

JAMES KAKALIOS

LA FÍSICA DE LOS
SUPERHÉROES

Prólogo por Lawrence M. Krauss,
autor de *La física de Star Trek*

Traducción de Pedro Crespo
(doctor ingeniero industrial)

MA
NON
TROPPO

SECCIÓN I

Mecánica |

1. ¡Arriba, arriba y fuera!

FUERZAS Y MOVIMIENTO

La concepción original de Superman por parte de Jerry Siegel y Joseph Shuster era la de un héroe con una generosa dosis de ciencia ficción añadida para prestar un aire de plausibilidad a la gran fuerza de su personaje. Tal como se describe en el número 1 de *Superman*, Jor-El, un científico del lejano planeta Krypton, descubre que su mundo está próximo a estallar y que toda su población morirá. Poseyendo solamente un pequeño prototipo de cohete espacial, él y su mujer deciden salvar a su bebé, Kal-El, enviándolo a la Tierra y librándolo así de compartir su destino.¹³ Después de viajar grandes distancias a través de la vastedad del espacio, el cohete cae en la Tierra con su único pasajero en buenas condiciones. Descubierta por unos granjeros sin hijos de Kansas, los Kent, Kal-El es llevado inmediatamente a un orfanato. Más tarde, impulsados por un sentimiento de culpa, los Kent regresaron al orfanato (donde el superbebé estaba haciendo estragos), lo adoptaron, le pusieron por nombre Clark y lo educaron como a su propio hijo humano. A medida que Kal-Clark Kent crecía hasta hacerse adulto, desarrollaba unas capacidades extraordinarias con las cuales mantuvo su lucha sin fin por la verdad, la justicia y el estilo de vida americano.

La causa de los poderes de Superman en la Tierra fue atribuida inicialmente a su proveniencia de Krypton, específicamente al hecho de que su planeta de origen tenía una gravedad mucho más fuerte que la de la Tierra. Así, por ejemplo, el tamaño mucho menor de la Luna en comparación con la Tierra, da como resultado un

13. Como padre, siento cierta afinidad con Jor-El. En muchas ocasiones he estado tentado de meter a mis hijos en un cohete y enviarlos al espacio profundo.

campo gravitatorio mucho menor, de modo que los objetos en la Luna pesan menos que en la Tierra. Como consecuencia de ello, un terrícola cuyos músculos y huesos están adaptados a la gravedad terrestre es capaz de saltar distancias mayores y levantar objetos mucho más masivos sobre la superficie lunar. De modo parecido, la gran fuerza de Superman («más potente que una locomotora») y su piel más resistente (para atravesarla hacía falta «más que el disparo de un cañón») eran el resultado de su cambio de situación en un planeta con una gravedad mucho más débil que la de Krypton. Aunque Superman fue enviado a la Tierra cuando niño, probablemente su ADN kryptoniano estaba codificado para el desarrollo de músculos y huesos apropiados a un campo gravitatorio más intenso.

A finales de la década de 1940, Superman habría obtenido el poder de volar y era capaz de elegir y alterar su trayectoria después de abandonar el suelo. En este punto puede considerarse que Superman había alcanzado el libre albedrío en relación con las leyes de la física. Con el tiempo adquirió un conjunto de otras capacidades que pudieran no estar razonablemente justificadas por la gravedad más intensa de su planeta de procedencia. Esos poderes incluían diversos modos de visión (calor, rayos X y otros), superoído, superrespiración (exhalación o soplido), e incluso superhipnotismo.¹⁴

El origen de los poderes de Superman fue revisado posteriormente, en el número 262 de *Action Comics*, para aducir que las fantásticas capacidades de nuestro héroe provenían del hecho de que la Tierra orbitaba en derredor de un sol amarillo, a diferencia del sol rojo de Krypton. El color de un sol es una función tanto de la temperatura de su superficie como de la atmósfera a través de la cual se ve. La parte azul del espectro solar es dispersada en gran proporción por la atmósfera, lo cual es la razón por la cual el cielo se ve azul. Visto de frente nuestro sol se ve amarillo porque la atmósfera es también más absorbente en la parte azul del espectro, excepto durante el alba o el ocaso, cuando la posición del sol está baja en el

14. Este último poder fue añadido para explicar por qué solamente un simple par de gafas creaban un disfraz tan perfecto que nadie se percató nunca de que el apacible reportero Clark Kent y el mundialmente famoso Superman eran la misma persona. Como se describe en el número 330 de *Superman*, éste hipnotizaba de forma aparentemente subconsciente a todos aquellos que lo veían para hacerles creer que su cara era completamente distinta de la de Clark Kent.

horizonte y su luz debe viajar una gran distancia a través de la atmósfera. Casi todas las longitudes de onda se absorben en ese caso excepto las de la luz roja, de menor energía, que es lo que proporciona a las puestas de sol su tono característico (el mayor número de partículas en el aire al final del día comparado con el comienzo del mismo también contribuye a la diferencia de matices entre el ocaso y el amanecer).

Esas características espectrales son en su mayor parte independientes de la composición química de los gases que forman la atmósfera terrestre. No hay ningún mecanismo físico por el cual un desplazamiento en la longitud de onda principal de la luz del sol desde el amarillo (una longitud de onda de unos 570 nanómetros, o 570 mil millonésimas de metro) a la luz roja (650 nanómetros) pueda dotar a alguien con la capacidad de doblar el acero con sus propias manos. Por lo tanto en esa etapa de su historia, Superman dejó de ser una tira de ciencia ficción y se convirtió en un cómic protagonizado por un héroe fantástico. El cambio del origen de un superhéroe con el fin de acomodarlo a nuevos poderes o circunstancias ocurre tan frecuentemente en los cómics que los aficionados han acuñado un término, *retconning*, para referirse a esta continuidad de reparación retroactiva.¹⁵

Curiosamente, los adversarios de Superman pasaron por una evolución parecida más o menos al mismo tiempo. En los primeros años de los cómics de *Action* y *Superman*, Siegel y Shuster se hicieron eco de las fantasías de revancha de sus jóvenes y económicamente desfavorecidos lectores de la era de la Depresión. Superman utilizó primero sus poderes para luchar contra corruptos propietarios de casas, dueños de minas de carbón, fabricantes de armas e intrigantes de Washington. En estas primeras historias, nuestro héroe atormentó psicológicamente a un conspirador sujetándolo mientras caían ambos desde un edificio alto. En esta primera etapa de su carrera, el argumento dejaba ver que solamente muy pocos sabían de la existencia de Superman, y el político intrigante creía

15. Retcon es acrónimo de *retroactive continuity*, idea utilizada por primera vez en 1983 por el escritor de cómics Ray Thomas, quien dijo haberla escuchado en una convención. El término se refiere a los cambios que se efectúan a posteriori en una obra en serie y que afectan a hechos anteriores. Estos cambios se producen debido a nuevos guionistas o para adaptarse a las demandas del público. La abreviación *retcon* se debe a Damian Cugley (USENET, 1988) (*N. del T.*)

que la caída sería fatal. Así divulgaba voluntariamente la información en pos de la cual estaba Superman, antes de arriesgarse a sufrir otra caída semejante. Hacia los años cincuenta, además de vender millones de ejemplares mensualmente, Superman se había convertido en una estrella de seriales de radio, de cortometrajes (tanto animados como con actores de carne y hueso), y de un popular programa de televisión. Por esa época sus adversarios se transformaron en expertos criminales con cuerpos y vestidos coloristas, tales como Toyman, Prankster y Lex Luthor, cuyos planes para grandes robos o para el dominio del mundo (o, en el caso de Brainiac, de la galaxia) fue capaz de frustrar Superman a la vez que conseguía mantener a salvo de perturbaciones la estructura de los poderes corporativos. Para estar a la altura de las capacidades en aumento de los villanos a los que se oponía, Superman entró en una especie de carrera de armamento de superpoderes, llegando a ser tan poderoso andando el tiempo que resultó difícil para los escritores el urdir amenazas creíbles para desafiar sus capacidades casi divinas. Los fragmentos radiactivos de su planeta de origen, conocidos como kriptonita, llegaron a ser un recurso frecuente para ampliar cualquier historia más allá de la primera página del cómic.¹⁶

El Superman más simple y original de la Edad Dorada, el último hijo de Krypton, es el que deseo considerar aquí.

La física del salto y demás movimientos

En los primeros años de esta historia del cómic, Superman era incapaz de volar, aunque podía simplemente «saltar por encima de

16. Cómo podía afectarlo tan intensamente un elemento radiactivo de su planeta nativo, mientras permanecía inmune a los isótopos radiactivos encontrados en la Tierra es más un asunto de condición literaria que uno de plausibilidad física. La kriptonita fue presentada por primera vez en el serial de radio *Adventures of Superman*, emitido en 1943, cuando el actor de radio que representaba al hombre de acero necesitó unas vacaciones al estar extenuado por sobrecarga de trabajo. Los guionistas de la radio crearon el castigo mineral de Superman de forma que otro actor pudiera representar al dañado superhéroe gimiendo ante el micrófono. Algunos años más tarde los guionistas del cómic adoptaron y adaptaron este recurso creativo, y se presentó todo un arco iris de kriptonita (verde, roja, dorada, plateada y otras) con un amplio espectro de efectos sobre Superman.

edificios altos de un solo brinco», gracias a la más débil gravedad de la Tierra.

Bien, ¿cuán alto podía saltar? De acuerdo con su historia original en el número 1 de *Superman*, el rango estaba en torno a unos 200 metros. Suponiendo que pudiera saltar esta altura en línea recta, esto equivale aproximadamente a la altura de un edificio de unos treinta o cuarenta pisos, lo cual en 1938 se consideraba bastante alto. Así pues nuestra cuestión se puede formular de la siguiente manera: ¿qué velocidad inicial necesitaría Superman, saltando desde la acera, para elevarse verticalmente 200 metros?

Tanto si describimos la trayectoria del hombre de acero que salta o de la pelota lanzada de nuestro ejemplo anterior, debemos empezar con las tres leyes del movimiento tal como fueron descritas por primera vez por Isaac Newton a mediados del siglo XVII. Esas leyes se expresan frecuentemente en la forma: *a)* un objeto permanece en reposo, o si se mueve lo hace siguiendo una línea recta, si no existen fuerzas externas actuando sobre el mismo; *b)* si se aplica una fuerza externa, el movimiento del objeto cambia en cierta magnitud y dirección, y la proporción del cambio del movimiento (su aceleración) multiplicada por la masa del objeto es igual a la fuerza aplicada; y *c)* por cada fuerza aplicada a un objeto existe otra igual y opuesta ejercida por el propio objeto. Las dos primeras leyes se pueden expresar sucintamente a través de una sencilla ecuación matemática:

$$\text{Fuerza} = \text{masa} \times \text{aceleración}$$

Es decir, la fuerza F aplicada a un objeto es igual a la resultante de multiplicar el cambio en la velocidad del objeto (su aceleración) por la masa del mismo m , o sea $F = m a$.

La aceleración es una medida de la proporción del cambio de la velocidad de un objeto. Un coche que arranque desde el reposo (velocidad = 0) y acelere hasta 96 km/h tendrá un cambio de velocidad de 96 km/h - 0 km/h = 96 km/h. La aceleración se calcula, pues, dividiendo el cambio en la velocidad por el tiempo necesario para efectuar dicho cambio. Cuanto mayor sea el tiempo, menor será la aceleración necesaria para un cambio determinado de velocidad. Un automóvil que pase de 0 a 96 km/h en seis segundos tendrá una aceleración mucho más grande que si hace lo mismo en seis horas o en seis días. La velocidad final será la misma en los tres

casos, a saber 96 km/h, pero la aceleración será radicalmente distinta debido a los distintos tiempos necesarios para producir ese cambio en la velocidad. Según la fórmula de Newton $F = m a$, la fuerza necesaria para crear la aceleración mayor (la primera) es obviamente mayor que la requerida para la última (la menor).

Cuando la aceleración es cero, no hay cambio en el movimiento. En tal caso un objeto en movimiento se mantiene siguiendo una línea recta o bien, si está quieto, permanece en reposo. A partir de la expresión $F = m a$, cuando $a = 0$, la fuerza es $F = 0$, que viene a ser la primera ley de Newton del movimiento.

Aunque pueda ser directo desde un punto de vista matemático, desde la perspectiva del sentido común esto es nada menos que revolucionario. Newton afirma (correctamente) que si un objeto está en movimiento y no actúa sobre él ninguna fuerza externa, entonces el objeto seguirá moviéndose en línea recta. Sin embargo, usted y yo, e Isaac Newton por lo que a esto respecta, ¡nunca hemos visto que esto ocurra! Nuestra experiencia diaria nos dice que para conseguir que algo siga moviéndose debemos siempre seguir empujándolo bien directamente o a través de una fuerza externa. Un coche en movimiento no sigue moviéndose a menos que mantenemos apretado el pedal del acelerador, lo que en último término proporciona una fuerza. Naturalmente, la razón de que objetos en movimiento disminuyan su velocidad y terminen parándose cuando dejamos de empujarlos o de tirar de ellos es que hay fuerzas de fricción y la resistencia del aire que se oponen al movimiento del objeto. El hecho de que dejemos de empujar o de tirar no significa, en el mundo real, que dejen de existir fuerzas actuando sobre el objeto. No hay nada equivocado en las leyes de Newton —basta con que nos aseguremos de tener en cuenta el rozamiento y la resistencia del aire al aplicarlas—. Son estas inadvertidas «fuerzas de rozamiento» las que debemos vencer para mantener el movimiento uniforme. Una vez que nuestro empuje o tracción equilibra el rozamiento o la fricción del aire, la fuerza neta sobre el objeto es cero, y éste continuará moviéndose en línea recta. El aumento de la tracción o del empuje producirá una fuerza *neta* distinta de cero en la dirección de nuestra tracción o empuje. En este caso habrá una aceleración proporcional a la fuerza neta. La constante de proporcionalidad que relaciona la fuerza con la aceleración es la masa m , que refleja la resistencia que opone el objeto al cambio de su movimiento. Vale la pena indicar aquí que la masa no es lo mismo que

el peso. El «peso» es otra forma de llamar a la «fuerza ejercida sobre un objeto por la gravedad». La masa, por otra parte, es una medida de cuánta materia («átomos» para los especialistas) contiene un objeto. La masa de los átomos contenidos en un objeto es lo que le proporciona su «inercia», término elegante para describir su resistencia al cambio cuando se aplica una fuerza. Incluso en el espacio exterior, la masa de un objeto es la misma que en la superficie de la Tierra, debido a que el número y el tipo de átomos que contiene no cambia. Un objeto en el espacio exterior podría carecer de peso, en el caso de que esté sujeto a una fuerza atractiva insignificante por parte de planetas de su entorno, pero seguirá resistiendo a los cambios en su movimiento, debido a su masa. Un astronauta que viaje por el espacio no puede sujetar y lanzar lejos de sí una estación espacial (suponiendo que tenga una plataforma en la que apoyarse), a pesar de que tanto la estación como los que están en su interior carecen de peso. La masa de la estación espacial es tan grande que la fuerza que pueden aplicar los músculos del astronauta solamente producirá una aceleración irrelevante.

En el caso de objetos en la superficie de la Tierra (o de cualquier otro planeta, por lo que a esta consideración se refiere) la aceleración debida a la gravedad se representa mediante la letra **g** (trataremos de ello enseguida). La fuerza que la gravedad ejerce sobre el objeto de masa **m** se designará en lo que sigue como su **Peso**. Es decir, **Peso = (masa) × (aceleración debida a la gravedad)**, o bien **P = m g**, que es precisamente otro modo de indicar **F = m a** cuando **a = g**. La masa es una propiedad intrínseca de cualquier objeto, y se mide en kilogramos en el sistema métrico, mientras que **Peso** representa la fuerza ejercida sobre el objeto debido a la gravedad, y se mide en libras en Estados Unidos. En Europa, el peso se expresa generalmente en kilogramos, lo cual no es estrictamente correcto,¹⁷ pero es más fácil de decir que «kgm/s²», la unidad de fuerza en el sistema métrico, también conocida como «Newton». Cuando algo que pesa un Newton en el sistema métrico se compara con un objeto que pesa una libra en Estados Unidos, la conversión establece la *equivalencia de 2,2 libras por kilogramo*. Digo «equivalente» y no «igual» porque una libra es una

17. Este inconveniente se soluciona hablando de kilogramos de fuerza o kilopondios, o simplemente de kilos o incluso de kilogramos sin más cuando el contexto está claro. (*N. del T.*)

unidad de fuerza, mientras que el kilogramo mide la masa. Un objeto pesará menos de 1 kilopondio en la Luna y más de 1 kilopondio en Júpiter, pero su masa será siempre de 1 kilogramo. Al calcular fuerzas en el sistema métrico nos referiremos a los kg m/s^2 en lugar de a Newtons, para tener presente que cualquier fuerza se puede describir siempre mediante $F = m a$.

En resumen, la masa de Superman en un momento dado es una constante, debido a que refleja cuántos átomos hay en su cuerpo. Su peso, sin embargo, es una función de la atracción gravitatoria entre él y cualquiera que sea la masa grande sobre la que está situado. Superman tiene un peso más grande en la superficie de Júpiter, o un peso menor sobre la Luna, comparado con su peso en la Tierra, pero su masa permanece inalterada. La atracción gravitatoria de un planeta o satélite decrece a medida que uno se aleja del astro, aunque nunca es exactamente cero a menos que uno esté infinitamente alejado del astro. Es tentador igualar la masa con el peso, y es fácil hacerlo cuando se trata solamente de objetos sobre la Tierra, ya que la aceleración debida a la gravedad es siempre la misma. Como pronto compararemos el peso de Superman en Krypton con el que tiene en la Tierra, resistiremos esta tentación.

Por último, la tercera ley del movimiento simplemente explicita la noción de sentido común de que cuando uno hace fuerza sobre algo, eso lo empuja a uno en sentido contrario. Esto se expresa a veces diciendo que «para cada acción existe siempre una reacción igual y opuesta». Usted solamente se puede sostener reclinado sobre la pared si la pared lo soporta a usted, es decir si lo empuja con una fuerza igual y opuesta. Si la fuerza no fuera exactamente igual en el sentido opuesto, entonces habría una fuerza no nula, lo que conduciría a una aceleración que haría que se golpee contra la pared. Cuando el astronauta antes mencionado empuja la estación orbital en el espacio, la fuerza ejercida por sus músculos proporciona una aceleración pequeña a la estación, pero la estación lo empuja a él hacia atrás, y su aceleración es mucho mayor, dado que su masa es mucho menor.

Imagine que Superman y Hulk están sujetando el uno contra el otro unas básculas de baño (que son simplemente aparatos para medir una fuerza, es decir su peso debido a la gravedad). Cuando empujan contra la báscula del otro, no importa lo fuerte que Superman empuje por la izquierda, si permanece quieto, entonces la báscula de Hulk a la derecha indicará exactamente la misma fuerza. Es

más, con independencia de lo fuerte que Superman esté empujando, su báscula medirá cero libras de fuerza si Hulk no ofrece resistencia y desplaza su báscula del trayecto y se aparta de él.¹⁸ *Las fuerzas siempre van por pares*, y usted no puede empujar o tirar de algo a menos que ello le empuje o tire en sentido contrario. Cuando usted está en la acera, sus pies ejercen una fuerza sobre el suelo debido a que la gravedad está tirando de usted hacia el centro de la Tierra. La gente del lado opuesto del planeta no cae debido a que la gravedad tira de cada uno hacia el centro del planeta, con independencia de dónde estén situados. Usted no acelera mientras permanece de pie; el suelo proporciona una fuerza opuesta y exactamente igual a su peso. Durante el breve momento en que Superman salta, sus piernas ejercen una fuerza mayor que su peso normal. Debido a que las fuerzas van por pares, su empuje sobre el pavimento provoca que el pavimento lo empuje a su vez a él. Así experimenta una fuerza ascendente que lo eleva arriba y fuera.

Y así es: todas las leyes del movimiento de Newton pueden resumirse en dos ideas sencillas: que cualquier cambio en el movimiento puede resultar solamente de una fuerza externa ($F = m a$), y que las fuerzas van por pares. Esto será todo lo que necesitamos para describir todos los movimientos, desde el más sencillo al más complejo, desde una pelota lanzada hasta las órbitas de los planetas. De hecho, ya tenemos suficiente física como para calcular la velocidad inicial que necesita Superman para saltar por encima de un edificio alto.

De un solo salto

Superman comienza con una gran velocidad inicial (fig. 4). En la cima de su salto (una altura $h = 200$ metros por encima del terreno), su velocidad final debe ser cero, o bien este no sería el punto más alto de su salto, y seguiría subiendo. La razón por la que Superman se va frenando es que una fuerza externa, es decir la gravedad, actúa sobre él. Esta fuerza actúa en sentido descendente, hacia la superficie de la Tierra, y se opone a su elevación. Por consiguiente la aceleración en este caso es realmente una deceleración que lo frena, hasta los 200

18. Hulk es más listo de lo que todos piensan (su alter ego es un físico, después de todo).

metros, en que queda quieto. Imagine que está patinando sobre hielo con un viento fuerte y constante. Inicialmente usted empuja sobre el hielo y se empieza a mover rápidamente en contra del viento. Pero el viento ejerce una fuerza continua que se opone a su movimiento. Si usted no sigue empujando de nuevo, entonces este viento constante lo irá frenando hasta que ya no se mueva más y quede quieto. Pero el viento lo sigue empujando todavía, de modo que seguirá teniendo una aceleración y ahora empezará a deslizarse hacia atrás por el camino de donde procedía. En el instante en que alcance su posición de salida, se estará moviendo tan deprisa como cuando empezó, solamente que ahora lo hará en sentido opuesto. Este viento constante en la dirección horizontal le afecta como patinador del mismo modo que la gravedad actúa sobre Superman cuando salta. La fuerza de la gravedad es la misma al comienzo, en medio y en el punto más alto de su salto. Puesto que $F = m a$, su aceleración es igualmente la misma en todo momento. Con el fin de determinar qué velocidad inicial necesita Superman para saltar 200 metros, debemos comprender cómo cambia su velocidad en presencia de una aceleración constante g en sentido descendente.

Como indicaría el sentido común, cuanto más alto desea saltar uno, mayor ha de ser la velocidad de despegue. ¿Cómo están relacionadas exactamente la velocidad inicial y la altura final? Bien, cuando uno viaja, la distancia recorrida es justamente el producto de su velocidad media por la duración en el tiempo de su viaje.



Fig. 4. Viñeta del n.º 1 de *Superman* (junio de 1939) que muestra a Superman en el proceso de lanzarse de un salto... Bueno, ya se sabe.
© 1938 National Periodical Publications Inc. (DC)

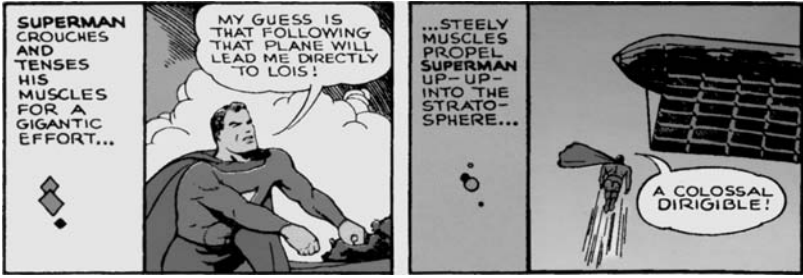
Después de conducir durante una hora con una velocidad media de 96 km/h, se encuentra a 96 kilómetros de su punto de inicio. Debido a que no sabemos cuánto dura el salto de Superman, sino solamente su altura final ($h = 200$ metros), realizamos cierta manipulación algebraica de acuerdo con la definición de que la aceleración es el cambio de la velocidad con respecto al tiempo y que la velocidad es el cambio de la distancia en relación con el tiempo. Cuando todo queda despejado hallamos que la relación entre la velocidad inicial de Superman y la altura final h de su salto es $v \cdot v = v^2 = 2 g h$. Es decir, la altura que Superman es capaz de saltar depende del cuadrado de su velocidad de arranque, de modo que si su velocidad de salida se duplica, se eleva a una altura cuatro veces mayor.

¿Por qué depende la altura que Superman puede saltar del cuadrado de su velocidad inicial? Porque la altura de su salto viene dada por su velocidad multiplicada por el tiempo durante el cual está subiendo en el aire, y el tiempo que pasa subiendo también depende a su vez de su velocidad inicial. Cuando usted aprieta con fuerza los frenos de su coche, cuanto más rápido está conduciendo, más tiempo tarda en frenar del todo. De manera análoga, cuanto más rápido va Superman al comienzo de su salto, más tiempo emplea la gravedad en frenarlo hasta reducir la velocidad a cero (que corresponde a la parte más alta de su salto). Valiéndonos del hecho de que la aceleración (medida experimentalmente) debida a la gravedad g es de 10 metros por segundo al cuadrado (es decir, un objeto dejado caer con velocidad inicial nula tiene una velocidad de 10 m/s al cabo del primer segundo, 20 m/s al final del siguiente segundo, y así sucesivamente) la expresión $v^2 = 2 g h$ nos indica que la velocidad inicial de Superman debe ser de 62,5 m/s para saltar una altura de 200 metros. ¡Esto equivale a 225 km/h! Podemos ver de inmediato por qué nosotros, endebles criaturas humanas, somos incapaces de saltar sobre los rascacielos, y por qué me contento con saltar por encima de una papelera de un solo brinco.

En la discusión anterior hemos utilizado la velocidad media de Superman, que es simplemente la suma de su velocidad inicial (v) y su velocidad final (cero) dividida por dos. En este caso su velocidad media es $v/2$, que es de donde procede el factor 2 antes de la g en $v^2 = 2 g h$. En realidad, tanto la velocidad como la posición de Superman decrecen y aumentan sin cesar, respectivamente, a medida que se eleva.

Para tratar con cantidades que cambian de modo continuo se debería emplear el cálculo (no se preocupe, no lo haré), mientras que hasta ahora solamente he utilizado el álgebra. Para aplicar las leyes del movimiento descritas por él, Isaac Newton tuvo que inventar primero el cálculo antes de poder llevar a cabo sus estimaciones, lo que indudablemente coloca en cierta perspectiva nuestras dificultades con las matemáticas. Por suerte para nosotros, en esta situación, la expresión formalmente correcta y rigurosa hallada mediante el cálculo resulta ser exactamente la obtenida empleando razonamientos relativamente más sencillos, a saber, $v^2 = 2 g h$.

¿Cómo puede conseguir Superman su velocidad inicial de más de 60 m/s? Como se ilustra en la fig. 5, lo hace a través de un proceso mecánico que los físicos llaman «salto». Superman se agacha y aplica una gran fuerza sobre el suelo, haciendo que el suelo lo empuje en sentido contrario (dado que las fuerzas van por pares, conforme con la tercera ley de Newton). Como cabe esperar, hace falta una gran fuerza para saltar con una velocidad inicial de 225 km/h. Para hallar exactamente cuánta fuerza se necesita, utilizamos la segunda ley de Newton del movimiento, $F = m a$, es decir, Fuerza igual a masa multiplicada por aceleración. Si Superman pesa 100 kilopondios sobre la Tierra, tendrá una masa de 100 kilogramos. Así pues, para hallar la fuerza, tenemos que calcular la fuerza cuando pasa de estar parado hasta el momento en que está saltando con una velocidad de 225 km/h. Recuerde que la aceleración describe el cambio en la velocidad dividido por el tiempo durante el cual cambia dicha velocidad. Si el tiempo que Superman emplea empujando sobre el suelo utilizando los músculos de sus piernas es de 1/4 de segundo, entonces su aceleración será el cambio en la velocidad de 240 m/s dividido por el tiempo de 1/4 de segundo, o sea 240 m/s^2 . Esta aceleración correspondería a un automóvil que pasara desde 0 a 96 km/h en una décima de segundo. La aceleración de Superman resulta de la fuerza aplicada por sus músculos de las piernas para elevarlo por el aire. La idea tras $F = m a$ es que para cualquier cambio en el movimiento debe existir una fuerza aplicada, y que cuanto mayor es el cambio mayor ha de ser la fuerza. Si Superman tiene una masa de 100 kilogramos, entonces la fuerza necesaria para permitirle saltar verticalmente 200 metros es $F = m a = (100 \text{ kg}) \times (240 \text{ m/s}^2) = 24.000 \text{ kg m/s}^2$.



Viñeta del n.º 23 de *Action comics*, en la que se describe con cierto detalle el proceso por el cual Superman es capaz de alcanzar las altas velocidades iniciales necesarias para sus poderosos saltos. © 1940 National Periodical Publications Inc. (DC)

¿Es razonable que los músculos de Superman puedan proporcionar una fuerza de 2.400 kilopondios? ¿Por qué no, si la gravedad de Krypton es mayor que la de la Tierra, y los músculos de sus piernas son capaces de soportar su peso sobre Krypton? Calculamos que al efectuar su salto más grande, las piernas de Superman deben ejercer una fuerza de 1.636 kilos. Suponga que esto es un 70 % más de lo que la fuerza de sus piernas suministra mientras está simplemente quieto de pie soportando su peso en Krypton (siendo generosos, pues cuando la mayor parte de la gente salta solamente puede aplicar una fuerza aproximadamente igual a su peso). En este caso, Superman en su planeta de origen pesaría 1.500 kilos. Su peso en Krypton está determinado por su masa y la aceleración debida a la gravedad en Krypton. Suponemos que la masa de Superman es de 100 kilogramos, y ésta es su masa con independencia de en qué planeta se halle. Si Superman pesa 100 kilos en la Tierra y casi 1.500 kilos en Krypton, entonces la aceleración de la gravedad en Krypton deber haber sido 15 veces mayor que la de la Tierra.

Así pues, sabiendo que $F = m a$, haciendo uso de las definiciones «distancia = velocidad \times tiempo» y «la aceleración es el cambio de la velocidad con respecto al tiempo», y la observación experimental de que Superman puede «saltar sobre un edificio alto de un solo brinco», hemos calculado que la gravedad en Krypton debe de haber sido 15 veces mayor que sobre la Tierra.

Enhorabuena. ¡Acaba de realizar un cálculo de física!