

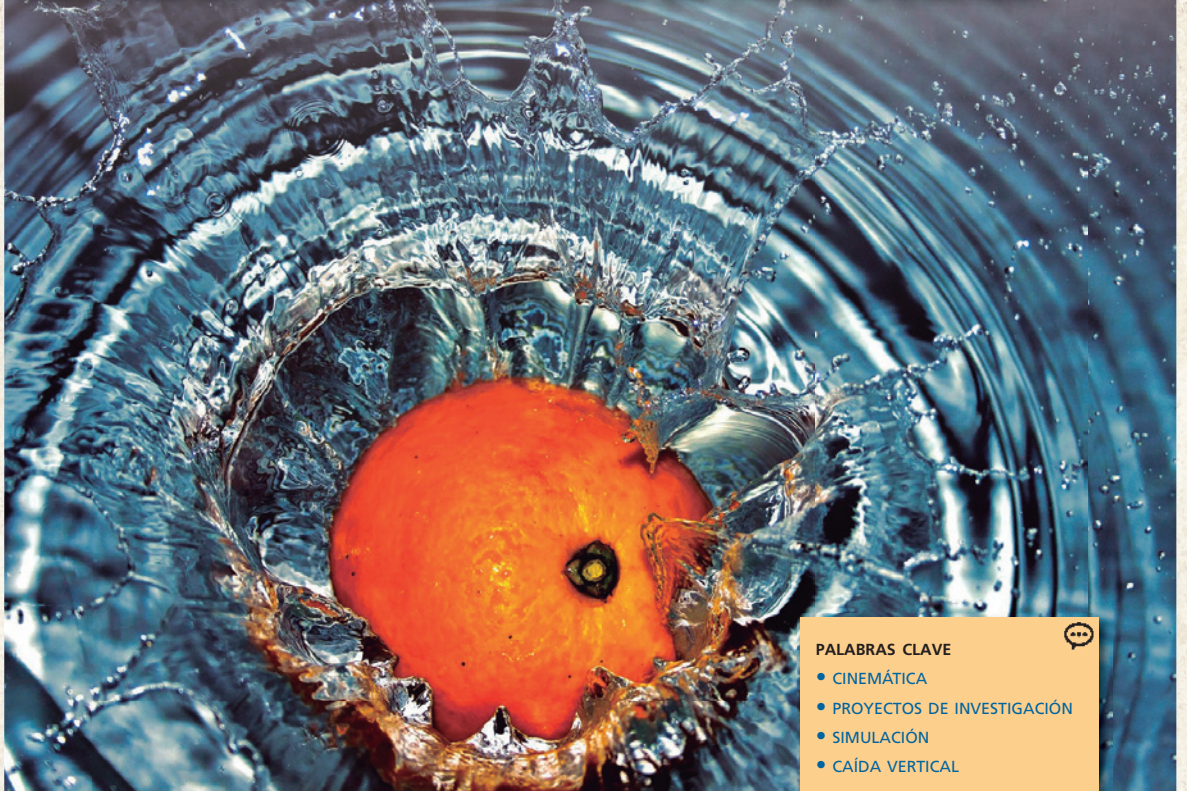


Estudio teórico-experimental de movimientos de caída vertical

Manuel Alonso

Real Sociedad Española de Física. Sección Local de Alicante

Se presenta una secuencia de actividades sobre los movimientos de caída vertical, contextualizada en un modelo de enseñanza-aprendizaje de la física por investigación. Incluye experimentos basados en la comparación entre el movimiento real y una simulación del mismo, que construye el alumnado.



PALABRAS CLAVE

- CINEMÁTICA
- PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN
- SIMULACIÓN
- CAÍDA VERTICAL



En este trabajo se desarrolla un conjunto de actividades para un estudio problematizado de los movimientos de caída vertical. La propuesta se sitúa en un modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación (Furió, 2001), en el que el planteamiento y la resolución de las situaciones permite a los alumnos poner en práctica características propias del razonamiento científico: hipótesis, comunicación y discusión, diseños experimentales, análisis de resultados, etc. El índice del tema y los conceptos se introducen de forma tentativa (Verdú, 2004) y la evaluación se plantea como un instrumento de aprendizaje (Alonso, 1994). A continuación se presentan las actividades desarrolladas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Nos situamos en el tema de cinemática. Después de haber introducido las magnitudes posición, velocidad y aceleración, ligadas a un sistema de referencia, así como los tipos de movimiento más sencillos, sus gráficas y ecuaciones, el estudio de los movimientos de caída puede comenzar con la siguiente actividad:

Actividad 1

¿Qué se puede decir, partiendo de los conocimientos y de las experiencias cotidianas, sobre la caída de los cuerpos?

Agrupamos los comentarios de los alumnos y alumnas alrededor de dos cuestiones: cuál es el tipo de movimiento y qué factores influyen en la duración de la caída. Respecto a la primera, la mayoría

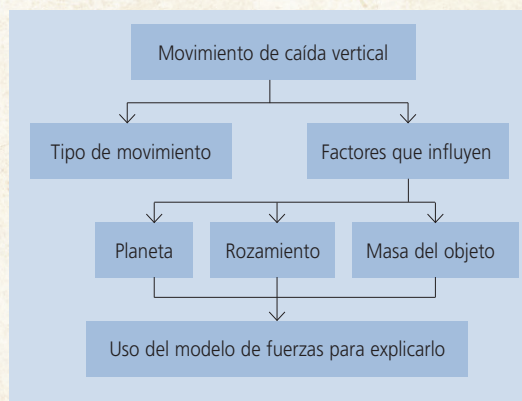
creo que el movimiento es rectilíneo y acelerado, aunque también hay algunos que piensan que es uniforme. En cuanto a los factores influyentes en la duración de la caída, hacemos una síntesis de las hipótesis de los alumnos, considerando: el planeta donde cae el cuerpo, la masa de dicho cuerpo y el rozamiento (forma del cuerpo, densidad del aire...).

Comentamos brevemente la hipótesis sobre la influencia de la masa, que los alumnos expresan diciendo que cuanto mayor sea, más rápida será la caída. Conviene hacer patente que tienen una muy buena razón para hacer esta predicción, pues argumentan que un cuerpo de mayor masa es más atraído por la Tierra. Así es, y lo subrayamos pidiéndoles que cuelguen de un muelle dos cuerpos de masas distintas.

Actividad 2

Realizad un esquema con las cuestiones que convendría incluir en el estudio del movimiento de caída.

El producto de la actividad 1 ayuda a introducir de forma justificada la estructura de la secuencia. Un posible esquema puede verse en el cuadro 1.



Cuadro 1. Estructura de la secuencia de movimiento de caída

Si un cuerpo tiene doble masa que otro, ¿por qué ambos caen igual en ausencia de rozamiento?

TIPO DE MOVIMIENTO

Actividad 3

Dejad caer diferentes objetos y ved su trayectoria.
Uno de ellos es una hoja de papel. Como sigue una trayectoria zigzagueante y totalmente impredecible, planteamos la necesidad de minimizar el rozamiento con el aire, para lograr que el movimiento sea rectilíneo y abordable. A tal fin, los alumnos nos proponen, acertadamente, que arruguemos la hoja dándole una forma esférica. Después de hacerlo, les pedimos que dejen caer simultáneamente la bola de papel y otra bola mucho más pesada (por ejemplo, de aluminio). Cuando observan sorprendidos que ambas caen igual, enunciarnos el siguiente problema, que, por ahora, queda pendiente: ¿por qué si un cuerpo tiene, por ejemplo, doble masa que otro y es atraído con el doble de fuerza, ambos caen igual en ausencia de rozamiento?

Actividad 4

Realización de un experimento con Modellus para constatar las hipótesis acerca del tipo de movimiento y, en su caso, obtener la aceleración.

Para simular un movimiento con este programa¹ se escriben sus ecuaciones y las condiciones iniciales. Hecho esto, se pueden colocar en la pantalla diversos elementos: una partícula móvil, gráficas, cursores para modificar parámetros, etc. En la versión 2.5 (ordenadores de 32 bits) y en la 3 (64 bits) también se puede insertar un clip de vídeo y corre con la animación.

En este experimento, los alumnos y alumnas:

1. Dejan caer una pelotita y filman su movimiento. Antes han señalado una longitud de referencia visible a la cámara (por ejemplo, dos marcas en una pizarra).

2. Insertan el vídeo y obtienen la equivalencia entre píxeles y m en la pantalla.
3. Escriben las ecuaciones que, de acuerdo con sus hipótesis, deben regir el movimiento y crean la simulación.
4. Analizan la concordancia entre el movimiento real y el simulado para contrastar sus hipótesis.

Cuando corre la animación, constatan que la pelotita virtual concuerda con la real solo si el movimiento teórico es uniformemente acelerado y g es del orden de $9,8 \text{ m/s}^2$. En la imagen 1 se muestra una animación que constata que el movimiento de caída es uniformemente acelerado y g es del orden de $9,8 \text{ m/s}^2$. La imagen 2 muestra una animación donde compite la

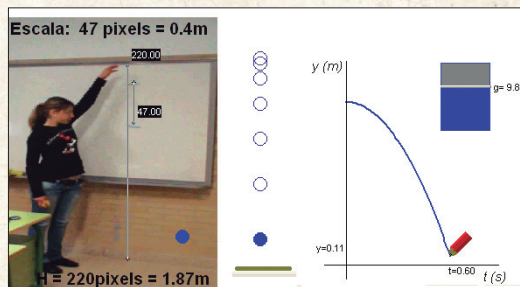


Imagen 1. Caída libre de una pelotita

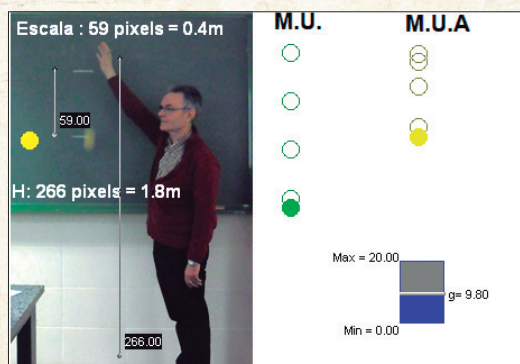


Imagen 2. Caída libre: comprobación del tipo de movimiento

hipótesis del movimiento uniforme (MU) con la del uniformemente acelerado (MUA). La pelota virtual con MUA (amarilla) concuerda en todo instante con la real (una pelota de tenis). La pelota virtual con MU (verde) solo lo hace al inicio y al final de la caída.

INFLUENCIA DEL PLANETA

Un aspecto novedoso que aporta usar un programa de simulación para el análisis experimental del movimiento es que no siempre es necesario reproducirlo.

Actividad 5

Usad un vídeo de la misión Apolo 15 (<https://history.nasa.gov/lalsj/>) para realizar un análisis experimental sobre la caída libre en la Luna.

Obviamente no podemos llevar a los alumnos a la Luna, pero disponemos de la filmación de los astronautas que muestra a uno de ellos realizando el experimento de la caída libre de una pluma y un martillo. Como la Luna no tiene atmósfera, tampoco hay rozamiento y no importa la densidad ni la forma de los dos objetos.

El análisis constata que la gravedad en la superficie lunar es del orden de $1,63 \text{ m/s}^2$ (imagen 3).

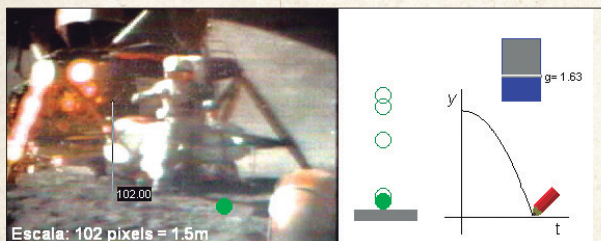


Imagen 3. Experimento de la pluma y el martillo (Apolo 15). Animación sobre la caída libre en la Luna

Realizamos otro análisis similar con un vídeo de Apolo 16, que muestra el salto de un astronauta (la longitud de referencia es la altura de su mochila).

INFLUENCIA DEL ROZAMIENTO

Para poner en evidencia la importancia del rozamiento en el movimiento de caída, planteamos un experimento con el sensor de movimiento.

Actividad 6

Estudad la caída de un recipiente de plástico con un sensor de movimiento: ¿a qué puede deberse la discrepancia entre el valor obtenido de g y su valor teórico para una caída libre?

Interesa que realicen el experimento varios grupos de alumnos y alumnas, para mostrar que, después de que hagan en la gráfica un ajuste cuadrático (acorde con su hipótesis de un movimiento acelerado), todos obtienen, en una caída de poco más de un metro de altura, un valor de g entre 8 m/s^2 y 9 m/s^2 . Como el recipiente de plástico ofrece al aire una superficie amplia, el alumnado deduce que este resultado se puede deber a la influencia del rozamiento.

Actividad 7

Formulad hipótesis sobre los factores que determinan la fuerza de rozamiento con el aire. Luego manipulad la gráfica obtenida en la actividad 6 para ver si en algún tramo se puede despreciar el rozamiento.

Los alumnos viven bastantes experiencias (correr, montar en bicicleta) que les ayudan a plantear la hipótesis de que la fuerza de rozamiento, además de depender de otros factores, como la

forma del objeto, la densidad del aire, etc., es mayor cuanto mayor sea la velocidad a través del aire. Esta velocidad alcanza pronto un valor elevado y entonces disminuye apreciablemente la aceleración. Para mostrarlo, pedimos a los alumnos y alumnas que seleccionen puntos iniciales de la gráfica (imagen 4), donde se aprecia que en los primeros 0,2 s la aceleración es del orden de $9,8 \text{ m/s}^2$ (el doble del coeficiente A del ajuste). A partir de ahí los puntos se desvían de esa caída teórica y evidencian un decrecimiento progresivo de la aceleración.

Actividad 8

Puesto que la fuerza de rozamiento en la caída aumenta al aumentar la velocidad del cuerpo, ¿cómo cabe esperar que evolucione dicha velocidad?

Durante la caída compite la fuerza gravitatoria, casi constante, con la fuerza de rozamiento, que crece progresivamente al aumentar la velocidad del objeto. Por tanto, llega un momento en que ambas fuerzas se equilibran. Desde ese instante el movimiento es uniforme a una velocidad límite.

Actividad 9

Realización de un estudio experimental sobre la velocidad límite con el sensor de movimiento.

■

Durante la caída, la fuerza gravitatoria y la de rozamiento llega un momento en que se equilibran

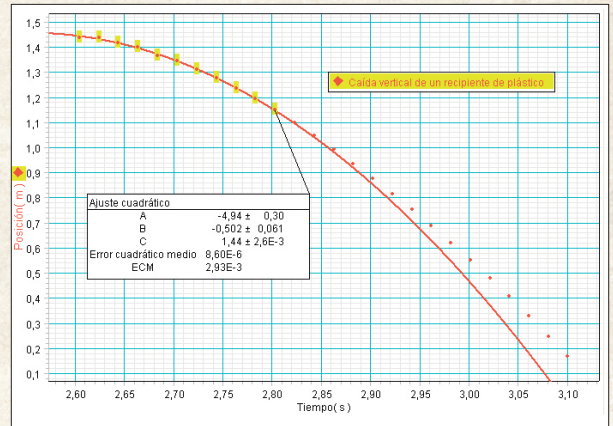


Imagen 4. Análisis de la gráfica experimental de caída de un recipiente de plástico

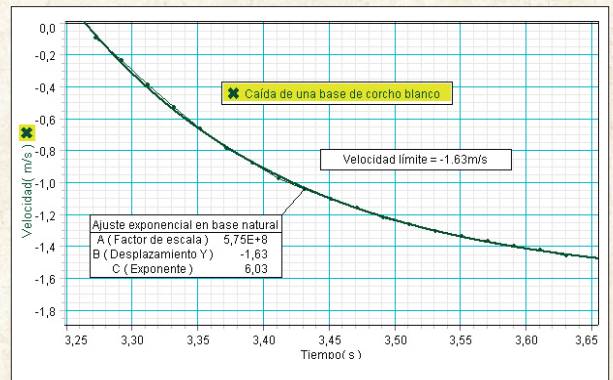


Imagen 5. Velocidad límite de una base de corcho blanco

La imagen 5 procede de un experimento donde los alumnos usaron una base de corcho blanco. También se pueden usar moldes de magdalena de papel, que permiten estudiar la influencia de la masa, sin cambiar la forma y el volumen, juntando más o menos moldes.

Actividad 10

Realización de un experimento con Modells sobre la caída de una bola sumergida en agua.

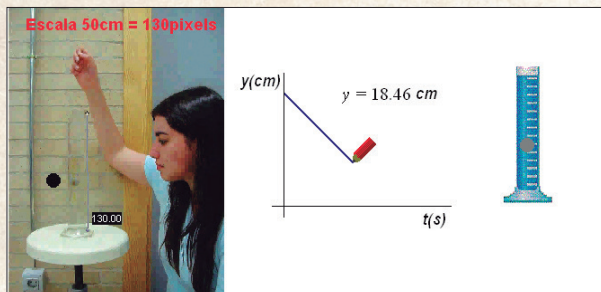


Imagen 6. Análisis experimental de la caída de una bola sumergida en agua

Usamos una bola de densidad próxima a la del agua. En estas condiciones hay que tener en cuenta la fuerza de empuje (despreciable en los estudios anteriores). La bola alcanza casi desde el inicio la velocidad límite y el movimiento es uniforme (imagen 6).

INFLUENCIA DE LA MASA

Para afrontar el problema pendiente sobre la influencia de la masa, los alumnos han de haber estudiado los principios de la dinámica de Newton y la ley de gravitación universal. Esto ocurre en el tema de dinámica, donde planteamos la siguiente actividad.

Actividad 11

Al estudiar la caída libre en cinemática quedó pendiente explicar por qué en ausencia de rozamiento todos los cuerpos caen con la misma aceleración. Tratad de hacerlo ahora usando la ley de gravitación y los principios de la dinámica.

Según la ley de gravitación el módulo de la fuerza de atracción (F_g) entre el cuerpo que cae y la Tierra es proporcional a una propiedad de cada uno de ellos, su masa gravitatoria (M_g y m_g), e inversamen-

te proporcional al cuadrado de la distancia (r) que los separa:

$$F_g = \frac{G \cdot M_g \cdot m_g}{r^2} = m_g \cdot g$$

Este concepto apoya la hipótesis de los alumnos: un cuerpo de doble masa (gravitatoria) es atraído con el doble de fuerza.

Por otro lado, según la tercera ley de Newton la aceleración del cuerpo es proporcional a la fuerza (F_g) e inversamente proporcional a otra propiedad de él: su inercia o masa inercial (m_i):

$$a = \frac{F_g}{m_i}$$

Es decir, un cuerpo de doble masa (inercial), adquiere (sometido a la fuerza gravitatoria) la mitad de aceleración. Los alumnos no disponían de este concepto cuando formularon su hipótesis (actividad 3), y al incorporarlo ahora ven que la aceleración de caída es:

$$a = g = \frac{F_g}{m_i} = \frac{\frac{G \cdot M_g \cdot m_g}{r^2}}{m_i} = \frac{G \cdot M_g}{r^2} \cdot \frac{m_g}{m_i} = g \cdot \frac{m_g}{m_i}$$

Como todos los cuerpos caen libremente con la aceleración g , se deduce que la masa inercial, m_i , y la masa gravitatoria, m_g , se compensan. Esta propiedad es exclusiva de la fuerza gravitatoria y se ha de tener presente al interpretar un gran número de movimientos (Alonso, 1996).

EVALUACIÓN

Planteamos una evaluación concebida como instrumento de aprendizaje, donde las preguntas del «examen global» pertenecen, como todas las actividades, a la secuencia de enseñanza. Por ello, además de requerir de los alumnos que usen con-

ceptos conocidos, les ayudan a construir nuevos conocimientos. En cuanto a su corrección es equivalente a la puesta en común que realizamos en cada actividad «ordinaria».

Actividad 12

Una persona (A) dice que las gotas de lluvia caen con movimiento uniforme. Otra (B) dice que caen con movimiento uniformemente acelerado y $a=9,8 \text{ m/s}^2$. ¿Quién tiene razón?

Los alumnos han de precisar en qué condiciones es correcta cada afirmación, antes de decantarse por la persona A, argumentando que las gotas llegan al suelo a la velocidad límite.

Actividad 13

Un paracaidista se tira desde un avión. Haced una descripción lo más completa posible de su movimiento.

Para corregir esta pregunta hemos construido una animación en la que se abre el paracaídas después de alcanzada la velocidad límite (unos 50 m/s) (imagen 7).

Actividad 14

Dice una leyenda que Galileo dejó caer desde la torre de Pisa una bola de madera y otra de acero. Supuestamente algunos testigos observaron que ambas llegaban juntas al suelo. Expresad la aceleración de las bolas y valorad la veracidad de la leyenda.

Al aplicar la tercera ley de Newton, con las expresiones vistas de la fuerza gravitatoria y de la de rozamiento, se obtiene:

$$a = \frac{F_g - f_r}{m_i} = \frac{m_g \cdot g - k \cdot v}{m_i}$$

Como ahora la masa gravitatoria y la masa inercial no se compensan, las bolas tienen distinta aceleración y no llegan al suelo al mismo tiempo.

Aunque la leyenda suele contar que las dos bolas llegaron juntas al suelo, lo cierto es que Galileo, realizara o no el experimento, dijo en sus diálogos que llegaron con uno o dos cubitos de diferencia (unos 0,5 m), pero destacó que esa diferencia es muchísimo menor que la que se obtendría según Aristóteles, quien había afirmado que si un cuerpo pesa el doble cae el doble de rápido.

Para corregir esta pregunta hemos creado otra animación Modellus. Recrea el experimento con los valores de la altura de la torre y de las densidades de las bolas, si bien aplicando la expresión limitada de una fuerza de rozamiento proporcional a la velocidad (sería más correcto usarla solo al inicio de la caída y la de fuerza proporcional al cuadrado de la velocidad desde que esta alcanza un cierto valor). La diferencia de altura entre las bolas al llegar al suelo depende de sus masas y de la constante de la fuerza de rozamiento (imagen 8, en la página siguiente).

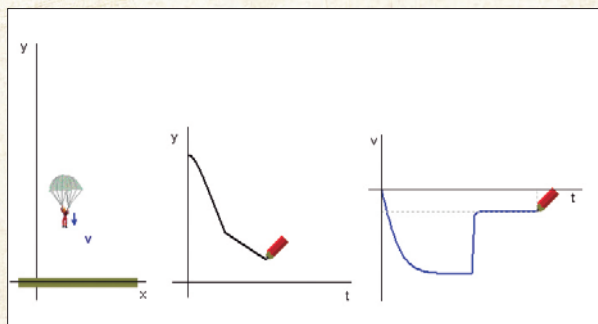


Imagen 7. Animación sobre la caída de un paracaidista

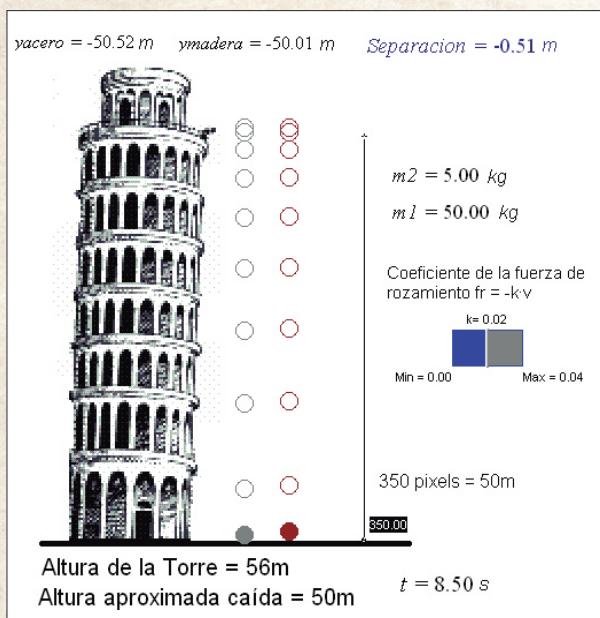


Imagen 8. Animación sobre el experimento de caída desde la torre de Pisa

CONCLUSIONES

Estas actividades se han impartido (adaptando su nivel) entre 3.º de ESO y 1.º de bachillerato, y se han difundido en cursos de formación docente. De los recursos utilizados, destacamos el uso de un programa de simulación para analizar la concordancia entre el movimiento real y el teórico. Esta es una herramienta potente para el análisis experimental, que, como hemos visto, permite a los alumnos: a) expresar hipótesis en lenguaje matemático y gráfico; b) visualizar la posición del objeto a intervalos regulares de tiempo; c) construir un movimiento simulado conforme con las hipótesis; d) contrastar esas hipótesis comparando punto a punto el movimiento simulado y el real; y e) obtener o contrastar parámetros del movimiento. Aunque aquí hemos usado Modellus, lógicamente se puede sustituir este programa por otro que permita unos usos similares (por ejemplo, Openshore). ◀

Nota

1. Todos los materiales (actividades, experimentos, vídeos, animaciones y el programa Modellus) están disponibles en la web de materiales didácticos de la Sección Local de Alicante de la RSEF (<http://rsefalicante.umh.es/fisica.htm>).

Referencias bibliográficas

- ALONSO, M. (1994): *La evaluación en la enseñanza de la física como instrumento de aprendizaje*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- ALONSO, M. (1996): «La enseñanza del concepto de masa a través de un modelo de enseñanza por investigación». *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, núm. 9, pp. 109-119.
- FURIÓ, C. (2001): «La enseñanza-aprendizaje de las ciencias como investigación: un modelo emergente», en GUIASOLA, J.; PÉREZ DE EULATE, B.: *Investigaciones en didáctica de las ciencias experimentales basadas en el modelo enseñanza-aprendizaje como investigación orientada*. Bilbao. Universidad del País Vasco, pp.15-42.
- VERDÚ, R. (2004): *La estructura problematizada de los temas y cursos de física y química como instrumento de mejora de su enseñanza y aprendizaje*. Tesis doctoral. Universitat de València.

Dirección de contacto

Manuel Alonso Sánchez

Real Sociedad Española de Física. Sección Local de Alicante

manuelalonso@inicia.es

Este artículo fue solicitado por ALAMBIQUE. DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, en abril de 2018 y aceptado en octubre de 2018 para su publicación.