

ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LA FÍSICA A TRAVÉS DE LA LECTURA DEL QUIJOTE EN 4.º DE ESO. LAS LEYES DE NEWTON Y LA AVENTURA DE LOS MOLINOS DE VIENTO

TEACHING 10TH GRADE PHYSICS, THROUGH THE READING OF DON QUIXOTE. NEWTON'S LAWS AND THE ADVENTURE OF THE WINDMILLS

Antonio Joaquín Franco Mariscal
IES Juan Ramón Jiménez. Málaga
antoniojoaquin.franco@uca.es

RESUMEN: En este trabajo se presenta el efecto que produce en el aprendizaje de temas de dinámica, respecto a una metodología tradicional de nivel de 4.º de ESO (16 años), el uso de una metodología innovadora basada en la lectura de la famosa aventura de los molinos de viento del Quijote, donde el alumno juega un papel activo, plantea y resuelve sus propios problemas científicos y se convierte en el verdadero protagonista de su aprendizaje. Los resultados obtenidos sugieren que la metodología basada en la lectura es capaz de producir avances, que deben considerarse modestos, en el aprendizaje del concepto de fuerza y de las leyes de Newton. Entre las causas que justifican la mejora en los resultados de aprendizaje se encuentra la mayor implicación del alumno en este tipo de tareas, causada por la motivación que produce el empleo en el aula de una metodología de trabajo diferente a la usual.

PALABRAS CLAVE: dinámica, fuerzas y leyes de Newton, educación secundaria, metodología basada en la lectura, Don Quijote.

ABSTRACT: We present in this paper a new methodology focused on the learning of Dynamics topics through the reading of the famous Quixote's Windmills Adventure. We compare the effect produced in learning by this innovative methodology versus conventional methods in 10th grade students (16 years old). Pupils are given an active role in this new methodology: they become the main protagonists of learning because scientific problems have to be formulated and solved by them. The results obtained suggest that this reading-based methodology is able to produce moderate progress in the learning of the force concept and the Newton's laws. The improvement of the results may be justified by a major implication of the pupils in that type of assignments and the motivation element that produces the use of a different methodology in the class.

KEY WORDS: Dynamics, forces and Newton's laws, secondary education, reading-based methodology, Don Quixote.

Fecha de recepción: julio 2011 • Aceptado: agosto 2012

Franco, J. (2013). Enseñanza y aprendizaje de la física a través de la lectura del Quijote en 4º de ESO. Las Leyes de Newton y la aventura de los molinos de viento, *Enseñanza de las Ciencias*, 31(2), pp. 31-53

MARCO TEÓRICO

Hasta la década de los noventa, la formación científica a edades tempranas se concebía únicamente en su vertiente propedéutica, como preámbulo preparatorio para estudios venideros, desde la hipótesis de que esos alumnos pudieran elegir en el futuro opciones de ciencias y carreras científicas.

En el mundo actual, impregnado de ciencia y tecnología, es difícil pensar en ciudadanos verdaderamente libres si no disfrutan de, al menos, unos conocimientos científicos básicos que les permitan opinar y participar en una sociedad democrática, de forma crítica y constructiva. En este contexto, la orientación propedéutica de la enseñanza de las ciencias resulta insuficiente y elitista, al no responder a otras necesidades personales y sociales (Bybee, 1993), que son las que tienen la mayoría de los alumnos. No podemos olvidar el dato de que solo el 2% de los alumnos optan por estudiar una carrera científica, y que son cada vez menos los que cursan itinerarios científicos en el bachillerato (Acevedo, 2004).

No es de extrañar, por tanto, que la ciencia haya pasado de considerarse como un saber de élite, a contemplarse como una necesidad para cualquier ciudadano y como algo íntimamente ligado a la cultura. Por otra parte, el aprendizaje de las ciencias contribuye al desarrollo de capacidades generales, así como de actitudes y valores necesarios para la formación integral de la persona. En este marco cobran sentido expresiones como «educación científica» o «alfabetización científica», que hacen referencia a la importancia que tiene la generalización del proceso de inmersión científica del total de la ciudadanía (Bybee, 1997; Marco-Stiefel, 2000).

Resulta evidente que es en el periodo obligatorio de la educación (hasta los 16 años) donde la idea de alfabetización científica cobra un especial significado, al cubrir las etapas (infantil, primaria y secundaria obligatoria) comunes para todos los estudiantes, y porque, en realidad, hoy la educación tiende a contemplarse como un proceso a lo largo de toda la vida. Por ello la idea de alfabetización científica excede bastante estos límites de escolarización.

En este sentido, desde una perspectiva amplia de educación científica para la ciudadanía, podemos distinguir distintos contextos a través de los cuales articular el proceso de formación. Por un lado, encontramos los *contextos formales*, que tienen lugar en instituciones educativas, se plantean de una forma altamente estructurada, se destinan a grupos de edad muy definidos y conducen a la obtención de un reconocimiento de las competencias y calificaciones en forma de certificado. Por otro, encontramos los *contextos no formales*, cuyo lugar común se encuentra fuera de las instituciones, normalmente en museos o exposiciones de ciencias, talleres de ciencia recreativa, etc. Esta educación se encuentra parcialmente estructurada y complementa el sistema educativo formal. Finalmente, tenemos los *contextos informales*, que suponen situaciones cotidianas no premeditadas en las que ni siquiera suele tenerse conciencia de estar aprendiendo: la TV, la prensa, el cine, la lectura, los juegos, la familia, los amigos, etc.

Realmente, estos diferentes contextos se solapan, encontrándose escenarios intermedios, tales como las ocasiones en las que en el aula se utilizan medios y recursos provenientes de contextos no formales o informales; también cuando los alumnos, junto a sus profesores, realizan una visita a un centro de ciencias; o cuando se organizan talleres de ciencias en las propias escuelas fuera del espacio lectivo.

La educación no formal y la informal no solo proporcionan algunos recursos poco usuales que superan a los de la oferta escolar, sino que por medio de sus actividades, como ferias o museos interactivos de la ciencia, impulsan nuevos mecanismos para activar la motivación y la curiosidad, actuando como instrumentos emotivos de atracción hacia la ciencia y la tecnología (Vázquez, Acevedo y Massero, 2005).

En definitiva, entre las diferencias más notables entre los contextos formal e informal destaca que, mientras el aprendizaje informal trabaja en un medio de libre elección, no dirigido ni reglado, la educación en ambientes escolares funciona según una estructura que es obligatoria y más dirigida (Wellington, 1991).

Muchos profesores, conscientes de la necesidad del uso de estos contextos, han propuesto en los últimos años diversas experiencias innovadoras enmarcadas dentro de los enfoques que relacionan los entornos académicos de aprendizaje con la enseñanza no formal (Anderson, Lucas y Ginns, 2003) o informal (Worner y Romero, 1998; Perales y Vílchez, 2005; Franco, 2008).

De esta forma, y a modo de ejemplo de propuestas recientes que recurren en el campo de la Física a recursos propios de la enseñanza informal, destaca el estudio de Perales y Vílchez (2005), que investigaron la enseñanza de esta materia a través de dibujos animados, o los trabajos de Worner y Romero (1998) o García (2002), que plantearon problemas de Física a partir de viñetas de cómics.

En el campo de la Química, existen igualmente propuestas interesantes, como los diferentes puzzles educativos diseñados para el aprendizaje de los elementos químicos de la Tabla Periódica, recordando por ejemplo los animales de un zoo (Helsler, 2003), los estados de América (Franco y Cano, 2007) o el material de un laboratorio de química (Franco, 2008); o juegos de naipes para aprender, por ejemplo, las distintas familias de elementos (Franco, Oliva y Bernal, 2012).

En resumen, todas estas propuestas educativas suelen estar orientadas al desarrollo de actitudes positivas hacia las ciencias y su aprendizaje, concretándose, en muchos casos, en recursos y actividades de muy distinto tipo que persiguen acercar la ciencia a la vida cotidiana, mostrar la naturaleza de la ciencia o promover experiencias de aprendizaje gratificantes que desarrollen el gusto por la ciencia y/o el deseo de ser científico. De todas las opciones posibles dentro del marco de enseñanza informal, el presente trabajo se centrará en el uso de la lectura como instrumento metodológico aplicado a la enseñanza de las ciencias, un recurso educativo interesante aunque poco extendido en didáctica de las ciencias.

ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Hace pocos años, Franco (2007a) elaboró el material didáctico *Enseñando Física y Química con ideas quijotescas*, fruto de una experiencia innovadora relacionada con el fomento de la lectura del Quijote y la enseñanza y aprendizaje de las ciencias en la etapa de educación secundaria obligatoria.

El material desarrollado utilizaba fragmentos de textos extraídos de los 52 capítulos que componen la primera parte de la obra *El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha* de Cervantes como elemento de trabajo en la enseñanza-aprendizaje de la Física y la Química en 4.º de ESO, para ayudar al alumnado a desarrollar las estrategias, los procedimientos y las actitudes que debiera poseer todo buen científico. Dicha propuesta, que incluye, por un lado, el material para el alumnado y, por otro, una guía didáctica para el profesor, logró fomentar el interés y el gusto por la lectura entre los estudiantes desde un área no lingüística y obtuvo el segundo Premio Nacional de Innovación Educativa en 2006.

A través del conjunto de actividades y tareas incluidas en dicho material se pueden abordar prácticamente todos los contenidos del currículo de Física y Química de 4.º de ESO. En este sentido, algunos trabajos anteriores (Franco, 2006, 2007b) mostraban cómo el docente puede tratar estos contenidos dentro de las unidades didácticas. De este modo, Franco (2006) expuso algunas estrategias para abordar con éxito el tema «El movimiento» en 4.º de ESO (rectilíneo uniforme, rectilíneo uniformemente acelerado, caída libre y circular uniforme) y en 1.º de bachillerato (circular uniformemente acelerado, tiro horizontal y tiro parabólico) a través de situaciones descritas en los pasajes más característicos del Quijote, mientras que, por otro lado, propuso varios ejemplos referidos a la Química de 3.º de ESO, tales como mezclas y sustancias puras, métodos de separación, los elementos químicos, etc. (Franco, 2007b).

Debido a la extensión del citado proyecto, la evaluación de este se llevó a cabo en una primera fase a nivel cualitativo y global. Las principales conclusiones obtenidas en dicho análisis cualitativo, así como las impresiones y valoraciones personales del docente, parecen indicar que el uso de situaciones extraídas de textos del Quijote se puede emplear como una herramienta adecuada en la enseñanza y el

aprendizaje de los contenidos de Física y Química en la etapa de secundaria, a la vez que es capaz de generar un grado importante de motivación en una amplia fracción del alumnado.

A partir de estos resultados preliminares, hemos creído conveniente desarrollar una segunda fase de la investigación, de carácter cuantitativo, para conocer en qué medida la metodología didáctica utilizada puede contribuir al aprendizaje de los alumnos de secundaria en los diferentes ámbitos de contenidos. En este sentido, la investigación que aquí se presenta muestra el efecto que produce este tipo de recursos innovadores en el aprendizaje de los alumnos de 4.º de ESO respecto a una metodología convencional en uno de los temas –la dinámica– sobre el que se han realizado más investigaciones en torno a las concepciones de los alumnos (Hierrezuelo y Montero, 1991; Moreira, 1994). Concretamente, el presente estudio se centra en las fuerzas y las leyes de Newton.

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Como se ha indicado, este artículo se enmarca dentro de un estudio más amplio que promueve la enseñanza de la Física y Química en la ESO a partir de la lectura del Quijote, la obra más destacada de la literatura española y universal, que conmemoró en 2005 el cuarto centenario de su publicación.

Como sabemos, a principios del siglo XVII, época en que Cervantes escribió su obra más conocida, la gran mayoría de los conocimientos de Física y la totalidad de los de Química (recordemos que esta ciencia se desarrolla a finales del siglo XIX) no se habían descubierto aún. Por esta razón, además de tratarse de una novela y no de un libro para aprender ciencias, en el Quijote no encontraremos aportaciones científicas como tales, sino situaciones cotidianas donde subyacen los principios científicos, que servirán de base al alumno para adquirir aprendizajes.

Objetivo de la investigación

El problema que planteamos en esta investigación consiste en investigar en qué medida una metodología didáctica basada en la lectura puede contribuir al aprendizaje de los alumnos de 4.º de ESO en el ámbito de las fuerzas y las leyes de Newton. De manera más específica, los objetivos didácticos que se persiguen pretenden que el estudiante, al terminar la unidad, sea capaz de:

1. Comprender el concepto de fuerza y conocer sus efectos.
2. Relacionar fuerza y variación en el movimiento.
3. Reconocer las fuerzas que intervienen en situaciones cotidianas.
4. Calcular la resultante de un sistema de fuerzas.
5. Conocer los distintos tipos de fuerza.
6. Identificar las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, generen o no movimiento, y explicar las leyes de la dinámica a las que obedecen.
7. Identificar y dibujar las fuerzas que actúan sobre un cuerpo en movimiento, justificando el origen de cada una e indicando las posibles interacciones del cuerpo en relación con otros cuerpos.
8. Definir y formular los principios de la dinámica.
9. Aplicar los principios de la dinámica a casos cotidianos sencillos.

En este sentido, no entra dentro de nuestros objetivos detenernos en discusiones acerca de las ideas previas o dificultades que encuentran los alumnos en torno a este tema, al ser suficientemente conocidas a través de los numerosos estudios realizados.

Muestra de alumnos

Esta investigación se realizó durante el periodo 2006-2009 con 125 alumnos de 15 y 16 años que estudiaban la asignatura de Física y Química de 4.º de ESO en distintos centros públicos rurales de nivel socioeconómico medio de la provincia de Cádiz (España). Dichos alumnos daban clase con el mismo profesor y pertenecían a dos muestras distintas, a las que denominaremos de aquí en adelante grupo experimental y grupo de control, que diferían en la metodología de trabajo empleada en el aula. El grupo experimental estaba formado por 62 estudiantes y el grupo de control, por 63 alumnos.

Contenidos de la unidad didáctica

Ambos grupos, experimental y de control, desarrollaron la unidad didáctica «Las fuerzas y las leyes de Newton» en doce sesiones de clase de una hora de duración, pero empleando metodologías diferentes.

Los contenidos que se abordaron en ambos casos, así como su secuenciación, fueron los siguientes:

Fuerzas:

Significado físico de una fuerza. Efectos de una fuerza. Identificación de fuerzas. Cálculo de fuerzas. Fuerza resultante.

Leyes de Newton:

Necesidad de una interacción: tercera ley de Newton.

Primera ley de Newton: principio de inercia.

Segunda ley de Newton: ecuación fundamental de la dinámica.

Metodología didáctica en el aula

Metodología de trabajo en el grupo de control

El grupo de control siguió una enseñanza tradicional donde las sesiones se estructuraron mayoritariamente a través de explicaciones teóricas de los contenidos por parte del profesor y la realización de un conjunto de tareas de naturaleza muy variada asociadas a los distintos conceptos. Así, se realizaron algunas actividades para detectar ideas previas, para aplicar o identificar conceptos y también para afianzar los conocimientos adquiridos. Algunas de estas actividades tuvieron carácter cualitativo, aunque solo unas pocas implicaron algún tipo de decisión por parte del alumno y de manera bastante limitada.

Debemos indicar que las actividades propuestas en este grupo fueron seleccionadas cuidadosamente una vez desarrollada la propuesta con el grupo experimental, intentando presentar tareas lo más parecidas posible, pero enfocadas desde el ámbito cotidiano en lugar de desde la lectura.

En concreto, este grupo realizó actividades para comprender los efectos que las fuerzas producen en los cuerpos (por ejemplo, qué ocurre al estirar un muelle o al dar con un taco de billar a una bola...), para identificar fuerzas en situaciones cotidianas representándolas a través de dibujos (por ejemplo, qué fuerzas actúan sobre una persona que conduce un coche o sobre una lámpara colgada del techo) o para aprender a calcular de forma numérica y gráfica la resultante de un sistema de fuerzas (dos chicos tirando de una caja con diferentes ángulos). Por su parte, la primera ley de Newton se trabajó a través de cuestiones teóricas que pretendían que el alumno fuera capaz de identificar la inercia (un pasajero de pie en un autobús que sale disparado hacia delante cuando este frena bruscamente, una pelota que continúa rodando después de empujarla, etc.). Se desarrollaron también actividades numéricas de aplicación de la segunda ley de Newton mediante el cálculo de fuerzas o aceleraciones, así como actividades de identificación de parejas de fuerzas en entornos próximos al alumno para comprender la tercera ley.

Metodología de trabajo en el grupo experimental

La metodología empleada en el grupo experimental se basó en el análisis desde una perspectiva científica del capítulo VIII de la primera parte del Quijote titulado «Del buen suceso que el valeroso Don Quijote tuvo en la espantable y jamás imaginada aventura de los molinos de viento», uno de los episodios más conocidos de la obra cervantina. Como característica principal de esta metodología destaca el papel activo del alumno en las tareas, lo que lo convierte en el verdadero protagonista del aprendizaje.

Dicha metodología se desarrolló en estas etapas:

1. El docente propuso a los estudiantes la lectura del capítulo en casa en el plazo de una semana.
2. Tras su lectura, cada alumno debía proponer un texto de pequeña extensión a partir del cual planteara al grupo clase varias cuestiones o ideas relacionadas con el tema de las fuerzas a las que se pudiera dar una respuesta desde el punto de vista de la Física.
3. De todas las cuestiones propuestas por los estudiantes, se seleccionaron para su discusión en el aula aquellas que el docente consideró más adecuadas para 4.º de ESO.
4. A partir del párrafo elegido, el profesor introdujo de forma teórica los contenidos científicos necesarios para que el alumno fuera capaz de afrontar la resolución de los problemas.
5. Luego, el propio alumnado, tutelado por el docente, planteó formalmente el enunciado de los diferentes problemas, se identificaron las variables implicadas y se asignaron a cada una de ellas los valores más próximos a la realidad para poder resolverlos.
6. Una vez resuelto cada problema, se discutieron los resultados obtenidos y se realizó una síntesis de los aspectos científicos implicados en cada situación.
7. Por último, se elaboraron una serie de actividades para afianzar los conceptos.

Instrumentos de recogida de la información y evaluación

Para evaluar el aprendizaje de los alumnos relativo al concepto de fuerza y las leyes de la Dinámica, así como para conocer el efecto de la nueva metodología respecto a otra tradicional, se realizó una prueba escrita a las dos muestras de estudiantes.

La gran cantidad de información de la cual hoy se dispone acerca de las concepciones que tienen los alumnos sobre los diferentes tópicos de este tema (Viennot, 1979a; Carrascosa y Gil, 1982; Watts y Zylbersztajn, 1981; Watts, 1983; Maloney, 1984; Carmichael *et al.*, 1990; Hierrezuelo y Montero, 1991; Thornton y Sokoloff, 1998; Smith y Wittmann, 2007; Kara, 2007; Vila y Sierra, 2008) nos ofrece un amplio abanico para seleccionar diferentes cuestiones a partir de las cuales podamos evaluar el aprendizaje de nuestros alumnos.

De esta forma, la prueba propuesta se constituyó a partir de algunas cuestiones, que consideramos relevantes, investigadas previamente por otros autores con alumnos de edades similares a los de nuestro estudio. En total se eligieron cuatro cuestiones en torno a las leyes de Newton, las cuales se recogen en el anexo I, analizadas en trabajos correspondientes a la primera etapa de investigaciones sobre este tema, a principios de la década de los ochenta, considerada como la etapa más fructífera. Entre ellas destacan dos cuestiones de la tesis doctoral de Viennot (1979a), un referente en el desarrollo de este campo de investigación en la Didáctica de las Ciencias. La tabla 1 resume los objetivos que se perseguían con cada cuestión.

Tabla 1.
Objetivos de cada una de las cuestiones planteadas en la prueba de evaluación

<i>Cuestión</i>	<i>Fuente</i>	<i>Objetivo</i>
A	Viennot (1979a)	Relación entre fuerza y movimiento (primera ley de Newton)
B	Carrascosa y Gil (1982)	Comprensión del concepto de fuerza y de las leyes de Newton
C	Viennot (1979a)	Confusión entre velocidad y aceleración y fuerza (segunda ley de Newton)
D	Watts y Zylbersztajn (1981)	Tercera ley de Newton

Análisis de datos

Cada una de las preguntas se analizó atendiendo a los sistemas de categorías propuestos por los correspondientes autores. El análisis de frecuencias obtenido a partir de la cuantificación de los sistemas de categorías nos ha servido para realizar análisis de tipo cuantitativo, ya sean de tipo descriptivo o de tipo comparativo entre los grupos experimental y de control. El tratamiento de la información se llevó a cabo mediante el programa estadístico SPSS 17.0 recurriendo a análisis de tipo descriptivo y pruebas de comparación de tipo no paramétrico, como la de chi-cuadrado de Pearson.

DESCRIPCIÓN DEL CASO

Este apartado describe la forma de trabajo en el aula haciendo uso de la metodología basada en la lectura en la enseñanza-aprendizaje del concepto de fuerza y las leyes de la Dinámica.

Elección del texto del Quijote

La mayoría de los alumnos coincidieron en proponer como texto el pasaje de los molinos de viento, en particular el enfrentamiento de Don Quijote con el molino. Recordemos que en este capítulo, Don Quijote y Sancho llegan a un lugar donde encuentran un gran número de molinos de viento. Don Quijote, creyendo que los molinos son gigantes, emprende una batalla contra ellos. El texto elegido puede consultarse en el anexo II.

Cuestiones propuestas por los estudiantes

Aparte de los contenidos asociados a la Dinámica, eje central de esta investigación, el pasaje de los molinos de viento ofreció la posibilidad de trabajar varios contenidos científicos pertenecientes a otras unidades didácticas, los cuales se abordaron con posterioridad al tema. Así, por un lado, la locura de Don Quijote, que le hace creer que los molinos son gigantes, permitió trabajar el concepto de modelo científico buscando posibles analogías entre un molino y un gigante. Por otro lado, el movimiento de las aspas de un molino con el viento permitió estudiar, por una parte, las características del movimiento circular (Franco, 2006) y, por otra parte, las ventajas y los inconvenientes de la energía eólica, así como la comparación en cuanto a su funcionamiento de un molino de viento del siglo XVII y un aerogenerador eólico del siglo XXI.

Centrándonos en contenidos relacionados con las fuerzas y las leyes de Newton, estos se abordaron a partir del enfrentamiento de Don Quijote contra el molino. Las cuestiones propuestas por los alumnos, ya formuladas formalmente, así como los conceptos físicos que permitieron trabajar se recogen en la tabla 2.

Tabla 2.
Cuestiones planteadas a partir del texto y conceptos físicos implicados

<i>Cuestión planteada</i>		<i>Concepto físico</i>
1.	¿Actúan fuerzas sobre Don Quijote cuando va cabalgando sobre su caballo hacia el molino? Si actúan, ¿qué valor tiene cada fuerza?	Significado físico de fuerza Efectos de una fuerza Identificación de fuerzas Cálculo de fuerzas Fuerza resultante
2.	¿Cuál sería la fuerza que siente Don Quijote en su cabeza al chocar contra el molino? ¿Sufre el molino alguna fuerza consecuencia de la colisión con Don Quijote? ¿Quién ejerce mayor fuerza, Don Quijote o el molino?	Necesidad de una interacción. Tercera ley de Newton
3.	¿Qué le ocurriría a Don Quijote si no estuviese bien sujeto a Rocinante y este frenara bruscamente antes de chocar con el molino?	Primera ley de Newton (principio de inercia)
4.	Cuando el viento deja de soplar, ¿por qué se siguen moviendo las aspas del molino? ¿Por qué el aspa no se mueve indefinidamente?	
5.	¿Se puede calcular la aceleración con la que Don Quijote galopa para embestir al molino?	Segunda ley de Newton

Contenidos científicos y planteamiento de los problemas

Para dar respuesta a las cuestiones planteadas, el estudiante necesitaba conocer el concepto de fuerza y las tres leyes de la Dinámica.

Concepto físico de fuerza (cuestión 1)

En primer lugar, el docente hizo aflorar algunas ideas previas de los alumnos en torno al significado del término *fuerza*, proponiéndoles que indicasen algunas frases en las que este término tuviera un significado físico. Las frases se anotaron en la pizarra y se procedió a una discusión posterior. Tras el debate, se indicó que el significado físico de fuerza es muy diferente al empleado en la vida cotidiana, donde se suelen utilizar expresiones del tipo «tengo más fuerza que tú» o «necesito fuerza de voluntad».

A continuación, se pidió a los alumnos que indicaran, para cada una de las frases anotadas, cuál era el efecto producido por la fuerza. Tras esta tarea, se recordó que fuerza es todo aquello capaz de deformar un cuerpo o de modificar su estado de reposo o de movimiento.

Se hizo hincapié en que, en general, sobre un cuerpo actúan varias fuerzas, por lo que se debe calcular cuál es la fuerza total o resultante para conocer no solo la magnitud de la fuerza, sino también su dirección y sentido, al tratarse de un vector.

En este sentido, el efecto que produce la fuerza resultante cuando Don Quijote cabalga hacia el molino es de movimiento, mientras que en su choque contra este se produce una deformación en el aspa.

En este punto, se discutió en el aula la cuestión 1, «¿Actúan fuerzas sobre Don Quijote cuando va cabalgando sobre su caballo hacia el molino? Si actúan, ¿qué valor tiene cada fuerza?», que tenía como objetivos identificar las distintas fuerzas existentes en un sistema y el cálculo de sus valores.

El profesor indicó que, para simplificar el problema, el sistema Don Quijote sobre Rocinante debía considerarse como un mismo cuerpo. En principio, los alumnos pensaron que sobre el hidalgo solo actuaba una única fuerza, aquella que producía el movimiento, la realizada por Rocinante. Esto concuerda con los resultados de los principales estudios sobre las ideas alternativas de los alumnos en este campo (Viennot, 1979a; Hierrezuelo y Montero, 1991), según los cuales para el estudiante no es posible que haya movimiento sin una fuerza en la dirección de este que lo esté manteniendo. Se insistió

en que, en este caso, la fuerza asociada a ese movimiento la hacía Rocinante, pero que existen otros ejemplos, tal como el caso de una bola rodando, en el que el cuerpo se está moviendo sin la necesidad de una fuerza que esté actuando constantemente sobre él.

Posteriormente, y tras preguntas del tipo «¿existe alguna fuerza que frene el movimiento de Don Quijote?», «¿el peso de Don Quijote es una fuerza que afecte al movimiento?», etc., efectuadas por el docente, los alumnos fueron deduciendo todas las fuerzas que actuaban sobre nuestro personaje, ilustradas en la figura 1.

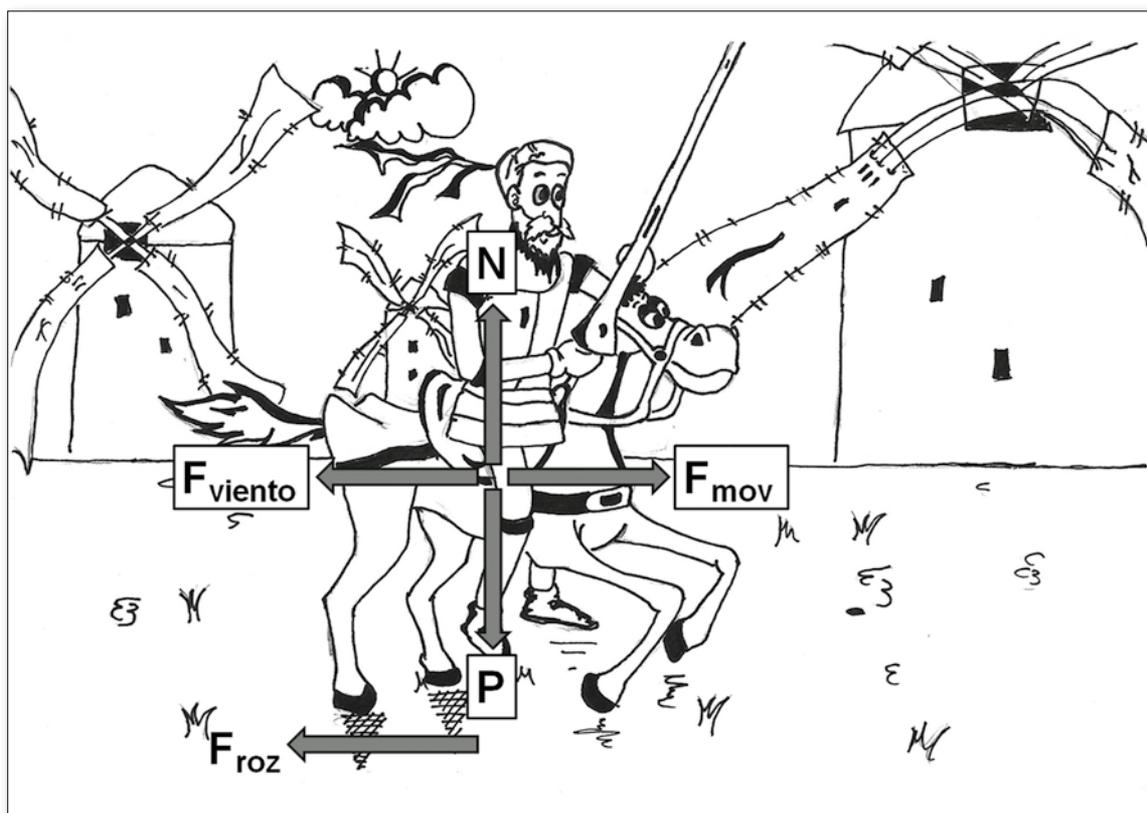


Fig. 1. Fuerzas que actúan sobre Don Quijote al cabalgar sobre Rocinante.

Así, en el eje X actúa la fuerza realizada por Rocinante, que es la que impulsa el movimiento, y otra fuerza que lo frena (fuerza de rozamiento). Se debería añadir también la fuerza del viento, ya que el texto indica que se levantó un poco de viento que hizo mover las aspas de los molinos. Esta fuerza podría estar a favor o en contra del movimiento de Don Quijote. Es interesante realizar un esquema de estas fuerzas para estudiar su dirección y sentido, así como para averiguar la fuerza resultante.

El docente indicó que la mayor o menor oposición al movimiento de la superficie (el suelo) o el fluido (el aire) en cuestión se caracteriza por un factor denominado coeficiente de rozamiento, y propuso la búsqueda de información del valor de este coeficiente en los dos medios implicados en el problema. Por último, se informó de que, aunque en la mayoría de los casos la fuerza de rozamiento se opone al movimiento, no siempre es así.

En el análisis del eje Y, se insistió en que debía haber una fuerza que contrarrestase la fuerza peso (P) del sistema, ya que de no ser así, este dejaría de estar en equilibrio. Se recordó que esta fuerza se denomina normal (N).

Finalmente, se indicaron las expresiones correspondientes a cada fuerza y se calculó cada una de ellas. Para ello, los alumnos tuvieron que plantear el problema formalmente y asignar valores a las variables. Así, supusieron que la masa de Don Quijote podía ser de unos 50 kg al ser muy delgado, y la de su caballo de unos 200 kg, ya que según Cervantes se trataba de un rocín flaco. Se tomaron como coeficientes de rozamiento $\mu = 0,3$ para el suelo de arena y $\mu = 0,1$ para el viento. Conocidas todas las fuerzas, resultó sencillo el cálculo de la fuerza resultante.

Necesidad de una interacción: tercera ley de Newton (cuestión 2)

Una vez que el alumnado, con ayuda de otros ejercicios, fue capaz de identificar y calcular los valores de los distintos tipos de fuerzas, se insistió en que la fuerza es una medida de la interacción en la materia y, por tanto, para que exista una fuerza es necesaria la presencia de dos cuerpos que interactúen. El estudio de las interacciones entre fuerzas es muy importante para comprender la tercera ley de Newton o principio de acción reacción, que por motivos didácticos, y de acuerdo con Hierrezuelo y Montero (1991), resulta recomendable introducir antes que las otras dos leyes de la Dinámica.

La tercera ley de la Dinámica se trabajó a partir de la cuestión 2, planteada como «¿Cuál sería la fuerza que siente Don Quijote en su cabeza al chocar contra el molino?, ¿sufre el molino alguna fuerza consecuencia de la colisión con Don Quijote?, ¿quién ejerce mayor fuerza, Don Quijote o el molino?».

En esta situación tuvo interés estudiar las dos fuerzas que actúan cuando el caballero se golpea contra el molino: la fuerza (Don Quijote-molino) y la fuerza (molino-Don Quijote). En primer lugar, se aclaró el significado de esta nomenclatura. Así, la fuerza (Don Quijote-molino) hace referencia a la fuerza que el molino está realizando contra Don Quijote, siendo su punto de aplicación el hidalgo, mientras que la fuerza (molino-Don Quijote) se refiere a la fuerza que nuestro caballero está haciendo contra el molino y está aplicada sobre el molino. Luego, se examinó el sentido de cada fuerza, hacia la izquierda para la fuerza (Don Quijote-molino) y hacia la derecha para la fuerza (molino-Don Quijote) (véase figura 2). Por último, se insistió en la conclusión más importante para esta tercera ley, y que da respuesta a la pregunta inicialmente planteada, ambas fuerzas tienen el mismo módulo y dirección, siendo solo diferente el sentido de estas.

El enunciado de la tercera ley creó cierta confusión entre el alumnado, que no comprendía muy bien por qué las dos fuerzas de la pareja debían ser iguales, y tenía la idea errónea de que el molino, al ser más grande que Don Quijote, ejercería mayor fuerza. Esta idea está de acuerdo con los resultados hallados por otros autores en la literatura. Así, según Viennot (1979b), Watts y Zylbersztajn (1981), Terry y Jones (1986) y Maloney (1984), en la comprensión de la tercera ley, una de las dificultades más graves es la de considerar que las dos fuerzas que forman la pareja son iguales. Para los alumnos, estas fuerzas dependen de ciertas características de los cuerpos que las ejercen, como la masa, siendo la fuerza directamente proporcional a esta, como aquí se ha detectado.

Por otro lado, la discusión en el aula también hizo aflorar la idea previa de que si ambas fuerzas tenían el mismo módulo y dirección pero sentido contrario, debían anularse entre sí. Según Hierrezuelo y Montero (1991), es habitual detectar este error entre los alumnos, que consideran que ambas fuerzas (la acción y la reacción) están aplicadas sobre el mismo cuerpo, cuando realmente tienen puntos de aplicación diferentes. En nuestro problema, en un caso en Don Quijote y en el otro, en el molino.

La figura 2 muestra, además de la pareja de fuerzas analizada, todos los pares de fuerzas existentes en la situación en que Don Quijote colisiona con el molino. Se utiliza la nomenclatura descrita.

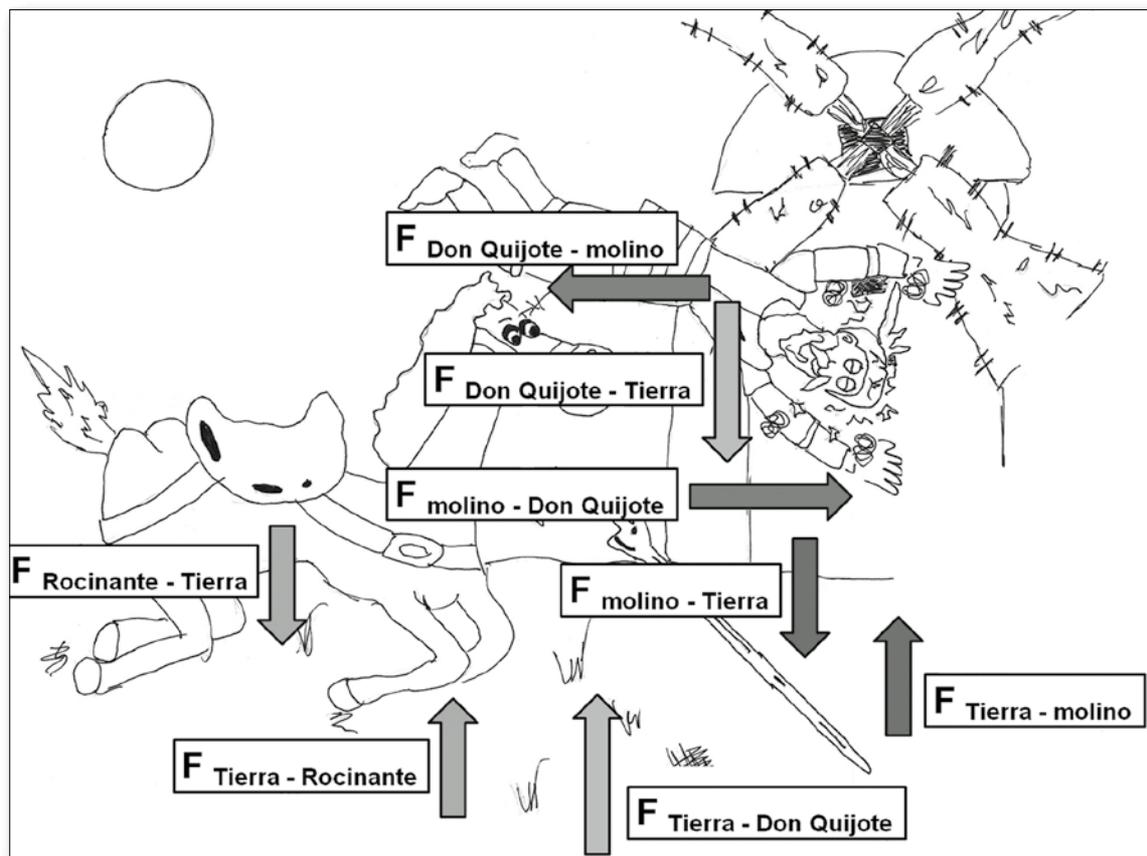


Fig. 2. Parejas de fuerzas que actúan sobre el sistema Don Quijote-molino.

Primera ley de Newton: principio de inercia (cuestiones 3 y 4)

El estudio del concepto de inercia y la primera ley de Newton se llevó a cabo mediante el análisis de la situación ficticia, planteada por uno de los alumnos, que podría haber ocurrido en la aventura de los molinos de viento si Rocinante se hubiese detenido en seco y Don Quijote no estuviese bien sujeto. Concretamente, la cuestión 3 se formuló como «¿Qué le ocurriría a Don Quijote si no estuviese bien sujeto a Rocinante y este frenara bruscamente antes de chocar con el molino?».

Esta cuestión permitió explicar el concepto de inercia como la tendencia de un cuerpo a mantener el estado de reposo o de movimiento mientras no actúe ninguna fuerza sobre él. Lógicamente, en tal situación, Don Quijote saldría lanzado de su caballo tras frenar este de forma brusca ante el molino, como ilustra la figura 3.

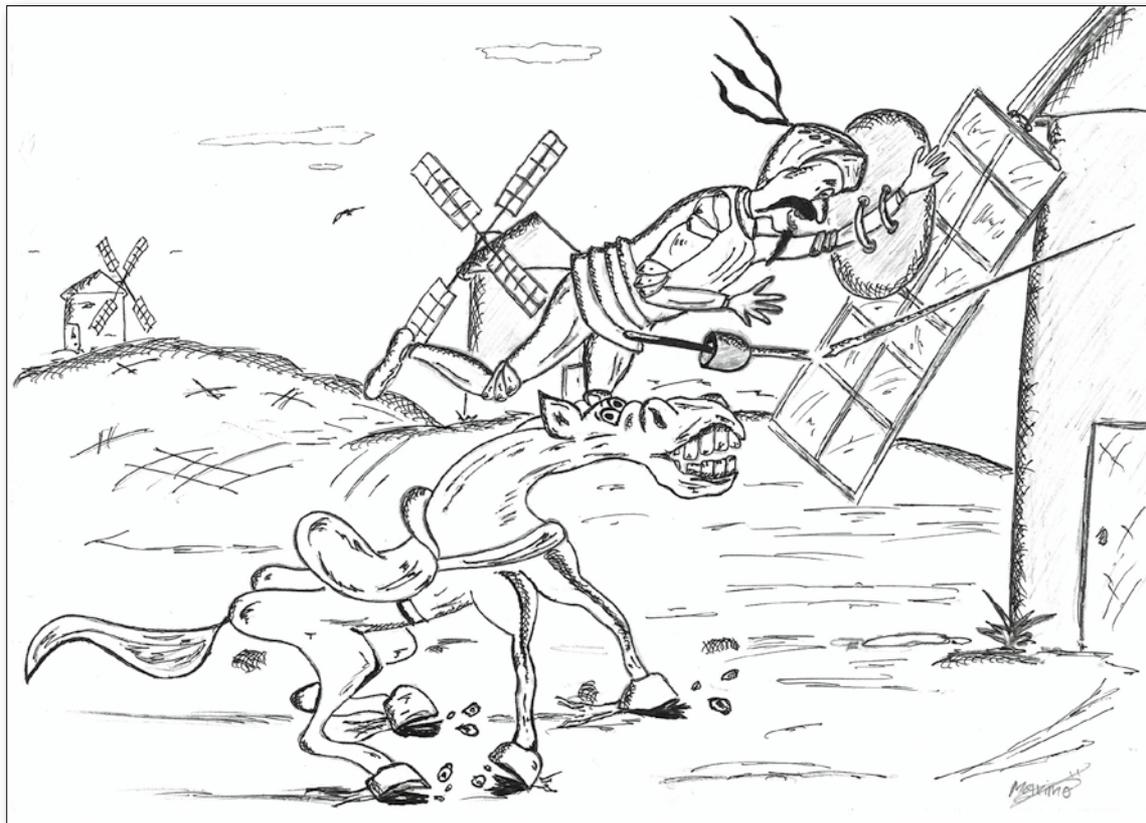


Fig. 3. Don Quijote sale lanzado bruscamente de Rocinante por el principio de inercia.

El concepto de inercia también da respuesta a la primera parte de la cuestión 4, «Cuando el viento deja de soplar, ¿por qué se siguen moviendo las aspas del molino?». La segunda parte de dicha cuestión, relativa a por qué el movimiento del aspa no era indefinido, tal y como indica el principio de inercia, ayudó al alumnado a entender mejor el enunciado de esta ley. Según la primera ley, si sobre un cuerpo no actúa ninguna fuerza, o las que actúan se anulan entre sí, pueden ocurrir dos situaciones. Si el cuerpo está en reposo, permanecerá en reposo. Si el cuerpo está en movimiento se moverá indefinidamente con velocidad constante. Lo que ocurre en nuestro caso es que sobre el aspa del molino actúa la fuerza de rozamiento, que no se está anulando con ninguna otra, y es la que produce que las aspas del molino se vayan frenando. En este punto, algunos alumnos constataron que en nuestro planeta era muy difícil encontrar un lugar donde se pudiera comprobar este principio, ya que debía ser en un lugar donde el rozamiento no existiera o fuera mínimo.

Segunda ley de Newton (cuestión 5)

La ecuación fundamental de la Dinámica, trabajada a partir de la cuestión 5, proponía calcular la aceleración con la que Don Quijote galopaba hacia el molino.

Se insistió en que la fuerza a la que hace referencia la segunda ley de Newton es la fuerza resultante del sistema, como se indica en su enunciado, «si sobre un cuerpo actúa una fuerza resultante, este adquiere una aceleración». Se indicó también que a partir de la expresión matemática de esta ley, $F = m \cdot a$, podíamos calcular la fuerza resultante, la masa o la aceleración del cuerpo, conocidas dos de las variables. En este caso, como el alumno ya había calculado en la cuestión 1 la fuerza resultante de este problema, el cómputo de la aceleración no presentó grandes dificultades.

Como se citó previamente, para afianzar estos contenidos el alumnado realizó con posterioridad otros ejercicios similares a los propuestos, algunos también extraídos del Quijote.

RESULTADOS DE APRENDIZAJE

A continuación se comentan los resultados de cada una de las cuestiones de la prueba de evaluación.

Cuestión A: Relación entre fuerza y movimiento

La cuestión A fue tomada de la tesis doctoral de Viennot (1979a), que investigó las ideas sobre mecánica de un numeroso grupo de estudiantes de varios países. Dicha cuestión, que proponía dibujar las fuerzas que actúan sobre una pelota lanzada hacia arriba en diferentes puntos de su trayectoria, se propuso para averiguar si la metodología basada en la lectura permitía erradicar la idea previa de los alumnos de que no hay movimiento sin una fuerza en la dirección de este que lo esté manteniendo.

El sistema de categorías, utilizado para analizar esta cuestión, fue el de respuestas «adecuadas» o «inadecuadas». La tabla 3 muestra las frecuencias absolutas de alumnos de los grupos experimental y de control que ofrecen cada tipo de respuesta, mientras que la figura 4 ilustra estos resultados de forma porcentual comparándolos con los obtenidos por Viennot (1979a) en su investigación con alumnos franceses del último año de secundaria.

Tabla 3.
Frecuencias absolutas y porcentajes de la cuestión A
para los grupos experimental y de control de 4.º de ESO

Tipos de respuesta	Grupo experimental		Grupo de control	
	Frecuencia	%	Frecuencia	%
Respuestas adecuadas	32	51,6	21	33,3
Respuestas inadecuadas	30	48,4	42	66,7

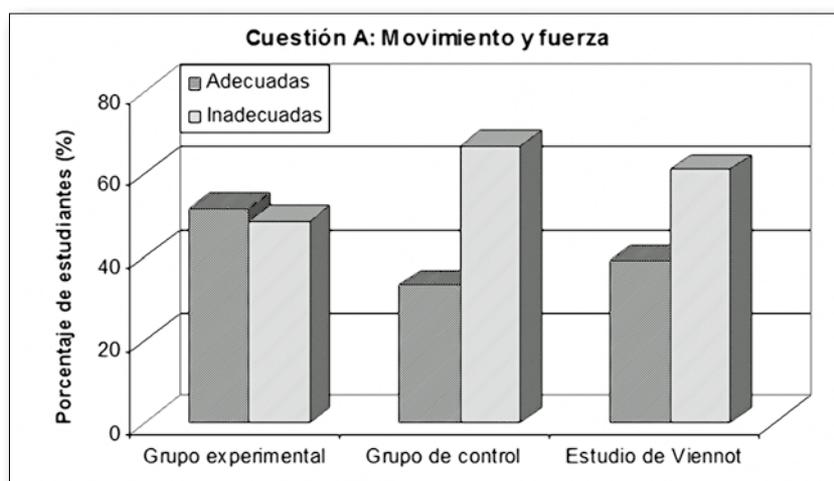


Fig 4. Resultados de la cuestión A correspondientes a la investigación, comparados con los obtenidos por Viennot (1979a).

Una visión en conjunto de los resultados muestra cómo los porcentajes de alumnos del grupo de control son bastante similares a los encontrados por Viennot (1979a) para estudiantes franceses, situándose en este último caso las respuestas adecuadas en un 39% y las inadecuadas en un 61%. Sin embargo, si comparamos estos datos con los del grupo experimental, se observa que no solo el porcentaje de respuestas adecuadas es superior al de inadecuadas, sino que es bastante mayor en el grupo de alumnos que desarrolló la metodología basada en el Quijote.

Para conocer si realmente existen diferencias significativas entre las dos muestras investigadas (experimental y control) y poder decidir la utilidad de este recurso, se aplicó la prueba estadística de chi-cuadrado, obteniéndose un $X^2 = 4,27$; g.l. = 1; $p < 0,05$, datos que sugieren que existen diferencias significativas entre ambos grupos. En este sentido, el recurso basado en la lectura parece producir ciertos progresos en el cambio de la idea previa del alumno de que para que se produzca movimiento debe existir una fuerza en la dirección de este.

Cuestión B: Comprensión del concepto de fuerza y de las leyes de Newton

La segunda cuestión investigada por Carrascosa y Gil (1982) con alumnos españoles de diferentes cursos, desde 2.º de BUP a 2.º de Química, evaluaba el concepto de fuerza y una comprensión correcta de las leyes de Newton a través de tres enunciados para los que el alumno debía indicar su veracidad o falsedad y que no exigían una especial memorización, ni cálculos matemáticos complicados.

En el análisis de las respuestas se empleó el sistema de categorías propuesto por dichos autores: «todas las respuestas son adecuadas», «alguna o todas las respuestas son inadecuadas» y «todas las respuestas son inadecuadas».

Las frecuencias absolutas de alumnos de cada una de las categorías se muestran en la tabla 4. Asimismo, los resultados porcentuales se recogen en la figura 5, junto con los presentados por Carrascosa y Gil (1982) en su trabajo para una muestra de 196 estudiantes de 2.º de BUP (16 años).

Tabla 4.
Frecuencias absolutas y porcentajes para cada tipo de respuesta de la cuestión B en torno a la comprensión del concepto de fuerza y de las leyes de Newton

Tipos de respuesta	Grupo experimental		Grupo de control	
	Frecuencia	%	Frecuencia	%
Todas las respuestas son adecuadas	2	3,2	1	1,6
Alguna o todas las respuestas son inadecuadas	60	96,8	62	98,4
Todas las respuestas son inadecuadas	28	45,1	35	55,5

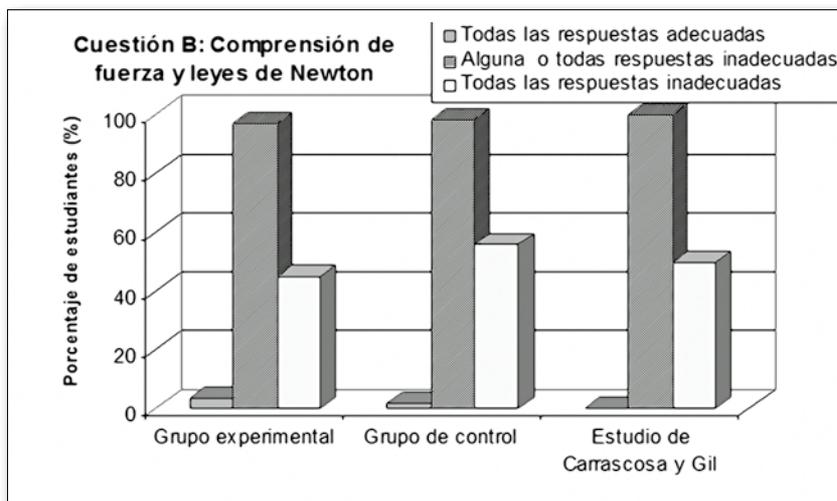


Fig. 5. Resultados de la investigación y del estudio de Carrascosa y Gil (1982) para la cuestión B.

Como ya detectaron Carrascosa y Gil (1982), los resultados ponen de manifiesto las dificultades que encuentran los estudiantes de secundaria para comprender de manera satisfactoria las leyes de Newton. De esta forma, al cotejar de forma cualitativa los datos obtenidos en el grupo de control con los de estos autores, se observan entre ellos pocas diferencias, destacando especialmente el porcentaje de alumnos cercano al 100% que ofrece alguna o todas las respuestas de manera inadecuada.

Por otra parte, al comparar de forma cualitativa el grupo experimental con el de control, se observa que los cambios producidos son también mínimos. No obstante, cabe destacar un ligero progreso en el porcentaje de alumnos que es capaz, en el grupo experimental respecto al de control, de dar todas las respuestas adecuadas, a la vez que se produce un descenso de en torno a 10 puntos en el porcentaje de estudiantes que da todas las respuestas inadecuadas. En definitiva, estos datos sugieren un pequeño avance en el aprendizaje en la comprensión del concepto de fuerza y las leyes de Newton tras trabajar en el aula con textos del Quijote.

Dicha apreciación cualitativa se confirma tras el análisis estadístico, al indicar la prueba de chi-cuadrado ($X^2 = 0,80$; g.l. = 2; $p > 0,05$) que no existen diferencias significativas entre ambas muestras. En este caso, la nueva metodología no parece producir avances importantes en el aprendizaje de estos tópicos frente al uso de una metodología convencional, al menos para la comprensión del concepto de fuerza y de las leyes de Newton, y para los alumnos con los que se realizó el estudio.

Cuestión C: Segunda ley de Newton

La tercera cuestión, también propuesta por Viennot (1979a), evaluó si los alumnos comprendían el enunciado de la segunda ley de Newton, estudiando si asociaban fuerza con velocidad en lugar de con aceleración. Para ello se propuso determinar si eran iguales o diferentes las fuerzas que actuaban sobre seis bolas idénticas cuando se encontraban a la misma altura después de haber sido lanzadas simultáneamente y con trayectorias diferentes por un malabarista.

Los resultados se recogen en la tabla 5 y la figura 6 para las frecuencias absolutas y porcentajes, respectivamente. En la figura 6 se incluyen además los datos obtenidos por Viennot (1979a) para estudiantes franceses y belgas del último curso de secundaria. El sistema de categorías empleado fue el de respuestas «adecuadas» e «inadecuadas».

Tabla 5.
Frecuencias absolutas y porcentajes de alumnos
en cada categoría de la cuestión C en torno a la segunda ley de Newton

Tipos de respuesta	Grupo experimental		Grupo de control	
	Frecuencia	%	Frecuencia	%
Respuestas adecuadas	24	38,7	14	22,2
Respuestas inadecuadas	38	61,3	49	77,8

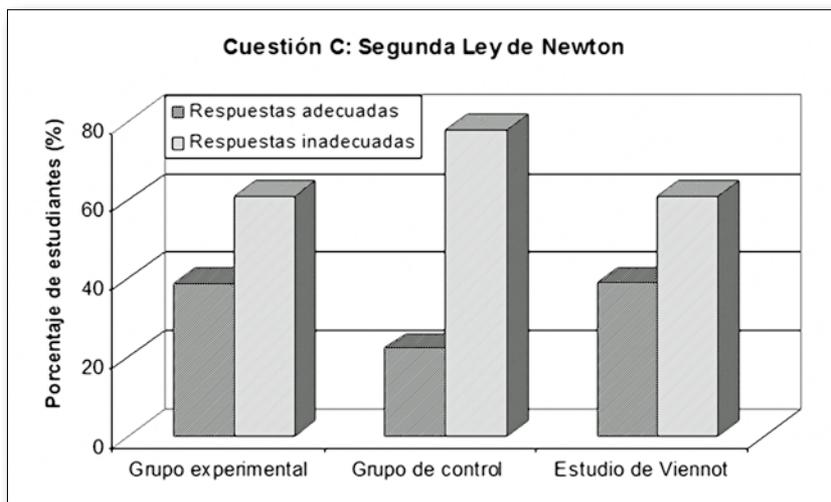


Fig. 6. Resultados del grupo experimental y de control, y del trabajo de Viennot (1979a) para la cuestión C.

Un análisis global de los datos de la figura 6 muestra cómo en todos los casos la categoría mayoritaria corresponde a una respuesta inadecuada, aquella en la que el alumno indica que las fuerzas son diferentes. Esta contestación es contraria al hecho de que la única fuerza que actúa sobre las bolas es el peso, por lo que las fuerzas son iguales en los seis casos.

A pesar de que la respuesta citada de forma mayoritaria sea inadecuada, se puede observar en el grupo experimental respecto al de control un incremento en el porcentaje de alumnos, del 22,2 al 38,7%, que da la opción correcta. Este avance se ratifica a través de la prueba de chi-cuadrado ($X^2 = 4,01$; g.l. = 1; $p < 0,05$), que sugiere diferencias significativas en esta tarea y, por tanto, que la metodología que utiliza textos de lectura parece mejorar los resultados de aprendizaje de los estudiantes, al menos en el entendimiento de la segunda ley de Newton, a pesar de que las respuestas inadecuadas sigan siendo mayoritarias.

Cuestión D: Tercera ley de Newton

La última cuestión, tomada del estudio realizado por Watts y Zylbersztajn (1981) con 125 estudiantes de 14 años, pretendía evaluar la tercera ley de Newton a través de la valoración que hace el alumno de la magnitud de la fuerza de cada una de las dos personas que realizan una competición de tiro de cuerda.

El sistema de categorías empleado se constituyó a partir de las tres posibles situaciones presentadas al alumno como cuestión de múltiple elección. Así, las respuestas adecuadas corresponden con la situación A (las dos fuerzas iguales), mientras que la categoría de respuestas inadecuadas (fuerzas desiguales) engloba las situaciones B y C.

Las frecuencias absolutas y los porcentajes de alumnos en cada tipo de respuesta se muestran en la tabla 6. De la misma forma, la figura 7 incluye, además de los datos correspondientes a la investigación, los obtenidos por Watts y Zylbersztajn (1981).

Tabla 6.
Frecuencias absolutas y porcentajes de estudiantes para cada tipo de respuesta de la cuestión D en torno a la tercera ley de Newton

Tipos de respuesta	Grupo experimental		Grupo de control	
	Frecuencia	%	Frecuencia	%
Respuestas adecuadas (A)	26	41,9	16	25,4
Respuestas inadecuadas (B y C)	36	58,1	47	74,6

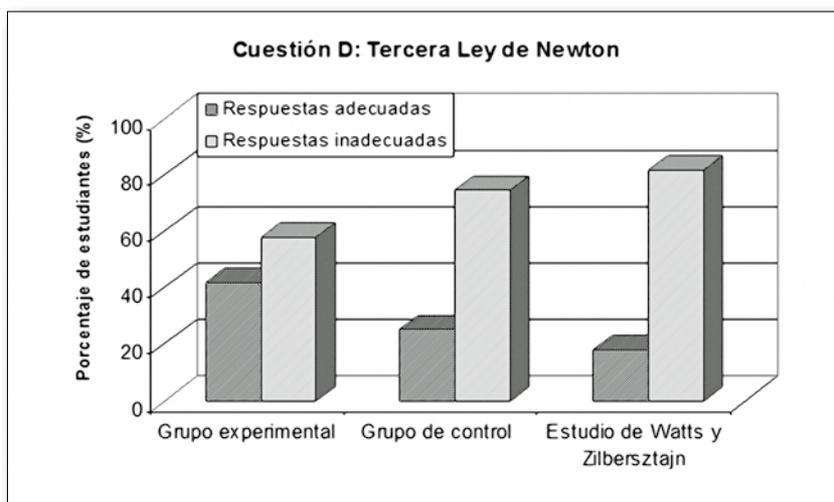


Fig. 7. Resultados de la investigación y del estudio de Watts y Zylbersztajn (1981) para la cuestión D.

En esta ocasión, los resultados obtenidos para el grupo de control son ligeramente mejores que los que obtuvieron Watts y Zylbersztajn (1981) en su investigación, según la cual el 82% de los alumnos indicaba que si la persona de la izquierda estaba ganando era porque dicha persona estaba ejerciendo una fuerza mayor. En nuestro estudio, aproximadamente el 75% de los alumnos escogió preferentemente las situaciones B y C, agrupadas en la figura 7 como respuestas inadecuadas. Este pequeño avance se puede explicar por la diferencia de edad de dos años entre los alumnos de nuestro estudio y los que realizaron el estudio de Watts y Zylbersztajn, según el cual nuestros estudiantes deberían poseer un nivel de razonamiento algo más avanzado.

En ambos casos, los alumnos suponen que la fuerza ejercida por la persona de la izquierda es mayor y se deciden por una u otra situación según crean que la fuerza que hace la persona está representada por el vector aplicado en ella (escogen C) o por el vector aplicado en la otra persona (escogen B). No tienen en cuenta el efecto de los rozamientos, que en definitiva son los que explican la victoria de uno u otro competidor.

Como se puede observar en los datos presentados, los resultados del grupo de control difieren también de los obtenidos para el grupo experimental. De este modo, el mayor porcentaje de respuestas adecuadas en el grupo experimental, en torno al 42%, y los datos aportados por la prueba estadística ($X^2 = 3,83$;

g.l. = 1; $p = 0,05$) ponen de manifiesto, aunque muy al límite, que existen diferencias significativas entre ambos grupos. De esta forma, la metodología propuesta parece mostrarse también de mayor utilidad frente a una metodología convencional para el aprendizaje y la comprensión de la tercera ley de Newton.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación parecen sugerir que el uso de una metodología basada en textos del Quijote, donde el alumno juega un papel activo, plantea y resuelve sus propios problemas de naturaleza científica, y se convierte en el verdadero protagonista de su aprendizaje, es capaz de producir ciertos avances en el aprendizaje del concepto de fuerza y de las leyes de Newton a nivel de 4.º de ESO, que a veces no se consiguen empleando una metodología convencional.

Desde el punto de vista estadístico, debemos indicar que los avances producidos en este sentido deben considerarse modestos, al haberse encontrado en varias de las cuestiones diferencias significativas, aunque no demasiado acusadas, entre el grupo experimental y el grupo de control. En este sentido, los progresos y las dificultades en cada uno de los tópicos tratados se pueden sintetizar de esta forma:

1. En general, el alumnado sigue encontrando importantes dificultades en la comprensión del concepto de fuerza y de las leyes de Newton, independientemente de que se emplee una metodología innovadora basada en la lectura o una metodología convencional.
2. A pesar del obstáculo citado, se han producido algunos avances en el entendimiento de las tres leyes de la Dinámica. Así, en el caso de la primera ley, la metodología empleada fue capaz de eliminar, en un número elevado de alumnos, la idea previa de que para que se produzca movimiento debe existir una fuerza en la dirección de este.
3. También se detectaron progresos destacables en la comprensión de la segunda ley, en concreto en lo que se refiere a la diferenciación entre velocidad y aceleración, así como a su relación con la fuerza. No obstante, y a pesar de que estos avances se consideren significativos, la respuesta mayoritaria dada por el alumno de 4.º de ESO sigue siendo inadecuada.
4. Por último, se han producido avances en el entendimiento de la tercera ley de Newton, aunque deben considerarse más modestos, al haberse encontrado diferencias significativas, pero muy al límite, entre los grupos experimental y de control.

Probablemente, entre las causas que justifican la mejora global del aprendizaje se encuentra la implicación del alumno en la tarea, causada por el elemento de motivación que produce el empleo en el aula de una metodología diferente a la habitual. De este modo, la lectura del fragmento debe tenerse en cuenta en este grado de motivación, al haberse realizado ejercicios muy similares en ambos grupos. En este sentido, cabe recordar que la motivación está íntimamente ligada al proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias, a las situaciones problemáticas que se proponen a los alumnos, a las estrategias de aprendizaje que se desarrollan en el aula, a los resultados que se obtienen y al contexto en el que están aprendiendo (Furió, 2006). En este punto, debemos también considerar que, de forma inconsciente, el profesor –el autor– ha podido volcar más entusiasmo y mayor dedicación en motivar a los alumnos del grupo experimental frente al de control, aspecto que se conoce en la literatura como efecto «Rosenthal».

Creemos que todos estos factores han podido contribuir a la motivación del alumno y conseguir, al menos, la mejora de sus procesos de autorregulación y así lograr una mayor autonomía que, en definitiva, es la finalidad de cualquier educación, incluida la Física. Como recapitulación, el planteamiento de problemas como reto generó un alto grado de motivación en el alumnado, que en la mayoría de los casos repercutió en la generación de aprendizaje y, probablemente, también en un posible cambio de actitudes

hacia las ciencias en una gran parte de los estudiantes de 4.º de ESO que desarrollaron la unidad a través del recurso de la lectura, aunque estos aspectos aún deben estudiarse en mayor profundidad.

El hecho de que sigan persistiendo en algunos alumnos algunas ideas previas sobre fuerza y movimiento puede explicarse si tenemos en cuenta que se trata de esquemas profundamente arraigados en la estructura cognitiva que se han formado y utilizado para la comprensión de multitud de fenómenos muy comunes en la vida diaria de los alumnos (Hierrezuelo y Montero, 1991).

Por otro lado, queremos indicar que no cabe esperar que, en la práctica, se recurra a un número tan elevado de tareas basadas en la lectura como parte del desarrollo de una unidad didáctica. Sin embargo, en este caso, el diseño de la investigación lo exigía al objeto de proporcionar un contexto rico e intenso desde el que estudiar el papel de este recurso en el aprendizaje. En este sentido, queremos insistir en la utilización puntual de este recurso para obtener un rendimiento óptimo en el aprendizaje.

Por último, y de acuerdo con Pugh (2004), que investigó también sobre las leyes de Newton, animamos a otros docentes a que sigan realizando experiencias innovadoras en el ámbito de la Física, ya que el conocimiento de los estudiantes se puede transformar y enriquecer mediante la realización de otro tipo de experiencias relacionadas con aspectos cotidianos, produciendo avances significativos en el aprendizaje.

AGRADECIMIENTOS

A los alumnos Iván Prospín, Juan Benítez y Máximo Vicente de 1.º de ESO (curso 2009/2010) del IES Caepionis, de Chipiona (Cádiz), por la realización de los tres dibujos que se presentan en este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, J. A. (2004). Reflexiones sobre las finalidades de la enseñanza de las ciencias: educación científica para la ciudadanía. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 1 (1), pp. 3-16. En línea en: <<http://venus.uca.es/eureka/revista/Larevista.htm>> (Consulta: 15/08/2012).
- ANDERSON, D.; LUCAS, K. B. y GINNS, I. S. (2003). Theoretical perspectives on learning in an informal setting. *Journal of Research in Science Teaching*, 40 (2), pp. 177-199.
- BYBEE, R. W. (1993). *Reforming Science Education: Social perspectives and personal reflections*. Nueva York: Teachers College Press.
- BYBEE, R. W. (1997). *Achieving scientific literacy: From purposes to practices*. Portsmouth, NH: Heinemann.
- CARMICHAEL, P. et al. (1990). *Research on students' conceptions in science: a bibliography*. Children's learning in Science: University of Leeds.
- CARRASCOSA, J. y GIL, D. (1982). *Los errores conceptuales en la enseñanza de la Física. I Un estudio de su persistencia. Primeras Jornadas de Investigación en Didáctica en Física y Química*, ICE Valencia, pp. 268-276.
- FRANCO-MARISCAL, A. J. (2006). La física de Don Quijote. *Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 49, pp. 114-123.
- FRANCO-MARISCAL, A. J. (2007a). *Enseñando Física y Química con ideas quijotescas*. Segundo Premio Nacional de Innovación Educativa 2006. Colección Innovación n.º 10 del Centro de Investigación y Documentación Educativa (CIDE) del Ministerio de Educación. Madrid: Secretaría General de Educación del Ministerio de Educación.
- FRANCO-MARISCAL, A. J. (2007b). La química de Don Quijote. *Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 54, pp. 93-99.

- FRANCO-MARISCAL, A. J. (2008). Elemental Chem Lab. *Journal of Chemical Education*, 85 (10), pp. 1370-1371.
- FRANCO-MARISCAL, A. J. y CANO-IGLESIAS, M. J. (2007). Playing with the 50 States and the Chemical Elements. *The Geography Teacher*, 4 (2), pp. 10-12.
- FRANCO, A. J.; OLIVA, J. M. y BERNAL, S. (2012). An Educational Card Game for Learning Families of Chemical Elements. *Journal of Chemical Education*, 89(8), pp. 1044-1046.
- FURIÓ, C. (2006). La motivación de los estudiantes y la enseñanza de la Química. Una cuestión controvertida. *Educación Química*, 17 (extra), pp. 222-227.
- GARCÍA, J. J. (2002). Viñetas de cómic en la enseñanza de la Física. *Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 32, pp. 101-108.
- HELSEY, T. L. (2003). Elemental Zoo. *Journal of Chemical Education*, 80 (4), p. 409.
- HIERREZUELO, J. y MONTERO, A. (1991). *La ciencia de los alumnos: Su utilización en la didáctica de la Física y de la Química*. Capítulo 4: *Las Leyes de la Dinámica*. Vélez-Málaga: Elzevier, pp. 87-109.
- KARA, I. (2007). Revelation of general knowledge and misconceptions about Newton's laws of motion by drawing method. *World Applied Sciences Journal*, 2, pp. 770-778.
- MALONEY, J. (1984). Rule-governed approaches to physics Newton's third law. *Physics Education*, 19, pp. 37-42.
- MARCO-STIEFEL, B. (2000): *La alfabetización científica*. En F. J. Perales y P. Cañal (eds.). *Didáctica de las Ciencias Experimentales*. Alcoy (Alicante): Marfil.
- MOREIRA, M. A. (1994). Diez años de la revista Enseñanza de las Ciencias: de una ilusión a una realidad. *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (2), pp. 147-153.
- PERALES, F. J. y VÍLCHEZ, J. M. (2005). The teaching of Physics and cartoons: Can they be interrelated in secondary education? *International Journal of Science Education*, 27 (14), pp. 1647-1670.
- PUGH, K. J. (2004). Newton's Laws beyond the classroom walls. *Science Education*, 88, pp. 182-196.
- SMITH, T. I. y WITTMANN, M. C. (2007). Comparing three methods for teaching Newton's third law. Physical Review Special Topics. *Physics Education Research*, 3, pp. 1-8.
- TERRY, C. y JONES, G. (1986). Alternative frameworks: Newton's third law and conceptual change. *European Journal Science Education*, 8, pp. 291-298.
- THORNTON, R. K. y SOKOLOFF, D. R. (1998). Assessing student learning of Newton's laws: The Force and Motion Conceptual Evaluation and the Evaluation of Active Learning Laboratory and Lecture Curricula. *American Journal of Physics*, 66 (4), pp. 338-352.
- VÁZQUEZ, A.; ACEVEDO, J. A. y MANASSERO, M. A. (2005). Más allá de la enseñanza de las ciencias para científicos: hacia una educación científica humanística. *Revista electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 4 (2), artículo 5. En línea en: <<http://www.saum.uvigo.es/reec/>> (Consulta: 15/07/2011).
- VIENNOT, L. (1979a). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Hermann: París.
- VIENNOT, L. (1979b). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal Science Education*, 1, pp. 205-221.
- VILA, J. y SIERRA, C. J. (2008). Explicación con experimentos sencillos y al alcance de todos de la primera ley de Newton (la ley de la inercia), así como la diferencia entre inercia e inercialidad. *Latin-American Journal of Physics Education*, 2 (3), pp. 241-245.
- WATTS, M. (1983). A study of schoolchildren's alternative frameworks of the concept of force. *European Journal Science Education*, 5, pp. 217-230.
- WATTS, D. M. y ZYLBERSZTAJN, A. (1981). A survey of some children's idea about force. *Physics Education*, 16, pp. 360-365.
- WELLINGTON, J. (1991). Newspaper science, school science: friends or enemies? *International Journal of Science Education*, 13 (4), pp. 363-372.
- WORNER, C. y ROMERO, A. (1998). Una manera de enseñar física: física y humor. *Enseñanza de las Ciencias*, 16 (1), pp. 187-192.

ANEXO I Prueba de evaluación

Cuestión A.- Dibuja las fuerzas que actúan sobre una pelota lanzada por un muchacho:

- a) Cuando va subiendo.
- b) Cuando está en el punto más alto de la trayectoria.
- c) Cuando está descendiendo.

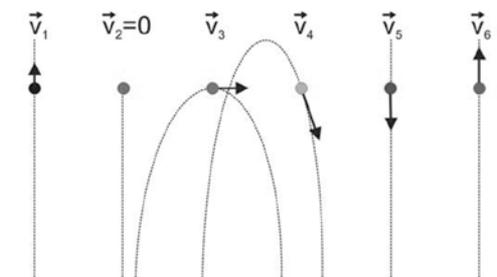
(Cuestión propuesta por Viennot, 1979a)

Cuestión B.- Decir si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones:

- a) Si sobre un cuerpo no actúa ninguna fuerza o si la fuerza resultante es nula, deberá estar en reposo.
- b) El movimiento de un cuerpo siempre tiene lugar en la dirección de la fuerza resultante.
- c) Si en un instante, la velocidad de un cuerpo es nula, la fuerza resultante en ese mismo instante también lo será.

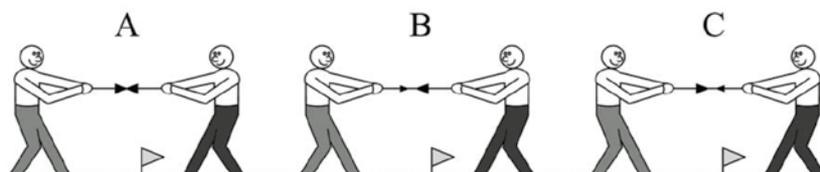
(Cuestión propuesta por Carrascosa y Gil, 1982)

Cuestión C.- Un jugador malabarista juega con seis bolas idénticas. En un determinado momento, las seis bolas están a la misma altura, con trayectorias como las que se muestra en la Figura 8. También hemos dibujado los vectores velocidad en ese momento. Las fuerzas que actúan sobre las bolas, ¿son iguales o diferentes? Justifica tu respuesta.



(Cuestión propuesta por Viennot, 1979a)

Cuestión D.- Se está celebrando una competición de tiro de cuerda entre dos personas. La bandera muestra la línea en el punto medio. La persona representada a la izquierda de los dibujos está ganando. Los tamaños de las flechas representan los valores de las fuerzas. ¿Qué dibujos crees que representa mejor la situación?



(Cuestión propuesta por Watts y Zylbersztajn, 1981)

Fig. 8. Anexo I, prueba de evaluación.

ANEXO II

Texto del Quijote

«En esto descubrieron treinta o cuarenta molinos de viento que hay en aquel campo.

–La aventura nos guía mejor de lo que acertáramos a desear, Sancho. Pues con esos desaforados gigantes entraré en batalla, que es buen servicio quitar a tan mala simiente de la tierra.

–¿Qué gigantes? –dijo Sancho.

–¡Aquéllos que ves!, de largos brazos que los suelen tener de casi dos metros. ¡No huyáis cobardes y viles criaturas que un solo caballero es el que os acomete!

–Mire vuestra merced –respondió Sancho– que aquellos que allí se parecen no son gigantes, sino molinos de viento, y lo que en ellos parecen brazos son las aspas, que, volteadas del viento, hacen andar la piedra del molino.

–No sabes nada de aventuras, ¡son gigantes! Si tienes miedo, quítate de ahí, que voy a entrar contra ellos en fiera y desigual batalla.

Y diciendo esto, dio de espuelas a su caballo Rocinante, sin atender a las voces que su escudero Sancho le daba, advirtiéndole que, sin duda alguna, eran molinos de viento, y no gigantes, aquellos que iba a acometer.

Con la lanza en ristre, arremetió con el primer molino que estaba delante y dándole una lanzada en el aspa, la volvió el viento con tanta furia, que hizo la lanza pedazos, llevándose tras sí al caballo y al caballero, que fue rodando muy maltrecho por el campo. Acudió Sancho a socorrerle.

–¿No os dije que eran molinos de viento y no gigantes? –dijo Sancho.

–Calla, amigo Sancho –respondió Don Quijote–, que las cosas de la guerra, más que otras, están sujetas a continua mudanza, porque el sabio Frestón que me robó el aposento y los libros ha vuelto estos gigantes en molinos por quitarme la gloria de su vencimiento».

(Capítulo VIII «Del buen suceso que el valeroso Don Quijote tuvo en la espantable y jamás imaginada aventura de los molinos de viento», Primera Parte, *El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha*)

TEACHING 10TH GRADE PHYSICS, THROUGH THE READING OF DON QUIXOTE. NEWTON'S LAWS AND THE ADVENTURE OF THE WINDMILLS

Antonio Joaquín Franco Mariscal
IES Juan Ramón Jiménez. Málaga
antoniojoaquin.franco@uca.es

This article is part of a larger study that promotes Physics and Chemistry teaching to high school students through the reading of *The Ingenious Gentleman Don Quixote of La Mancha*, considered the most influential work of Spanish and Universal Literature, which commemorated the 4th centenary of its publication in 2005.

This paper presents an innovative methodology focused on the learning of Science topics through the reading of *Don Quixote*. The methodological design can be summarized in these steps: (1) Students read a chapter of *Don Quixote*, (2) After reading, each pupil must present a short text, from which problems or ideas related to science can be proposed, (3) A selection of the most appropriate problems to work through in class are chosen by the teacher, (4) The teacher introduces the theoretical framework necessary for the students to solve each problem, (5) Students, guided by the teacher, formulate a statement on the different physics problems, identify the variables involved and assign approximated values, in order to solve the equations, (6) After solving each problem, the teacher and students discuss the results and make a synthesis of the scientific aspects involved in each situation, (7) Finally, a set of assignments to reinforce concepts is developed in class.

In short, pupils are given an active role in this new methodology: they become the main protagonists of learning because scientific problems have to be formulated and solved by them.

Specifically, we present here how the topic of Dynamics can be taught with 10th grade students (16 years old), through the reading of the famous Don Quixote's windmills adventure. Contents related to the forces and Newton's laws are discussed from the confrontation of Don Quixote against the windmills. Thus, the physical meaning of a force, its effects, the identification of forces and their calculation are approached by solving problems such as «*What forces are acting on Don Quixote when he goes riding on his horse to the windmills? What value does each force have?*» Newton's Third Law is addressed through questions: «*What is the force applied to Don Quixote's head when hitting the windmill? Does the windmill feel any force due to collision with Don Quixote? Which system is exerting the greater force, Don Quixote or the windmill?*» The problems used in class to develop students understanding of the Principle of Inertia were «*What would happen if Don Quixote was not properly secured to Rocinante and the horse suddenly braked before hitting the windmill?*» or «*When the wind stops blowing, why did the windmill blades continue to move? Why don't they spin indefinitely?*» The main problem to engage with Newton's Second Law was «*How can you calculate the acceleration with which Don Quixote is galloping to attack the windmill?*»

The study compared the learning efficacy produced by this innovative methodology versus conventional methods in a sample of 125 Spanish students. To assess the students' learning, a written exercise was included at the end of the lesson, to both experiment and control groups. The test was formed from relevant questions on the physics topic of Dynamics, researched with students of similar ages by several authors (Viennot, 1979; Watts and Zylbersztajn, 1981; Carrasco and Gil, 1982). The aims of the formulated questions were: to further student's conceptual understanding of forces and Newton's laws; knowledge of the relationship between force and motion (First Law); the confusion between the concepts of velocity, acceleration and force (Second Law); and the comprehension of Newton's Third Law. Each question was analysed taking into account the categories proposed by the respective authors. Data processing was performed using SPSS 17.0 with descriptive analysis and non-parametric tests e.g. the Pearson chi-square test.

The results indicate that this reading-based methodology is able to produce moderate progress in learning force concepts and Newton's laws. The results showing improvements in students' learning and challenges in each topic are summarized as follows:

- a) Students still have to work with significant difficulties in their understanding of forces and Newton's laws, regardless of whether an innovative reading-based method or a conventional methodology is used.
- b) Despite this obstacle, some advances in the students' comprehension of the three laws of Dynamics were observed. In the case of the First Law, the methodology used was able to remove, in a large number of students, the misconception that there is motion if there is a force in the same direction of the motion ($X^2=4.27$; 1 df; $p < 0.05$).
- c) Remarkable progress in understanding Newton's Second Law occurred, in particular, students' ability to differentiate between velocity and acceleration, and their relationship to force. However, despite these changes, advances in students' understanding can still be considered moderate ($X^2=4.01$; 1 df; $p < 0.05$), with the majority of students' answers remaining as an inadequate option.
- d) Moderate advances were recorded in the understanding of Newton's Third Law ($X^2=3.83$; 1 df; $p = 0.05$).

Finally, the overall improvement in students' results can be justified by increases in student motivation, produced by embedding physics concepts and equations in an engaging context, in this case *Don Quixote*.

