que sólo se hizo evidente cuando en los años cincuenta se llevaron a cabo medidas aún más precisas.

TABLA 1.1. **Velocidad de la luz medida por diversos investigadores.**

| Fecha | Investigador | Medición, km/s |
|---|---|---|
| 1676 | Römer | 220 000 ± ? |
| 1849 | Fizeau | 313 300 ± ? |
| 1862 | Foucault | 298 000 ± 500 |
| 1875 | Cornu | 299 990 ± 200 |
| 1880 | Michelson | 299 910 ± 50 |
| 1883 | Newcomb | 299 860 ± 30 |
| 1926 | Michelson | 299 796 ± 4 |
| 1928 | Helstaedt | 299 778 ± 10 |
| 1935 | Michelson, Pease y Pearson | 299 774 ± 2 |
| 1941 | Anderson | 299 776 ± 6 |
| 1949 | Aslakson | 299 792 ± 3,5 |
| 1950 | Essen | 299 792,5 ± 1,0 |
| 1952 | Froome | 299 792,6 ± 0,7 |
| 1953 | MacKenzie | 299 792,4 ± 0,5 |
| 1957 | Bergstrand | 299 792,85 ± 0,16 |
| 1958 | Froome | 299 792,50 ± 0,10 |
| 1967 | Grosse | 299 792,50 ± 0,05 |

Todo experimento se ve rondado por la posibilidad de un serio error sistemático. Un buen investigador tiene conocimiento de esto y hace todo lo que puede para comprobar su experimento. Pero la comprobación final sólo viene después de que el experimento es repetido independientemente por alguien más.

## 1.4. ESCALA: UNA INTRODUCCIÓN AL ANALISIS MATEMATICO

Un interesante problema biológico, que puede ser investigado por simple análisis matemático, es de qué modo está relacionado el tamaño de una estructura con su función. Por ejemplo, ¿es posible tener una sola célula tan grande como una hormiga o una hormiga tan grande como un hombre, o vienen determinados los tamaños de estas estructuras por su función? Éstas son cuestiones de *escala*, es decir, cuestiones acerca de cómo las propiedades de las estructuras dependen de su tamaño.

La respuesta a tales preguntas requiere un conocimiento de cómo varían con el tamaño de un objeto las magnitudes geométricas básicas de longitud, área y volumen. En la Fig. 1.6 se muestran dos cubos $C$ y $C'$ de distinto tamaño. La longitud de una arista del cubo $C'$ es doble de la de una arista del cubo $C$. Decimos que el cubo $C'$ es mayor que el cubo $C$, con un *factor de escala* $L$, siendo $L$ igual a 2 en este caso. El factor de escala es la razón de longitudes correspondientes en dos figuras semejantes.

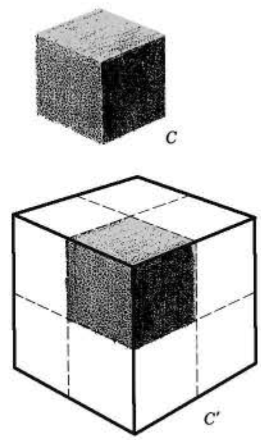



**FIGURA 1.6**
**Dos cubos de tamaño diferente. Una arista de $C'$ tiene dos veces la longitud de una arista de $C$.**

Si en lugar de longitudes comparamos áreas, es evidente que una cara del cubo $C'$ tiene 4 veces el área de una cara del cubo $C$: la razón de estas áreas es $L^2 = 2^2 = 4$. Por otro lado, el volumen del cubo $C'$ es 8 veces el volumen del cubo $C$: la razón de estos volúmenes es $L^3 = 2^3 = 8$.

Este resultado, obvio para un cubo, es también cierto para dos figuras semejantes cualesquiera, prescindiendo de la forma. La Fig. 1.7 muestra dos figuras semejantes de distinto tamaño. El factor de escala es la razón de las longitudes correspondientes de las figuras; por ejemplo,

$$L = \frac{d'}{d}$$

(Puesto que las dos figuras son semejantes, el factor de escala $L$ es el mismo para dos longitudes correspondientes cualesquiera.) La razón de dos áreas correspondientes cualesquiera, es decir, la razón de las áreas de las secciones transversales $A$ y $A'$, indicadas en la Fig. 1.7, es $A'/A = L^2$. La razón de los volúmenes $V$ y $V'$ de las dos figuras es $V'/V = L^3$.

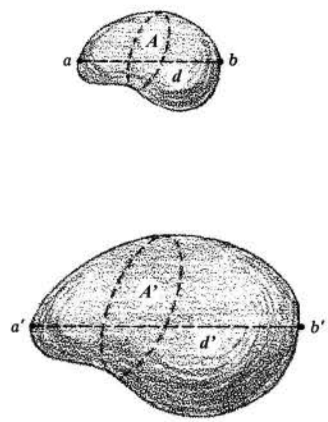



**FIGURA 1.7**
**Dos figuras semejantes de tamaño diferente.**

La importancia de estas relaciones geométricas procede del hecho de que ciertas propiedades físicas de un cuerpo dependen del volumen y otras dependen del área. La razón de tales propiedades dependerá por lo tanto del tamaño del cuerpo. Por ejemplo, el peso de un animal es proporcional a su volumen. Ello significa que los pesos W y W' de dos animales de la misma forma pueden escribirse como

$$W = aV \qquad \text{y} \qquad W' = aV'$$

con la misma *constante de proporcionalidad* $a$ para cada uno. En consecuencia, la razón entre los pesos de los animales es igual al cociente entre sus volúmenes

$$W'/W = aV'/aV = V'/V = L^3$$

**Fuerza relativa**


FIGURA 1.8
Dos hormigas de forma semejante pero distinto tamaño.

La Fig. 1.8 muestra dos hormigas de forma y material idénticos. La hormiga gigante tiene un factor de escala $L = d/d'$ con respecto a la hormiga normal y, por consiguiente, la hormiga gigante pesa $L^3$ veces lo que la hormiga normal:

$$\text{Peso de una hormiga gigante} = L^3 \times \text{peso de una hormiga normal}$$

Por otro lado, la fuerza de una hormiga (o de cualquier otro organismo) depende solamente del área de la sección transversal de sus músculos. (Pensemos en un levantador de pesos. La longitud de sus brazos es normal, pero el área de la sección transversal de sus brazos es extraordinariamente grande. Todo su incremento de fuerza procede del incremento del área de la sección transversal de sus músculos.) Por lo tanto, la hormiga gigante será $L^2$ veces más fuerte que la hormiga normal y será capaz de levantar $L^2$ veces el peso que levante ésta:

$$\text{Peso que puede levantar la hormiga gigante} = L^2 \times \text{peso que puede levantar la hormiga normal}$$

La *fuerza relativa* de un animal se define como la razón del peso que el animal puede levantar al propio peso del animal. De las relaciones anteriores tenemos para estas magnitudes

$$\begin{aligned}
&\text{Fuerza relativa de una hormiga gigante} = \\
&= \frac{\text{peso que puede levantar}}{\text{peso de la hormiga gigante}} \\
&= \frac{L^2 \times \text{peso que puede levantar la hormiga normal}}{L^3 \times \text{peso de la hormiga normal}} \\
&= \frac{\text{peso que puede levantar la hormiga normal}}{L \times \text{peso de la hormiga normal}} \\
&= \frac{1}{L} \times \text{fuerza relativa de una hormiga normal.}
\end{aligned}$$

Esto significa que la fuerza relativa de la hormiga gigante es más pequeña que la de la hormiga normal en un factor $1/L$.

A menudo se dice que una hormiga es más fuerte que un hombre porque ésta puede levantar 3 veces su peso mientras que un hombre sólo puede levantar alrededor de la mitad de su propio peso; es decir, la fuerza relativa de una hormiga normal es 3 y la de un hombre es 0,5. Sin embargo, es erróneo llegar a la conclusión de que la hormiga es más fuerte; la hormiga tiene una fuerza relativa mayor a causa precisamente de su pequeño tamaño. Para comparar realmente la fuerza de una hormiga con la de un hombre, se debe tener en cuenta la diferencia de tamaños.

Una hormiga normal es de 1,2 cm de larga y un hombre de 180 cm. Una hormiga gigante del tamaño de un hombre tendría el factor de escala

$$L = \frac{180 \text{ cm}}{1{,}2 \text{ cm}} = 150$$

respecto a una hormiga normal. La fuerza relativa de esta hormiga del tamaño de un hombre sería solamente.

$$\frac{1}{L} \times \text{fuerza relativa de una hormiga normal} = \frac{1}{150} \times 3 = \frac{1}{50}$$

que es mucho menor que la fuerza relativa de un hombre. Por consiguiente, una hormiga es intrínsecamente más débil que un hombre. De hecho, una hormiga de tamaño humano no es una criatura biológicamente viable: puesto que sólo podría levantar un cuarenta y ochoavo de su peso, o sea, no podría ni siquiera levantar sus propias patas para subir encima de pequeños obstáculos.

Lo que hemos dicho acerca de la fuerza de los músculos se aplica también a los huesos y a cualquier otro material estructural. Para un animal de forma dada, la fuerza de sus huesos con respecto a su propio peso depende de su tamaño, y cuanto mayor es el animal más pequeña es su fuerza relativa. Encontramos en la naturaleza que la forma de los animales grandes es muy diferente de la de los más pequeños. En la Fig. 1.9 se representa un perro y un elefante dibujados al mismo tamaño. El espesor de las patas del elefante es mayor que el de las del perro. Un animal del tamaño de un elefante no puede tener la forma de un perro porque la razón, fuerza de los huesos: peso del cuerpo, sería demasiado pequeña. Los huesos y músculos de los animales grandes deben ser desproporcionadamente más anchos que los huesos y músculos de los animales pequeños.

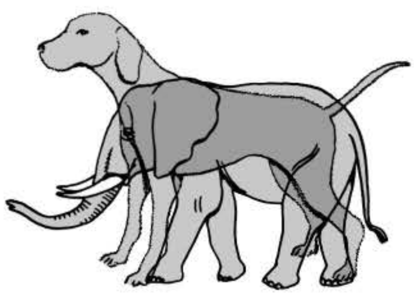


**FIGURA 1.9**
**Un perro y un elefante dibujados al mismo tamaño.**

**División celular**

El problema de escala de otras propiedades puede estudiarse del mismo modo. En posteriores capítulos consideraremos la dependencia del tamaño de cosas tales como la rapidez de un corredor, la velocidad de vibración y la potencia suministrada. Ahora aplicaremos los principios de escala a otros problemas: ¿Por qué se dividen las células cuando alcanzan un cierto tamaño?

Para simplificar consideremos una célula esférica. La Fig. 1.10 muestra dos células en diferentes etapas de crecimiento. El factor de escala de la célula más vieja (la mayor) con respecto a la más joven (la más pequeña) es $L = R'/R$ donde $R$ y $R'$ son los radios de las dos células. El volumen de la célula más vieja es $L^3$ veces el volumen de la más joven. Esto quiere decir que la célula más vieja tiene $L^3$ veces el material de metabolismo de la más joven y que necesita por minuto $L^3$ veces el oxígeno (y otras sustancias vitales) que requiere la más joven:

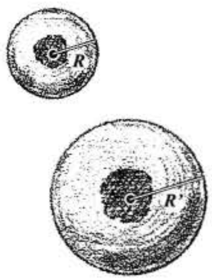



**FIGURA 1.10**
**Dos células esféricas en diferentes etapas de crecimiento.**

Necesidad de oxígeno/minuto de la célula más vieja =
$= L^3 \times$ necesidad de oxígeno/minuto de la célula más joven

Todo el oxígeno consumido por la célula debe pasar a través de la pared de la misma, de modo que la cantidad máxima de oxígeno que puede obtener la célula por minuto es proporcional al área de la pared celular. Así, la célula más vieja puede obtener a lo sumo $L^2$ veces el oxígeno que obtiene la más joven por minuto:

Cantidad máxima de oxígeno que obtiene por minuto la célula más vieja =

$= L^2 \times$ cantidad máxima de oxígeno que obtiene por minuto la más joven.

La razón entre la cantidad máxima de oxígeno que se puede obtener y el oxígeno necesario recibe el nombre de *factor de viabilidad*. Para que la célula sobreviva debe ser evidentemente mayor que 1. De las relaciones anteriores es fácil ver que

Factor de viabilidad de la célula más vieja =

$$= \frac{1}{L} \times \text{factor de viabilidad de la célula más joven.}$$

Una célula joven tiene un factor de viabilidad mayor que 1. La última relación muestra que cuando la célula crece, su factor de viabilidad disminuye y se aproxima a 1. A fin de evitar la asfixia, la célula debe detener su crecimiento o dividirse. Por medio de la división, la célula grande con un factor de viabilidad pequeño es reemplazada por dos células más pequeñas, cada una de ellas con un factor de viabilidad mayor.

Esta discusión de las escalas ha tenido por objeto mostrar que para comprender algunos rasgos generales de los sistemas vivos hay que tener algunos conocimientos de Matemáticas y Física. A medida que los principios de la Física se vayan desarrollando en este libro se aplicarán a otros problemas de Biología y Medicina.

## PROBLEMAS

1. (*a*) Convertir 30 pies en pulgadas. (*b*) Convertir 12 m en pies. (*c*) Convertir 7,5 pulgadas en cm. (*d*) Convertir 150 gal en litros.
*Resp.* (*a*) 360 pulg; (*b*) 39,4 pies; (*c*) 19,0 centímetros; (*d*) 568 l.
2. (*a*) ¿Cuál es la conversión de pies cuadrados en pulgadas cuadradas, es decir, cuántas pulgadas cuadradas hay en 1 pie$^2$? (*b*) ¿Cuál es la conversión de pies cúbicos en pulgadas cúbicas?
3. (*a*) ¿Cuál es la conversión de metros cuadrados en centímetros cuadrados? (*b*) ¿Cuál es la conversión de metros cúbicos en centímetros cúbicos?
*Resp.* (*a*) 1 m$^2$ = $10^4$ cm$^2$; (*b*) 1 m$^3$ = $10^6$ centímetros cúbicos.
4. (*a*) ¿Cuál es la conversión de metros cuadrados en pies cuadrados? (*b*) ¿Cuál es la conversión de metros cúbicos a pies cúbicos?
5. (*a*) ¿Cuál es el área de un círculo de 3,5 cm de diámetro? (*b*) Convertir el área en metros cuadrados.
*Resp.* (*a*) 9,6 cm$^2$; (*b*) $9{,}6 \times 10^{-4}$ m$^2$.
6. Una habitación tiene 14,5 pies de largo y 9,5 pies de ancho. Hallar el área de la habitación en: (*a*) pies cuadrados, (*b*) pulgadas cuadradas y (*c*) metros cuadrados.
*Resp.* (*a*) 138 pies$^2$; (*b*) $1{,}99 \times 10^4$ pulg$^2$; (*c*) 12,8 m$^2$.
7. Un pie cúbico de agua pesa 62,3 lb. (*a*) ¿Cuánto pesa una pulgada cúbica de agua? (*b*) ¿Cuánto pesa un centímetro cúbico? *Resp* (*a*) 0,0361 lb; (*b*) $2{,}20 \times 10^{-3}$ lb.
8. (*a*) ¿Cuál es el volumen de una esfera de radio 1,3 pies; (*b*) Pasar el volumen a metros cúbicos.
9. Un galón (medida norteamericana de capacidad) de agua pesa 8,33 lb. Hallar el volumen de un galón en: (*a*) pies cúbicos y (*b*) centímetros cúbicos (ver Prob. 8).
*Resp.* (*a*) 0,134 pies$^3$; (*b*) $3{,}79 \times 10^3$ cm$^3$.
10. (*a*) ¿Cuál es el volumen de una célula esférica de $2 \times 10^{-3}$ cm de diámetro? (*b*) ¿Cuál es el peso de la célula, suponiendo que se compone sobre todo de agua? (ver Prob. 7).
11. En Hidrología (la ciencia de la distribución del agua sobre la Tierra) es común la unidad de volumen *acre-pie*, que es el volumen de agua que cubriría 1 acre con una profundidad uniforme de 1 pie. (*a*) Dado que 1 acre = 43 560 pies$^2$, ¿cuántos galones hay en 1 acre-pie? (ver Prob. 9). (*b*) Un chubasco local deja caer 50 acre-pies de agua. ¿Cuál es el peso de este agua?
*Resp.* (*a*) $3{,}25 \times 10^5$ gal; (*b*) $1{,}35 \times 10^8$ lb.
12. En el Cap. 2 se introduce una nueva unidad, el *newton* (N). (*a*) Dado que 1 N = = 0,225 lb, ¿cuál es el peso en newtons de un pie cúbico de agua? (ver Prob. 7) (*b*) ¿Cuál es el peso en newtons de un metro cúbico de agua?
*Resp.* (*a*) 277 N; (*b*) $9{,}78 \times 10^3$ N.
13. Un coche que se desplaza a una velocidad constante de 60 mi/h recorre 60 millas en 1 hora. (*a*) ¿Cuántos pies recorre en 1 h? (recordar, 1 mi = 5280 pies). (*b*) ¿Cuántos pies recorre en 1 s? (*c*) ¿Cuál es la conversión de millas por hora en pies por segundo?
14. (*a*) ¿Cuál es la conversión de millas por hora en kilómetros por hora? (*b*) ¿Cuál es la conversión de millas por hora en metros por segundo?
*Resp.* (*a*) 1 mi/h = 1,61 km/h; (*b*) 1 mi/h = = 0,448 m/s.
15. El corazón bombea sangre a un ritmo de 0,083 l/seg. (*a*) ¿Cuáles son las dimensiones de la velocidad del flujo de sangre? (*b*) Convertir la velocidad de flujo en pies cúbicos por hora, utilizando la tabla de conversiones de la contra cubierta anterior.
*Resp.* (*a*) $[l^3/t]$; (*b*) 10,5 pies$^3$/hora.
16. Un topógrafo desea hallar la distancia desde un punto *B* a otro *A* situado en la orilla opuesta de un río (Fig. 1.2) y para ello mide la línea base *BC* y los ángu-

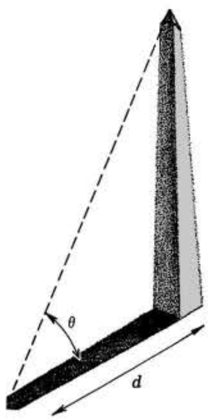


FIGURA 1.11. Problema 17.

los $\theta_1$ y $\theta_2$. Hacer un dibujo a escala y obtener la distancia $BA$, dado que $\theta_1 = 86°$, $\theta_2 = 83°$ y $BC = 0{,}15$ km

17 Un obelisco (Fig. 1.11) proyecta una sombra de longitud $d = 12$ m. Al mismo tiempo se halla que el ángulo $\theta$ es 75°. ¿Cuál es la altura del obelisco?
*Resp.* 45 m.

18. Un hombre camina 2 millas hacia el norte y después, tras girar 45°, camina otras 5 millas hacia el nordeste. ¿Cuál es la distancia en línea recta entre el comienzo y el final del paseo?

19. Al medir la altura de un hombre se obtiene 5 pies 11 pulg con una imprecisión de 0,5 pulg. Expresar su altura en pies conservando sólo las cifras significativas.
*Resp.* 5,92 pies.

20. Mediante medidas topográficas se han obtenido las dimensiones de una parcela rectangular: $1235 \pm 25$ pies de larga y $736 \pm 15$ pies de ancha. Calcular el área del terreno en pies cuadrados y expresar el resultado de manera que se ponga de manifiesto de forma adecuada el número de cifras significativas.

21. El censo de 1970 cifraba la población de Boston en 627 776 habitantes. Este número puede diferir en un 2 % de la población verdadera en ese año. Dar la población de Boston de modo que se indique adecuadamente el número correcto de cifras significativas.
*Resp.* $6{,}3 \times 10^5$.

22. En el estudio de una droga, se alimentan 50 ratones con una dieta diaria que incluye 50 mg (1 mg = 1 milígramo = $10^{-3}$ g) de droga X, mientras que un grupo de control de 50 ratones se alimenta con la misma dieta pero sin la droga. Diariamente se hacen medidas del peso de cada ratón. Hacer una lista de posibles fuentes de error en este experimento y señalar qué errores son accidentales y cuáles sistemáticos. No dé nada por sentado, porque en la práctica cualquier error imaginable puede ocurrir (y a menudo ocurre).

23. Una mujer de 1,55 m de alta pesa 50 kg. ¿Cuánto pesaría una mujer de 1,70 m y forma semejante?
*Resp.* 65 kg.

24. Una célula esférica de radio $R'$ se divide en dos células hijas iguales de radio $R$ cada una de ellas. (*a*) Hallar el factor de escala $L = R'/R$. (*b*) ¿Cuál es la razón, área de la superficie de las dos células hijas : área de la superficie de la célula madre? (*c*) Si el factor de viabilidad de la madre es 1, ¿cuál es el factor de viabilidad de cada célula hija?

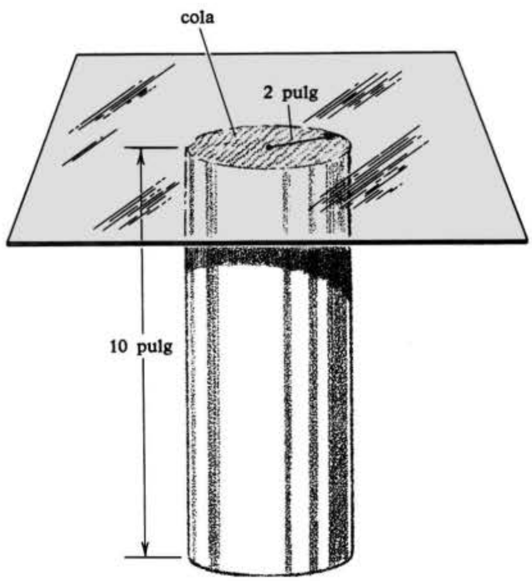



FIGURA 1.12. Problema 25.

25. Un cilindro de latón de 10 pulg de alto y 2 pulg de radio pesa 4 lb y está pegado a la cara inferior de un tablero horizontal, como se muestra en la Fig. 1.12. La cola tiene una resistencia máxima de 2 lb/pulg². Si a la superficie encolada se aplica una fuerza mayor que ese valor máximo, se romperá la cola. (*a*) ¿Cuál es en este caso la resistencia máxima de la superficie encolada? (*b*) ¿Cuál es el peso de un cilindro semejante de latón 10 veces más grande(es decir, con un factor de escala $L = 10$)? (*c*) ¿Puede la misma cola mantener unido a la superficie horizontal el cilindro más grueso?
*Resp.* (*a*) 25,1 lb; (*b*) 4000 lb; (*c*) no.

26. Los mamíferos terrestres varían de tamaño desde la musaraña enana (2 pulg de larga) al elefante de la India (130 pulg). Discutir los factores que impiden que los mamíferos sean apreciablemente más grandes o más pequeños que éstos.