

Un estudio del contenido científico de las preguntas formuladas por estudiantes cuando intentan comprender dispositivos experimentales

Tarcilo Torres Valois

Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Beatriz Estela Milicic

Universidad Nacional de Rosario, Argentina

Vicente Sanjosé López

Universitat de València

Resumen: Se muestra un análisis descriptivo del contenido científico de las preguntas formuladas por estudiantes de secundaria y universitarios, cuando tratan de comprender el funcionamiento de dispositivos experimentales. Se consideran tres situaciones didácticas habituales: leer un texto acompañado de imágenes estáticas (esquemáticas); visualizar imágenes dinámicas (video o demostración de cátedra), observar y manipular los dispositivos. Solo una tercera parte de las preguntas de los estudiantes contuvieron algún término científico, aunque los universitarios superaron claramente a los de secundaria. Las leyes y principios científicos, necesarios para modelizar y explicar la realidad, apenas fueron mencionadas por porcentajes muy pequeños de estudiantes, incluso universitarios. Así mismo, se encontraron errores conceptuales e ideas animistas preocupantes. La condición observar y manipular, típica de laboratorios escolares y de museos interactivos, estimuló mayor proporción de preguntas y mayor variedad en el uso de términos científicos en los estudiantes.

Palabras clave: Enseñanza de las ciencias, formulación de preguntas, dispositivos experimentales, uso de conceptos científicos.

Abstract: A descriptive analysis on the scientific content in student's questions on experimental devices is developed. Secondary and university students were faced with experimental devices and tried to understand them. Three different but usual teaching conditions were considered: reading a text with still images, watching dynamic images as in video or teacher demonstrations, and watching and handling the devices. Only the third part of the asked questions mentioned at least one scientific term, although university students over performed secondary students. Scientific laws and principles were scarcely mentioned, although they are necessary to build a scientific model from reality. Some worrying ideas containing conceptual errors and animistic ideas were also found, even among university students. Handling the devices, as usual in laboratory setting and interactive museums, stimulated more questions and a higher variety of scientific terms used in students' questions.

Key Words: Science teaching, question generation, experimental devices, use of scientific concepts.

(Fecha de recepción: junio, 2013, y de aceptación: septiembre, 2013)

DOI: 10.7203/DCES.27.2327

1. Introducción

Los dispositivos experimentales se usan en la educación científica en formas distintas (Trumper, 2003; Holsstein y Lunetta, 2004; Barolli, Luburú y Guridi, 2010 y referencias que contiene). Esta diversidad es debida, entre otros factores, a la variedad de concepciones que los profesores tienen sobre qué es la ciencia y qué significa enseñar ciencia (Lederman, 1999). De hecho, los estudiantes se encuentran con dispositivos experimentales en tres formas básicas a lo largo de sus estudios: a) textos descriptivos que están acompañados de imágenes más o menos esquemáticas; b) demostraciones de cátedra en las que el alumno debe observar sin poder manipular los dispositivos; c) proyectos experimentales en los que el alumno debe manipular físicamente los dispositivos.

Algunos modelos didácticos, como *inquiry teaching* (Anderson, 2002) o *aprendiz como científico novato* (Gil-Pérez, D., Carrascosa, J., Furio, C. y Mtnez-Torregrosa, 1991), o el *Aprendizaje Basado en Problemas* aplicado a las ciencias (Solaz-Portolés, Sanjosé y Gómez, 2011) proponen la realización de proyectos experimentales en los que los estudiantes puedan manipular libremente dispositivos experimentales para generar y desarrollar competencias científicas. Este trabajo práctico aporta beneficios educativos. En primer lugar, el trabajo práctico facilita modelar la realidad a partir de la ciencia (Truyol y Gangoso, 2012). En segundo lugar, el trabajo experimental permite el desarrollo de competencias procedimentales tal como técnicas de medida, control de

variables y relacionar los valores numéricos obtenidos con el mundo real. En tercer lugar, las situaciones experimentales en el laboratorio escolar pueden usarse para situar a los estudiantes tan cerca como sea posible del trabajo de los científicos (Chinn y Malhotra, 2002).

La investigación científica comienza con “una buena pregunta”. De hecho, los profesores coinciden en el potencial de las preguntas de los estudiantes en el aprendizaje de las ciencias (Chin y Osborne, 2008). En correspondencia, las preguntas de los estudiantes en educación científica han sido estudiadas desde diferentes perspectivas, didáctica, epistemológica, cognitiva, procedimental, etc. Han sido clasificadas a partir de distintos criterios (Scardamalia y Bereiter, 1992; Watts, Gould, y Alsop, 1997; Chin y Chia, 2004), se ha analizado su calidad (Graesser y Person, 1994), y han sido relacionadas explícitamente con la comprensión del contenido (Chin, Brown y Bruce, 2002; Harper, Etkina y Lin, 2003).

Las preguntas que se formulan ante dispositivos experimentales también se han investigado. Estudiantes instruidos en situaciones de indagación aprenden a preguntar más y mejores preguntas que estudiantes en otras situaciones de aprendizaje (Hartford y Good, 1982; Cuccio-Schirripa y Steiner, 2000). Graesser y Olde (2003) investigaron el rol del conocimiento previo en la generación de preguntas. Sujetos con diferentes niveles de experiencia se enfrentaron a dispositivos estropeados. Se les pidió que formularan preguntas de modo que sus respuestas les proporcionaran la información necesaria para repararlos.

Graesser y Olde encontraron que los sujetos con mayor nivel de experiencia (conocimiento específico) formularon mayor número de preguntas apropiadas para reparar los dispositivos.

El presente trabajo se dedica, desde un punto de vista descriptivo, a explorar el contenido científico de las preguntas dirigidas a obtener información para comprender los dispositivos. Se analizarán los conceptos e ideas científicas que se constituyen en obstáculo para los estudiantes y que originan sus preguntas, diferenciando entre ideas correctas e ideas inadecuadas o erróneas. Así mismo se estudiarán las posibles diferencias en el contenido de las preguntas debidas al conocimiento previo menor o mayor, es decir entre estudiantes de secundaria y de universidad que estudian física o ingeniería. Se consideraran 3 situaciones en las que con mayor frecuencia los estudiantes se enfrentan a información sobre dispositivos experimentales: a) observar imágenes estáticas, esquemáticas, (condición 'OIE' en adelante) junto con la descripción en texto de los dispositivos; b) observar el funcionamiento de los dispositivos en imágenes dinámicas de video ('OID' en adelante); c) observar y manipular los dispositivos en el laboratorio ('OyM' en adelante).

En estudios recientes (Sanjosé, Torres y Soto, 2012; Torres, Milicic, Soto y Sanjosé, 2012) se ha analizado el modo en que los formatos de presentación de la información sobre dispositivos científicos, afectaba la generación de preguntas en estudiantes de secundaria y universidad. Leer textos con imágenes estáticas sobre dispositivos,

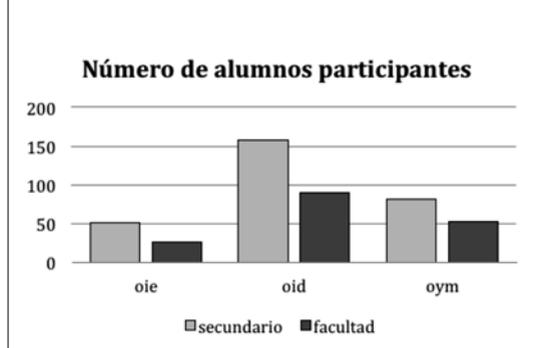
visualizar un DVD sobre su funcionamiento, o manipular dispositivos reales en el laboratorio, causó diferencias en la distribución del tipo de preguntas formuladas por los estudiantes.

2. Método

2.1. Participantes

La muestra estuvo constituida por alumnos de ambos sexos, 278 de secundaria colombianos (11° curso, último antes de la universidad) y españoles (4 ESO o 10° curso, y 2 Bachiller o 12° curso) que estudiaban Física, y 165 universitarios de pregrado en carreras de física (colombianos y españoles) e ingeniería mecánica (colombianos). El experimento se realizó cuando los temas pertinentes para explicar los dispositivos, habían sido ya estudiados en todos los cursos. La distribución de los sujetos en cada condición experimental se hizo asignando grupos naturales al azar a cada una. Los grupos fueron equivalentes a priori. La Figura 1 muestra esa distribución.

Figura 1. Distribución de los participantes por nivel académico y condición experimental.



2.2. Materiales

Se utilizaron 2 dispositivos mecánicos: un *Doble Cono* capaz de rodar por sí mismo hacia la parte superior de un plano inclinado formado por dos guías dispuestas en forma de “V” con el vértice en la parte baja, y el *Diablillo Cartesiano* o *Ludión*. La explicación científica de su funcionamiento puede obtenerse de fuentes especializadas (Websites, 2012).

Siguiendo la recomendación de Dillon (1988), los obstáculos de com-

prensión y, por tanto, las preguntas, se suscitaron al provocar perplejidad en los estudiantes. Ambos dispositivos muestran un comportamiento discrepante con lo esperado: el ‘ascenso’ del doble cono por el plano inclinado sin ayuda, y el ascenso a la superficie del diablillo tras haberse hundido.

Se elaboraron sendos textos para suministrar la misma información lingüística a todos los participantes en las 3 condiciones experimentales consideradas. La tabla 1 muestra esos textos y su estructura.

Tabla 1. Textos empleados para suministrar la información lingüística sobre los dispositivos en las tres condiciones experimentales consideradas.		
Segmento	Un acróbata trepador	El diablillo cartesiano
<i>Activación del modelo mental</i>	Sabemos que un objeto redondo rueda hacia abajo sobre un plano inclinado, si no se le empuja o tiene motor.	Sabemos que cuando un objeto se hunde, no suele regresar a la superficie sin ayuda, excepto los submarinos.
<i>Descripción del dispositivo. Acuerdo con el modelo mental activado.</i>	El ‘acróbata trepador’ consiste en un doble cono (dos conos unidos por su base) y en un plano inclinado formado por dos guías rectas. Si se disponen las guías en paralelo y se deposita el doble cono sobre ellas, el objeto rueda hacia abajo como se espera.	El ‘diablillo cartesiano’ consiste en una tapa de bolígrafo con un trocito de plastilina pegado en su pestaña, dentro de una botella de plástico casi llena de agua con su tapón. Si se deja flotando la tapa de bolígrafo en la botella cerrada y se aprieta la botella, el ‘diablillo’ se hunde como se espera.
<i>Violación de expectativas. Perplejidad.</i>	Sin embargo, si se abre el ángulo de las guías para que sean convergentes, ¡el ‘acróbata’ rueda hacia arriba por la rampa sin ayuda!	Sin embargo, si se deja de apretar la botella, el ‘diablillo’ ¡vuelve a subir a la superficie sin ayuda!
	<i>Escribe tus preguntas aquí (las que realmente necesites para explicar este dispositivo a otro/a compañero/a que no lo haya visto)</i>	<i>Escribe tus preguntas aquí (las que realmente necesites para explicar este dispositivo a otro/a compañero/a que no lo haya visto)</i>

En la condición experimental OID, se elaboraron sendos archivos de video para ser visionados en un ordenador. Los dispositivos se montaron en un lugar adecuado y se procedió a filmar el funcionamiento completo de cada dispositivo. La grabación fue realizada por un técnico especializado con un equipo profesional. Se tomaron varios planos con diferente perspectiva para facilitar la comprensión del funcionamiento de los dispositivos. La duración de los archivos fue de 5:00 min (acróbata) 4:30 min (diablillo).

En la condición OyM (en el laboratorio) los dispositivos se instalaron físicamente en lugares apropiados de los laboratorios de cada centro educativo.

En la condición OIE, cada uno de los textos se acompañó con 3 imágenes estáticas, una por cada segmento del texto, a las que se añadieron rótulos y flechas para indicar sentido de movimiento, de giro, etc. como es típico en los libros de texto. Para evitar introducir diferencias entre condiciones, las imágenes se tomaron directamente de los vídeos elaborados para la condición OID y, por tanto, adquirieron el aspecto de fotografías. Con ello, el realismo de las imágenes quedó igualado entre condiciones.

2.3. Variables y Medidas

Los factores independientes fueron la condición experimental (OIE/ OID/ OyM) y el nivel educativo (Secundaria/ Universidad). En algunos análisis, las condiciones experimentales fueron estudiadas de acuerdo con sus dos factores diferenciales: el carácter estático/

dinámico de las imágenes que acompañan a los textos; b) la posibilidad de sólo observar/ observar y manipular los dispositivos.

En cada condición experimental y en cada nivel educativo se contabilizó el número de preguntas formuladas por cada estudiante, destinadas a comprender los dispositivos y se calcularon promedios y proporciones. Estas preguntas se clasificaron según una taxonomía ya utilizada en este tipo de estudios (Torres et al., 2012). Después, y de un modo detallado, se estudió el contenido de esas preguntas diferenciando aquellas que contuvieran términos científicos (conceptos, leyes, principios), factores causales no científicos (como materiales, formas, tamaños, ángulos, etc.), ideas científicas completas correctas e ideas erróneas.

2.4. Procedimiento

En todo el proceso se respetó un protocolo ético. Profesores, padres y estudiantes fueron informados antes de la toma de datos para asegurar su consentimiento y participación voluntaria. Los investigadores se comprometieron a respetar la confidencialidad de los datos en todo momento.

Se siguió un procedimiento específico para asegurar que los estudiantes formularan las preguntas que realmente necesitaran para comprender los dispositivos (Ishiwa et al. 2012; Torres et al. 2012). Para ello, se proporcionó a los estudiantes una meta para la tarea: comprender para explicar después los dispositivos a otro compañero/a que no los habría leído/observado antes. Las

preguntas que formularan en la sesión presente serían contestadas antes de tener que realizar la explicación. La calidad de la explicación sería evaluada. Al final de la toma de datos, se informó a los estudiantes de que la segunda sesión no tendría lugar por ser innecesaria, y se respondieron las preguntas de los estudiantes.

En la condición OIE la toma de datos tuvo lugar en el aula habitual de los estudiantes. En la condición OID, se llevó a los participantes a un aula de informática para que cada uno dispusiera de un ordenador personal con los archivos de video instalados. En ambas condiciones, un investigador repartió las instrucciones a los estudiantes y las leyó en voz alta. Tras clarificar las dudas, el material del primer dispositivo (un texto con imágenes estáticas en OIE o sin ellas en OID) con el espacio para escribir las preguntas, fue repartido. El orden de los textos fue contrabalanceado. Los estudiantes de la condición OID fueron instruidos para visionar el correspondiente archivo de video libremente tras leer el texto. Tras recoger las hojas con las preguntas, se repartió el segundo texto y se siguió el mismo procedimiento.

En la condición OyM, los participantes fueron conducidos al laboratorio escolar uno a uno. El estudiante leyó con el investigador las instrucciones y se aclararon sus dudas. Luego se le repartió el primer texto (sin las imágenes estáticas) con el espacio para escribir las preguntas y, tras leerlo, el investigador hizo funcionar el primer dispositivo dos veces, mientras narra oralmente exactamente la misma infor-

mación contenida en el texto y ya leída por el estudiante. Después, el estudiante fue invitado a manipular libremente el dispositivo y a escribir cuantas preguntas necesitara. Una vez recogidas las preguntas, se procedió de idéntica forma con el segundo dispositivo. El orden de presentación de los dispositivos a los sucesivos participantes fue contrabalanceado.

En las tres condiciones se avisó a los participantes al comienzo que el tiempo dedicado a cada dispositivo (análisis y preguntas) estaba limitado a 15 minutos.

3. Resultados y Discusión

Sobre el diablillo cartesiano, los estudiantes de secundaria participantes realizaron un total de 1140 preguntas y los universitarios un total de 960, lo que corresponde a promedios de 4,1 preguntas por estudiante secundario y 5,8 por estudiante universitario. Sobre el acróbata trepador (doble cono) los estudiantes secundarios realizaron un total de 1061 preguntas y los estudiantes universitarios un total de 937, lo que corresponde a promedios de 3,8 y 5,7 respectivamente.

Se pueden diferenciar tipologías distintas de preguntas:

- Conocer mejor las entidades presentes. Por ejemplo: “¿ahora le cuesta más bajar, no?” “¿cuánto pesa la plastilina?”; “¿por qué sube la rampa?”; “¿cuál es el ángulo de los conos?”
- Explicar por qué las cosas son como son: “¿el peso del diablillo es lo que hace que se hunda?”; “¿Por

qué sube el diablillo (tras hundirse)?”; Incluso explicar adelantando hipótesis causales: “¿lo que causa que vuela a subir el diablillo es la disminución de presión que ocurre en el seno del líquido al soltar la botella?”, “¿Acaso queda una burbuja de aire dentro de la tapa del boli y eso le ayuda a flotar?”; “¿será que el ángulo de apertura tiene algo que ver para que suba?”; “¿Se ejerce una fuerza por parte de las guías al cambiar el ángulo y esto hace que el dispositivo suba?”

- Predecir eventos no observados que sucederían en condiciones ligeramente distintas a las presentes: “*qué pasaría si la botella estuviera destapada?*”; “*¿qué pasaría si la botella estuviera totalmente llena de agua?*”; “*Si la pendiente de la rampa fuera de 45° el acróbata no subiría, ¿verdad?*”

3.1. Preguntas sobre el Diablillo *Cartesiano o Ludión*

A pesar del alto promedio de preguntas por estudiante, las preguntas con algún contenido científico no son abundantes. La mayor parte de las preguntas no incluyen ningún concepto científico, ni ley, etc., sino que se formulan utilizando lenguaje ordinario. Las Tablas 2 y 3 muestran respectivamente, las preguntas más frecuentes que usan sólo lenguaje ordinario, o incluyen al menos un término científico.

En el contexto de la educación científica, interesa estudiar, precisamente, este tipo de preguntas, cuyo origen está en el intento de los estudiantes, no logrado,

Tabla 2. Preguntas frecuentes que se formulan empleando lenguaje ordinario

Preguntas

- ¿Por qué se hunde?
- ¿Por qué, cuando se deja de apretar la botella, vuelve a subir?
- ¿Para qué es el trocito de plastilina?
- ¿Qué pasa si no tapo la botella?
- ¿Qué pasa si pongo aceite en vez de agua en la botella?
- ¿Por qué baja tan rápido?
- ¿Por qué la botella no está totalmente llena con agua?

Tabla 3. Preguntas más frecuentes sobre el diablillo cartesiano que incluyen términos científicos.

Preguntas

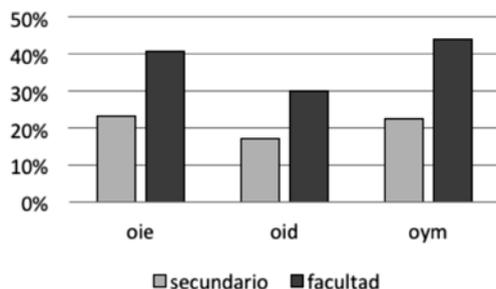
- ¿Baja por la presión?
- ¿Si el líquido fuera más denso también subiría?
- ¿Cuáles son las fuerzas que actúan para que el diablillo se hunda?
- ¿Es por la fuerza aplicada que baja y sube el diablillo?
- ¿Puede ser que el peso influya para que el diablillo baje y suba?
- ¿La única restricción es que la presión total dentro del recipiente sea variable?

de construir una representación mental abstracta, científica, de la información suministrada (Greeno, 1989).

Globalmente, el porcentaje de preguntas que mencionan al menos un término científico, sea concepto, ley o principio, es de un 30% aproximadamente, tal como se deduce de la Figura 1B. Sin embargo, y tal como se espera, los estudiantes universitarios formularon el doble de preguntas con términos científicos que los estudiantes de secundaria. Respecto de las tres condiciones experimentales, no se observan grandes diferencias entre ellas en cada nivel educativo.

Aunque los conceptos científicos aparecen en una de cada tres preguntas como promedio, la variabilidad de los mismos es pequeña. Es decir, muchas preguntas aluden a los mismos pocos conceptos. En la Tabla 4 se presenta el porcentaje de alumnos que mencionan cada concepto, cuando ese porcentaje

Figura 1B: Porcentaje de preguntas que incluyen conceptos científicos, según condición experimental y nivel educativo.



superó el 2% en cualquiera de las condiciones experimentales y niveles educativos. Sólo seis conceptos son mencionados por más del 10% de los alumnos en alguna condición experimental y nivel

Tabla 4: Porcentaje de alumnos que mencionan conceptos científicos según tipo de experiencia y nivel educativo.

Conceptos	Secundaria			Universidad		
	OIE	OID	OyM	OIE	OID	OyM
Presión	41,1%	42,0%	45,7%	92,3%	52,8%	53,8%
Peso	11,8%	15,9%	27,1%	23,1%	22,5%	32,7%
Fuerza	0,0%	38,4%	10,0%	12,1%	18,0%	26,9%
Densidad	0,0%	12,1%	12,3%	46,1%	29,2%	48,1%
Viscosidad	0,0%	1,9%	4,9%	19,2%	2,2%	11,5%
Velocidad	0,0%	10,3%	12,3%	3,8%	9,0%	13,4%
Empuje	0,0%	5,6%	2,5%	0,0%	4,5%	7,7%
Vacío	0,0%	0,8%	0,0%	3,8%	6,7%	0,0%
Presión atmosférica	0,0%	0,9%	0,0%	3,8%	1,1%	0,0%
Principios, Leyes						
Arquímedes	0,0%	6,5%	7,4%	0,0%	5,6%	0,0%
Pascal	0,0%	0,0%	2,5%	0,0%	1,1%	0,0%

educativo: presión, densidad, peso, viscosidad, fuerza y velocidad. Los demás conceptos son mencionados por muy pocos estudiantes.

Como se dijo antes, los alumnos universitarios muestran porcentajes más altos que los de secundaria en general. También se observan diferencias entre condiciones experimentales. La condición OyM estimula el uso de mayor diversidad de términos científicos. En la condición OIE, porcentajes muy pequeños de estudiantes mencionaron términos diferentes de presión y peso. Sin embargo, en la condición OyM aparecen porcentajes apreciables de estudiantes que usan 5 conceptos, presión, peso, densidad, fuerza y velocidad.

A continuación se muestran ejemplos típicos del uso que los estudiantes de Secundaria ('S') y de Universidad ('U') dan a los conceptos científicos en sus preguntas.

Respecto de la **presión**, el significado dado por los estudiantes es diverso: la presión con que se aprieta la botella y la presión que se transmite en el seno del líquido. En su inmensa mayoría las preguntas son causales, del tipo “*¿El diablillo baja debido a la presión con que se aprieta la botella?*” (S-U). Sin embargo hay preguntas que implican la relación entre variables, por ejemplo: “*¿Cómo está relacionada la velocidad del diablillo con la presión que ejercemos al apretar la botella?*” (S-U), valores límites de variables implicadas: “*¿Cuál debe ser la presión mínima que debe ejercer la mano sobre la botella para que el experimento funcione?*” (U) o la formulación de hipótesis: “*¿será que la presión de la botella sin apretar es*

menor a la presión que hay dentro de la tapa?” (S).” *¿Si llenamos la botella con más agua y hacemos el mismo procedimiento, se necesita más o menos presión para que el diablillo baje?*” (S)

Respecto del concepto **peso**, en el cómputo de la frecuencia se han englobado aquéllas que incluyen los conceptos “peso” y “fuerza gravitatoria”. La mayor parte de las preguntas son causales del tipo “*¿baja por el peso [del diablillo]?*”, una de las pocas preguntas que no lo son, incluye valores límites de la variable: “*¿Cuál es el peso mínimo de la plastilina para que el diablillo baje por el agua?*” (S-U)

La **velocidad** se presenta asociada a la presión y la fuerza, ya que en la mayoría de los casos se pregunta cómo varía la velocidad con que el diablillo asciende o desciende en función de la presión/fuerza que se ejerce sobre la botella.

Respecto del concepto **fuerza**, se emplea en referencia a la fuerza que se ejerce al apretar la botella (“*¿influye la fuerza con que se apriete la botella?*”) por lo cual debería asociarse con el concepto *presión*, por ejemplo: “*¿cuál es la relación entre la fuerza ejercida sobre la botella y la velocidad con la que baja el diablillo?*” (S-U). Se observa sólo una pregunta sobre las fuerzas que actúan sobre el diablillo: “*¿Qué fuerzas actúan sobre el diablillo en cada uno de los casos y de qué manera?*” (U)

La **densidad** está incluida en hipótesis planteadas: “*Si se aumentara la densidad del líquido excesivamente y quizás también la viscosidad, ¿bajaría el diablillo igual?*” (U) y “*¿el cuerpo que*

asciende pierde densidad por la presión?” (S).

El **volumen** aparece presente en casi todas las categorías. En general, los alumnos se refieren al volumen de agua presente dentro de la botella, por ejemplo: *“¿Qué relación existe entre el volumen de la botella y el volumen del líquido?”*, excepto en este caso: *“¿Hay alguna relación entre el volumen de la botella y el volumen de los objetos del experimento?”*

Es preocupante atender a los conceptos que, siendo muy relevantes para la comprensión del Ludión, no se mencionan o son muy poco frecuentes. El **empuje** y los principios de **Arquímedes** y de **Pascal** son mencionados por porcentajes pequeños de estudiantes, incluso entre los universitarios (ver Tabla 4). No hay ninguna mención de la **Ley de Boyle y Mariotte**, relacionada con la variación del volumen de la burbuja de aire dentro del diablillo.

Algunas preguntas de los estudiantes no sólo incluyen términos científicos aislados, sino ideas completas de carácter científico. Estas ideas pueden asociar entre sí dos o más conceptos científicos, aludir a relaciones causales, interesarse por los rangos de valores adecuados para ciertos parámetros, etc. A pesar de que son el tipo de preguntas más interesantes, y esperables al menos en la universidad, se presentan en porcentajes pequeños de estudiantes.

Algunas de las preguntas más frecuentes incluyendo ideas completas se muestran a continuación.

–“¿El hecho de que baje y luego suba [el diablillo], tiene su explicación en el

principio de Arquímedes y de Pascal?” (U).

–“Al estar el recipiente cerrado la cantidad de aire se encuentra invariable y cuando apretamos ejercemos una fuerza [presión], estamos reduciendo el espacio que ocupa el aire [en la tapa del bolígrafo] en este preciso momento el peso [del diablillo] es mayor que el empuje, por lo tanto el diablillo cartesiano desciende, ¿es así?” (S-U).

–“¿Al aumentar la presión [en el líquido], la masa de la bola de plastilina es suficiente para contrarrestar la densidad de la burbuja [que se encuentra en el interior de la tapa] inferior [por eso es que flota] a la del agua [que es mayor] y así se hunde?” (S).

Además de la escasez de preguntas con ideas científicas completas, aparece otro motivo de preocupación: las preguntas que incluyen modelos explicativos inadecuados, o errores científicos, como las siguientes:

–“¿El diablillo sube porque cuando se aprieta la botella, el agua se desplaza creando cierta corriente?”: esta pregunta surge tanto en alumnos de secundaria como universitarios (6% de los alumnos universitarios). En vez de relacionarlo con el principio de Arquímedes, se lo relaciona con un desplazamiento de agua que arrastraría al diablillo.

–“Cuando flota, sabemos que el empuje del agua es igual a la presión del objeto que flota, entonces, cuando presionas la botella con la mano, ¿no debería ser mayor el empuje?” (S) Por un lado se comparten magnitudes que no pueden compararse (presión y empuje), pero además, la palabra “empuje” parecería que está asociada al desplazamiento

del agua que se menciona en la pregunta anterior.

–“¿La densidad del fluido en el que se sumerge el diablillo es proporcional a la presión impresa en la botella?” (U) Se incluye el error conceptual de no considerar que los líquidos ideales son incompresibles.

–“¿Baja porque al apretar la botella el volumen aumenta, entonces el empuje de Arquímedes hace que descienda y reducirse, entonces sube?” (S) En esta pregunta, si bien encuadran bien el fenómeno, interpretan mal la variación del volumen del diablillo y su relación con el empuje.

–“¿Depende de que se reduce la superficie del agua y al haber menos superficie donde repartirse la presión, se hunde?” (S) El concepto de presión está bien aplicado, pero no se comprende a qué superficie se refiere cuando dice que se reduce.

–“Si el tapón tiene oxígeno cuando lo sueltas sobre el agua, cuando aprietas la botella se llena de agua y se hundirá, pero ¿cómo puede subir si está lleno de agua?” (S) Analiza bien la razón por la que se hunde el diablillo, pero no puede analizar qué sucede al soltarse la botella.

Incluso aparecen preguntas que revelan concepciones de tipo animista:

–“Al hacer presión, ¿el agua se concentra y ésta ayuda a que descienda?” (S) (El agua es quien ayuda a descender al diablillo).

–“¿Si incrementamos la presión en la botella, esto hace que el diablillo pierda peso o que el aire que pueda haber dentro de la tapa pierda su característica de mantener el cuerpo a flote?” (U)

(Asocia al aire la propiedad de mantener el cuerpo a flote, no puede asociarlo al principio de Arquímedes).

–“¿Vuelve a subir para recuperar su posición de equilibrio?” (S), “El cuerpo desciende porque pierde densidad por la presión?” (U) (Según estas preguntas es el diablillo quien realiza las acciones).

3.2. Preguntas sobre el ‘Acrobata Trepador’

Como en el caso del diablillo cartesiano o ludión, la mayor parte de las preguntas no incluyen ningún concepto ni ley científica, sino que se formulan utilizando lenguaje ordinario. Las Tablas 5 y 6 muestran las preguntas más frecuentes que no incluyen o sí incluyen, respectivamente, términos científicos.

Tabla 5. Preguntas frecuentes que se formulan empleando lenguaje ordinario

Preguntas

¿Por qué el doble cono rueda de abajo hacia arriba y no de arriba hacia abajo?

¿Qué pasaría si los dobles conos fueran huecos?

¿Cómo es que sube hasta el final?

¿Con un acróbata de goma subiría igual? Si se pusiera el cacharro (sic) a mitad de las barras, ¿subiría o bajaría?

¿Qué pasaría si la parte abierta estuviera abajo?

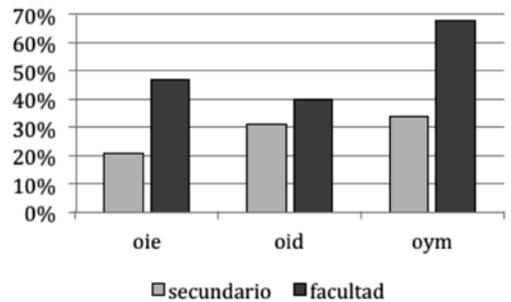
¿Cómo es que sube cuando se abren las guías?

Tabla 6. Preguntas frecuentes que incluyen términos científicos

Preguntas

- ¿Qué fuerzas actúan sobre el doble cono?
- ¿Tiene que ver con el ángulo de las guías?
- ¿Qué pasaría si el ángulo de los conos fuera mayor?
- Si las guías fueran más largas, ¿qué velocidad máxima alcanzaría el doble cono?
- ¿Puede ser que el peso influya para que el doble cono ascienda?

Figura 2: Total de preguntas formuladas por los estudiantes según condición experimental y nivel educativo. Se especifican las preguntas que incluyen conceptos científicos.



En la Figura 2 se muestran los porcentajes de preguntas conteniendo términos científicos respecto del total de preguntas, en cada condición experimental y nivel educativo. Los universitarios realizaron un 30% más de preguntas conteniendo términos científicos que los alumnos de secundaria. En este dispositivo se aprecia también un efecto claro de la condición experimental, ya que los estudiantes en condición oie formularon mejor porcentaje de preguntas con términos científicos que los de la condición oid, y éstos, menor que los de la condición oym.

En este dispositivo, un mayor número de conceptos fueron mencionados por porcentajes significativos de estudiantes. La Tabla 7 muestra el porcentaje de estudiantes en cada condición experimental y nivel educativo, que utilizan conceptos científicos en sus preguntas (sólo se muestran los porcentajes supe-

riores al 5% en cualquier condición y nivel). Encontramos de nuevo diferencias entre alumnos de secundaria y de universidad en la cantidad de términos científicos utilizados. El 43,1 % de los alumnos de secundaria en la condición observar imágenes estáticas (OIE) mencionan los conceptos científicos, peso y velocidad. En las condiciones observar imágenes dinámicas (OID) u observar y manipular (OyM), seis conceptos: peso, velocidad, fuerza, ángulo (ángulo de inclinación y de convergencia), reúnen un porcentaje superior al 70% de los estudiantes. Los estudiantes universitarios mencionan prácticamente el mismo número de conceptos en todas las condiciones experimentales y utilizan más conceptos en sus preguntas.

Es interesante notar que el concepto de energía, muy pertinente para explicar el doble cono, fue muy poco mencionado entre los estudiantes de secunda-

Tabla 7. Porcentaje de alumnos que menciona cada concepto científico en sus preguntas sobre el ‘acróbata trepador’ (doble cono).

Conceptos	Secundaria			Universidad		
	OIE	OID	OyM	OIE	OID	OyM
Peso	19,6%	9,3%	22,2%	19,2%	27,0%	51,9%
Velocidad	23,5%	6,5%	16,0%	19,2%	9,0%	32,7%
Fuerza	5,9%	4,7%	13,6%	15,4%	13,5%	23,1%
Ángulo	2,0%	21,5%	21,0%	73,1%	40,4%	44,2%
Áng. inclinación	0,0%	21,5%	14,8%	73,1%	28,1%	23,1%
Áng. del cono	0,0%	1,9%	1,2%	7,7%	4,5%	0,0%
Áng. convergencia	0,0%	14,0%	9,9%	34,6%	5,6%	9,6%
Fricción	5,9%	1,9%	3,7%	19,2%	16,9%	11,5%
Geometría	3,9%	0,0%	0,0%	30,8%	1,1%	13,5%
Plano inclinado	0,0%	7,5%	3,7%	0,0%	12,4%	23,1%
Aceleración	3,9%	1,9%	3,7%	0,0%	2,2%	5,8%
Energía	0,0%	0,9%	1,2%	3,8%	4,5%	9,6%
Masa	3,9%	2,8%	0,0%	11,5%	5,6%	5,8%
Simetría	0,0%	0,0%	0,0%	7,7%	1,1%	0,0%
Momento de inercia	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,5%	9,6%
Centro de masa	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	13,5%	7,7%
Trabajo	0,0%	1,9%	0,0%	0,0%	1,1%	5,8%

ria, y sólo estuvo cerca del 10% entre los universitarios en la condición OyM. Los estudiantes no utilizaron el principio de conservación de la energía, ni el de equilibrio asociado con posiciones de mínima energía potencial, en sus preguntas.

A continuación se presentará el análisis del uso de los conceptos más frecuentes en las preguntas destinadas a explicar el doble cono.

Peso: Se agruparon aquí las preguntas que incluyen al peso y la fuerza gravitatoria. En todas las categorías es uno de los conceptos más frecuentes. Además de las preguntas causales, se observan las de relación entre varia-

bles: “¿Si el vector de fuerza resultante fuera inferior al peso, el doble cono subiría?” (U), “¿Qué pasaría en otro planeta con menor gravedad?; ¿Habría que cambiar los ángulos?” (S), formulación de hipótesis: “¿por qué no baja, si está en un plano inclinado bajo la acción gravitacional?” (S-U).

Ángulo de inclinación de las guías: es uno de los conceptos incluido con mayor frecuencia en las preguntas de los alumnos, si bien en los estudiantes de secundaria surge al observar imágenes dinámicas y al manipular. Además de las preguntas causales, se observan las que se refieren a valores límites: “¿Cuál es el ángulo de inclinación máximo del

plano en el que el acróbata sube por las guías?” (S-U), o de relación entre variables: “*¿Cómo afecta el ángulo de inclinación las fuerzas que actúan sobre el doble cono?”* (S-U).

Ángulo de apertura de las guías: es un concepto frecuente en los estudiantes de facultad obteniéndose valores del 35% para la observación de imágenes estáticas. Además de las preguntas causales, se encuentran las de relación entre variables, como las siguientes: “*¿Existe alguna relación entre la conicidad y el ángulo de separación entre las dos guías?”* (U), “*¿hay alguna relación entre los ángulos de inclinación y de separación de los rieles?”* (S-U) o de valores límites: “*¿Qué tanto debo separar las guías para que ocurra este fenómeno?”* (S-U)

Muchos estudiantes incluyeron el concepto ángulo en sus preguntas, sin especificar a cuál de los tres ángulos (inclinación, apertura, cono) se referían. En los alumnos de secundaria se incrementa desde el 1% en las imágenes estáticas hasta más del 20% al manipular. Se observan también preguntas de valores límites: “*¿Cuál es el ángulo límite para que el cono no pueda subir?”* (S-U) y de relación entre variables: “*¿Cómo influye el ángulo para que el doble cono suba con tanta velocidad?”* (S-U).

En todas las categorías, los alumnos mencionan el concepto **velocidad**, pero siempre está incluido en preguntas donde se relacionan variables como “*¿variará la velocidad con que el acróbata sube si se inclinan más las guías?”* (S-U), “*¿Cómo varía la velocidad del acróbata de acuerdo al ángulo de sepa-*

ración de las guías?” (S-U), y en formulación de hipótesis “*¿El peso del cono hace que varíe la velocidad con que sube el cono?”*(S-U)

En muchas preguntas se incluye a “las **fuerzas**” de manera general, ninguno se planteó analizar qué fuerzas están asociadas a este sistema. Los estudiantes universitarios la mencionan con una frecuencia superior al 13%.

De nuevo se encontraron pequeñas proporciones de preguntas que incluirían ideas científicas completas. Algunas de las más frecuentes se exponen a continuación.

Un ejemplo de relación entre variables que aparece frecuentemente entre los estudiantes universitarios es: “*¿Cómo afecta el ángulo de inclinación de las guías a las fuerzas que actúan sobre el doble cono?”* (U), y en la formulación de hipótesis: “*¿Se ejerce una fuerza por parte de las guías al cambiar el ángulo y esto hace que el dispositivo suba?”* (S-U) En este caso, se observa que tanto la fuerza como el ángulo están generalizados, no se especifica a ninguno de los dos.

Una variable no cuantitativa que incluyeron todas las categorías es el material, relacionado con una idea causal. Un ejemplo frecuente de relación entre variables es: “*¿Si el doble cono fuera de otro material, subiría con la misma velocidad?”* (S-U).

Es interesante observar cuáles son los conceptos que no se mencionan o lo hace menos del 10% de los alumnos: cuerpo rígido, roto-traslación, fuerza neta o resultante, fuerza normal y fuerza de rozamiento no han sido mencionados por los alumnos de secundaria ni

de universidad. El concepto de **centro de masa** surge en el 13,4% de los estudiantes universitarios sólo al observar imágenes dinámicas. El concepto de **rotación** surge en un 4,9% de los estudiantes universitarios que observan imágenes dinámicas y el 1,9% de los que manipulan. El concepto de **torque** surge sólo en el 1,1% de los estudiantes universitarios que observan imágenes dinámicas. La fuerza de **fricción** es mencionada por el 13,0% de los estudiantes universitarios al observar imágenes estáticas en preguntas del tipo: *“¿Cómo actúa la fuerza de fricción en el proceso de rotación, cuando el doble cono sube?”*

En relación con un análisis basado en las **energías** puestas en juego, no se incluyen al observar imágenes estáticas; los alumnos secundarios la mencionan el 2% aproximadamente, tanto en imágenes dinámicas como al manipular, mientras que en los universitarios es inferior al 6% en ambas categorías. Aparece en preguntas causales, así como en rango de valores: *“¿Puede alcanzar el doble cono un estado de mínima energía en un punto diferente a los extremos?”*

Con respecto a los conceptos de energía mecánica, potencial y cinética, los incluyeron el 1% de los alumnos secundarios en las distintas categorías. Respecto de los universitarios, el 1% incluyó energía mecánica al observar imágenes dinámicas y el 2% al manipular; en esta última categoría, el 2% incluyó energía potencial y el 9%, energía cinética. Todos estos conceptos se incluyeron en preguntas causales.

No hay preguntas explicativas en alumnos de secundaria, y entre los universitarios son escasas las preguntas que realmente intentan explicar el funcionamiento del ‘acróbata trepador’ y buscan confirmación:

- *“¿Se ejerce una fuerza por parte de las guías al cambiar el ángulo y esto hace que el dispositivo suba?”* (U). En este caso se menciona un ángulo sin especificar si es el de apertura de las guías o el de inclinación de la rampa, y tampoco se realiza un esfuerzo por determinar la fuerza aludida.
- *“¿Hay una relación entre los tres ángulos que hace que el doble cono suba?”* (U)

También se recogieron preguntas que incluyen modelos explicativos inadecuados o errores científicos:

- *¿Este proceso es cíclico? Es decir, sin que se para el movimiento, al cerrar en paralelo y abrir de nuevo convergentemente la guías, ¿podrá continuarse es interrupción?* (U)
- *¿Puede girar el cono sobre su propio eje y es por ello que sube?* (U)
- *¿El hecho de que suba implica que el doble cono tiene energía acumulada?* (S-U)
- *¿Hay conservación de la energía en el sistema aun cuando hay un trabajo externo?* (U)
- *¿Sube porque el peso del doble cono es inferior a la inercia y la energía cinética que lo mantiene en movimiento?* (U)
- *¿El fenómeno se debe a que al estar los propios lados del doble cono inclinados, tiende a moverse para cualquier lado?* (S)

Finalmente, se vuelven a encontrar algunas preguntas de tipo animista:

- *¿El doble cono sube porque tiende a ocupar toda la superficie de las guías y cuando acaba la superficie del cuerpo y comienzan los palos, deja de subir?* (S)
- *“¿Vuelve a subir para recuperar su posición de equilibrio?”* (U),
- *“¿Sube porque el centro de masa a medida que avanza va buscando su punto de equilibrio?”* (U)
- *“¿Sube porque busca la abertura?”* (U)
- *“¿Si el trabajo realizado por el doble cono fuera mayor que la energía cinética, subiría?”* (U)

4. Conclusiones

En este trabajo se pretendía describir el tipo de preguntas que los estudiantes de educación secundaria, y universitarios, formulan cuando necesitan comprender dispositivos experimentales. Se consideraron tres situaciones didácticas en las que los dispositivos suelen presentarse: leer y observar imágenes estáticas como gráficos, esquemas, etc., leer y observar imágenes dinámicas en un video o en una demostración de cátedra por ejemplo, y finalmente observar y manipular los dispositivos.

En análisis de las preguntas formuladas muestra varios patrones de interés. En primer lugar, los estudiantes utilizan menos conceptos científicos de los esperables para intentar describir, explicar los dispositivos, o predecir su funcionamiento a través de relaciones causales. Aproximadamente un tercio

de las preguntas formuladas contenían al menos un término científico pero sólo una cuarta parte estuvo destinada a construir una representación mental científica, es decir, incluyó alguna idea completa de naturaleza científica. Eso sí, de acuerdo con lo esperable, los universitarios superaron a los alumnos de secundaria en el uso de estos términos, como en otros trabajos precedentes (Torres, et al. opus cit.).

En segundo lugar, la posibilidad de observar y manipular los dispositivos aumentó la proporción de preguntas causales que usaron términos científicos, y favoreció la aparición de mayor diversidad de los mismos, especialmente entre los universitarios.

Este resultado apoya empíricamente el uso, no sólo del laboratorio escolar, sino también de los museos interactivos de ciencias, cuyo propósito no es tanto exhibir objetos como ideas y conceptos (Rennie y McClafferty, 1998). La libertad que las personas sienten para poder formular preguntas en estos contextos permiten dar la formación solicitada a cada una y, por tanto, son adecuados para alfabetizar científicamente a la población (Segarra, Vilches y Gil, 2008).

En tercer lugar, los principios y leyes de la ciencia que deben ser utilizados para explicar los dispositivos, aparecieron en porcentajes muy pequeños. Tal es el caso del principio de Arquímedes en el Ludión, y del principio de mínima energía potencial en el Acróbata o doble cono. Esto apunta a una falta de formación de una de las competencias científicas: la capacidad para modelizar la realidad en términos de teorías, conceptos, leyes y principios de la ciencia.

En cuarto lugar, otro aspecto muy preocupante fue encontrar, incluso entre los universitarios, ideas claramente erróneas desde el punto de vista científico, en incluso ideas de naturaliza animista. Ello activa una señal de alarma entre los profesores y obliga a meditar sobre la eficacia de los métodos de instrucción habituales, que hacen poco énfasis en los errores conceptuales e ideas alternativas de los estudiantes. La acumulación de cursos y años de estudio no corrige, por sí misma, dichos errores.

5. Referencias bibliográfica

- ANDERSON, R.D. (2002). Reforming science teaching: What research says about inquiry. *Journal of Science Teacher Education*, 13 (1), 1-12.
- BAROLLI, E., LABURÚ, C.E. y GURIDI, V.M. (2010). Laboratorio didáctico de ciencias: caminos de investigación. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 9 (1), 88-110.
- CHIN, C. y CHIA, L.G. (2004). Problem-based learning: using students' questions to drive knowledge construction. *Science Education*, 88, 707-727. DOI: 10.1002/sce.10144
- CHIN, C. y OSBORNE, J. (2008). Students' questions: a potential resource for teaching and learning science. *Studies in Science Education*, 44(1), 1-39. DOI: 10.1080/03057260701828101
- CHIN, C., BROWN, and D. y BRUCE, B. (2002). Student-generated question: A meaningful aspect of learning in science. *International Journal of Science Education*, 24 (5), 521-549. DOI: 10.1080/09500690110095249
- CHINN, C.A., Y MALHOTRA, B.A. (2002). Epistemologically Authentic Inquiry in Schools: A Theoretical Framework for Evaluating Inquiry Tasks. *Science Education* 86, 175-218. DOI: 10.1002/sce.10001
- CUCCIO-SCHIRRIPA, S. Y STEINER, H.E. (2000). Enhancement and analysis of science question level for middle school students. *Journal of Research in Science Teaching*, 37, 210-224. DOI: 10.1002/(sici)1098-2736(200002)37:2<210::aid-tea7>3.0.co;2-i
- DILLON, J.T. (1988). The remedial status of student questioning. *Journal of Curriculum Studies*, 20, 197-210. DOI: 10.1080/0022027880200301
- GIL-PÉREZ, D., CARRASCOSA, J., FURIO, C. & MARTÍNEZ-TORREGROSA, J. (1991). *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. Barcelona: Horsori.
- GRAESSER, A.C., y PERSON, N.K. (1994). Question asking during tutoring. *American Educational Research Journal*, 31, 104-137. DOI: 10.3102/00028312031001104
- GRASSER, A.C. y OLDE, B. (2003). How Does One Know Whether A Person Understands a Device? The Quality of the Questions the Person Asks When the Device Breaks Down. *Journal of Educational Psychology*,

- 95, 524-536. DOI: 10.1037/0022-0663.95.3.524
- GREENO, J.G. (1989). Situations, Mental Models, and Generative Knowledge, en Klahr, D. y Kotovsky, K. (eds.). *Complex Information Processing: The Impact of Herbert Simon*, (pp. 285-318) Lawrence Erlbaum Associates: Hillsdale, NJ.
- HARPER, K., ETKINA, E., y LIN, Y. (2003). Encouraging and analysing student questions in a large physics course: Meaningful patterns for instructors. *Journal of Research in Science Teaching*, 40 (8), 776-791. DOI: 10.1002/TEA.10111
- HARTFORD, F., y GOOD, R. (1982). Training chemistry students to ask research questions. *Journal of Research in Science Teaching*, 19, 559-570. DOI: 10.1002/tea.3660190705
- HOFSTEIN A. y LUNETTA V.N. (2004). The laboratory in science education: foundation for the 21st century. *Science Education*, 88, 28-54.
- ISHIWA, K., SANJOSÉ, V. y OTERO, J. (2012). Questioning and reading goals: Information-seeking questions asked on scientific texts read under different task conditions. Published online in *British Journal of Educational Psychology*. DOI:10.1111/j.2044-8279.2012.02079.x
- LEDERMAN, N. (1999). Teachers' understanding of the nature of science and classroom practice: Factors that facilitate or impede the relationship. *Journal of Research in Science Teaching*, 36 (8), 916-929. DOI: 10.1002/(sici)1098-2736(199910)36:8<916::aid-tea2>3.0.co;2-a
- RENNIE, L.I. y MC CLAFFERTY, T.P. (1998) Science centers and science learning. *Studies in Science Education.*, 27, pp. 53-98
- SANJOSÉ, V., TORRES, T. y SOTO, C. (2012). Effects of scientific information format on the comprehension self-monitoring processes: question generation. Accepted for publication in *Revista de Psicodidáctica*. DOI: 10.1387/RevPsicodidact.4623. Preprint publicado online en <http://www.ehu.es/ojs/index.php/psicodidactica/article/view/4623/6340>. Consultado: 06/03/2013.
- SCARDAMALIA, M., y BEREITER, C. (1992). Test-Based and Knowledge-Based Questioning by Children. *Cognition and Instruction*, 9, 177-199. DOI: 10.1207/s1532690xci0903_1
- SEGARRA, A., VILCHES, A., y GIL, D. (2008) Los museos de ciencias como instrumentos de alfabetización científica. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 22, 85-102.
- SOLAZ-PORTOLÉS, J.J., SANJOSÉ, V. y GÓMEZ, A. (2011). Aprendizaje Basado en Problemas en la educación superior: una metodología necesaria en la formación del profesorado. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 25, 177-186.

- TORRES, MILICIC, SOTO y SANJOSÉ, (2012). Generating students' information seeking questions in the scholar lab: what benefits can we expect from inquiry teaching approaches? Pendiente de revision en *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. DOI: 10.12973/eurasia.2013.934a
- TORRES, T., DUQUE, K.J., ISHIWA, K., SÁNCHEZ, G., SOLAZ-POR-TOLÉS, J.J. y SANJOSÉ, V. (2012). Preguntas de los estudiantes de educación secundaria ante dispositivos experimentales. *Enseñanza de las Ciencias*, 30 (1), 39-60.
- TRUMPER, R. (2003). The physics laboratory – a historical overview and future perspectives. *Science and Education*, 12, 645-670.
- TRUYOL, M.E., y GANGOSO, Z. (2012). Caracterización del proceso de resolución de problemas: el caso de los estudiantes. 97th Reunión Nacional de la Asociación Física Argentina. Córdoba, Septiembre de 2012.
- WATTS, M., GOULD, G., y ALSOP, S. (1997). Questions of understanding: categorising pupils, questions in science. *School Science Review*, 79(286), 57-63.
- WEBSITES, 2012: http://en.wikipedia.org/wiki/Cartesian_diver; http://www.youtube.com/watch?v=G3_yiwyezPY; <http://www.youtube.com/watch?v=eWOLX9W25hQ>; <http://plus.maths.org/content/defying-gravity-uphill-roller>; Consultadas el 22/11/2012

