

La historia se repite: Las concepciones espontáneas sobre el movimiento y la gravedad*

Juan Ignacio Pozo**

Universidad Autónoma de Madrid

INTRODUCCION

Dentro del amplio campo del conocimiento científico se ha abordado el estudio de las concepciones espontáneas de los alumnos en muy diversas áreas. Sin ánimo de ser exhaustivos podríamos citar aquí estudios sobre las ideas de los alumnos con respecto a la *luz* (Anderson y Karrquist, 1983; Goldberg y McDermott, 1983; Guesne, 1985), el *calor* y la *temperatura* (Erickson y Tiberghien, 1985; Strauss, 1981; Wisser y Carey, 1983), la *electricidad* (Cosgrove y Osborne, 1985; Fredette y Lochhead, 1980; Gentner y Gentner, 1983; Shipstone, 1985), los *cambios de estado de la materia* (Driver, 1985; Nussbaum, 1985; Schollum, 1982), el *peso* y la *densidad* (Carretero, 1979, 1984; Rowell y Dawson, 1977; Smith, Carey y Wisser, 1984); la *vida* (Bullock, 1985; Carey, 1985; Delval, 1975; Piaget, 1926), la *selección natural* (Brumby, 1979; Deadman y Kelly, 1978), el *funcionamiento del cuerpo humano* (Carey, 1985; Contento, 1981; Johnson y Wellman, 1982), etc.

Pero de entre todas las áreas investigadas, tal vez la más abundantemente estudiada sea la mecánica. Los estudios sobre las ideas de fuerza y movimiento, gravedad, velocidad y aceleración, etc., son muy numerosos (para una revisión de los mismos, véase también, Driver, 1985 y McDermott, 1984). Las razones de esta preferencia son varias. En primer lugar, la indudable relevancia didáctica de estos temas, que ocupan un lugar insustituible en todo currículum de ciencias, les hace especialmente atractivos. Además, hay razones metodológicas —la relativa facilidad con la que pueden ser analizados dichos conceptos—, pero sobre todo hay una justificación epistemológica o histórica. La evolución de las ideas científicas sobre el movimiento de los objetos sigue constituyendo todavía un modelo de la evolución del pensamiento científico en general. Los nombres de Aristóteles, Galileo o Newton, además por supuesto de Einstein, siguen siendo hitos decisivos en la Historia de la Ciencia. Sus debates y controversias, las diferencias en su

* La redacción del presente artículo está basada en la Tesis Doctoral del autor, dirigida por Mario Carretero. Una versión más extensa de este mismo trabajo puede encontrarse en Pozo (1987a).

** *Dirección del autor:* Departamento de Psicología Básica, Social y Metodología. Facultad de Psicología. Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid.

pensamiento, sintetizan largos siglos de aprendizaje científico. Lo que se pretende en la enseñanza de la ciencia es, más o menos, que el alumno recorra, de modo acelerado, esa lenta evolución de las ideas científicas. En ningún área queda tan claramente reflejada esta pretensión como en el aprendizaje de la mecánica clásica, ya que en esta área se producen, como veremos más adelante, sorprendentes y significativos paralelismos entre las ideas de los alumnos actuales y los pensadores científicos de siglos pasados. Este paralelismo es otra razón para la abundancia de estudios sobre las concepciones espontáneas con respecto al movimiento de los objetos. Pero ese paralelismo aconseja también hacer un breve viaje por la historia de la mecánica clásica antes de analizar propiamente las concepciones espontáneas de los alumnos en esta área.

SUBIDOS A HOMBROS DE GIGANTES: BREVE HISTORIA DE LA MECANICA ¹

La primera teoría (o doctrina) sobre el movimiento digna de mención es la de Aristóteles (siglo IV a. C.), quien distinguía dos tipos de movimientos: los naturales y los violentos, ambos siempre rectilíneos. Según Aristóteles, los cuerpos están compuestos por cuatro elementos (tierra, aire, fuego y agua), cada uno de los cuales posee su propio lugar en el universo. El movimiento natural de los cuerpos sería la tendencia a regresar al lugar que les corresponde en el universo según los elementos de que estén compuestos. Ese movimiento natural, causado por un motor interno, concluye cuando el objeto reposa en su lugar «natural». Así la caída de los cuerpos es el producto de la suma de los movimientos naturales de cada uno de los elementos constitutivos. Por eso, según Aristóteles, los objetos más pesados caen más rápidamente que los más ligeros. Por contra, el movimiento violento o no natural está causado por un motor externo, que ha de estar en continuo contacto con el objeto. Cuando la fuerza de este motor se agota el objeto inicia su movimiento natural de regreso. Ambos movimientos son rectilíneos y sucesivos, por lo que un proyectil, en su caída, dibuja una trayectoria primero horizontal y luego vertical, formando un ángulo recto.

A pesar de que la metafísica aristotélica resultaba en algunos puntos muy fácil de falsar empíricamente —de hecho, desde nuestra perspectiva actual fue falsada en el siglo VI por Filopón, un hereje alejandrino— permaneció dogmáticamente hasta bien entrado el siglo XIII. La razón de su supervivencia hay que buscarla precisamente en la coherencia global de todo su sistema teórico. Era fácil demostrar dónde era erróneo, pero muy difícil elaborar una explicación mejor y más completa. Fue en el siglo XIII cuando surgieron, de la mano de Guillermo de Occam, los primeros esbozos de una teoría alternativa, que luego desarrollaría Buridán con el nombre de «teoría del ímpetus». El abandono de las posiciones aristotélicas se debió a su dificultad para explicar los movimientos no naturales una vez que el objeto pierde el contacto con el motor inicial. ¿Por qué una bala sigue moviéndose una vez fuera del cañón? La explicación aristotélica, basada en la presión del aire, era claramente insatisfactoria y fue *fácilmente* refutada. La explicación alternativa propuesta era muy simple: el motor inicial dota al objeto de un «ímpetus» o fuerza interna, que se va consumiendo hasta que el objeto se detiene. Este ímpetus interactúa de formas extrañas y complejas con

otras fuerzas, de modo que, por ejemplo, si bien se reconoce que la gravedad es la misma para todos los cuerpos, no todos caen a la misma velocidad, ya que en los más pesados la gravedad produce un ímpetus mayor.

La teoría del ímpetus supone sólo un avance parcial con respecto a la aristotélica. Así, sigue atendiendo a la velocidad y no a la aceleración de los cuerpos. Igualmente, carece aún de una noción moderna de la inercia, sosteniendo que los cuerpos siguen moviéndose en la misma dirección que llevaban cuando iniciaron su movimiento. En cuanto a la caída de los proyectiles, se produce un significativo avance parcial. Si bien se sigue manteniendo la sucesividad de los movimientos horizontal y vertical, se admite un cierto «compromiso» entre ambos, ya que, se dice, la gravedad puede empezar a actuar un poco antes de que se agote el ímpetus, de forma que la unión de ambas fuerzas no sería un ángulo sino que tendría una forma levemente redondeada. Así, Leonardo da Vinci, firme partidario de esta concepción, estableció tres partes en el movimiento de caída de un proyectil: horizontal (ímpetus), curvo (mezcla) y vertical (gravedad).

Pero la refutación de Buridán fue sólo parcial. La teoría aristotélica y la del ímpetus siguieron conviviendo durante toda la Edad Media. De hecho, casi tres siglos después, Galileo dedica la mayor parte de sus obras sobre mecánica a rebatir a Aristóteles. Primero refutó, de modo experimental, la doctrina aristotélica —y medieval— de que dos cuerpos de distinto peso caen a distinta velocidad. Para ello dispuso un plano inclinado graduado por el que dejaba caer bolas de distintos pesos. Comprobó que todos caían a la misma velocidad, pero ésta aumentaba uniformemente. Este incremento (aceleración) se debía a la fuerza gravitatoria. De no actuar ésta, los objetos mantendrían un movimiento uniforme. De esta forma, Galileo enunció por primera vez, si bien de forma parcial, como veremos, el principio de la inercia. A continuación, estudió la trayectoria de los proyectiles, estableciendo que en cualquier punto de su caída un objeto tiene dos velocidades: una horizontal constante, debida a la inercia, y otra vertical que aumenta con el tiempo, debida a la gravedad. Estas dos velocidades son independientes y la composición de ambas determina la forma parabólica del movimiento.

Pero tampoco el enorme avance que suponen las ideas de Galileo es definitivo. Aunque en sus formulaciones están presentes casi todos los componentes de la mecánica moderna, él *no fue consciente de ello*. De hecho, puede decirse que no extrajo todas las consecuencias que necesariamente se derivaban de sus propias afirmaciones. El más claro ejemplo de ello lo constituye su formulación parcial del principio de la inercia. Si bien sabía que, en ausencia de fuerzas netas actuando sobre él, un objeto mantiene una velocidad uniforme, no logró percatarse de que ese movimiento uniforme debía ser rectilíneo. En este punto, Galileo incurrió en el mismo error que los teóricos del ímpetus. De esta forma fue incapaz de «generalizar» sus observaciones mecánicas a la astronomía, al concebir la caída de los objetos y el movimiento de los planetas como dos fenómenos distintos. Habría que esperar otro medio siglo para que Newton lograra, en su modelo, hacer la síntesis entre ambas ciencias.

Pero antes de Newton, hubo otra aportación importante al campo de la mecánica. Fue Descartes quien, además de ser el primero en hablar de «leyes de la naturaleza» y ser el padre del dualismo moderno,

dedujo dos leyes fundamentales: la ley de la conservación del movimiento (según la cual éste es universalmente constante desde el principio de los tiempos) y la ley de la inercia como movimiento rectilíneo uniforme.

De esta forma quedaban establecidas las condiciones para que Newton recogiera veinte siglos de especulaciones y disputas científicas y elaborara su «sistema del mundo». Ese sistema está básicamente contenido en tres leyes, enunciadas por Newton, que constituyen los principios de la mecánica, pudiéndose, a partir de ellos, deducir el resto de las leyes (gravitación universal, conservación de la cantidad de movimiento, conservación de la energía, etc.). Esas tres leyes, tal como se conocen actualmente, afirman lo siguiente:

Primera ley (principio de inercia): Un cuerpo permanece en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo a menos que actúe sobre él una fuerza no equilibrada.

Segunda ley (ecuación fundamental de la mecánica): La fuerza que actúa sobre un cuerpo es igual al producto de la aceleración de éste por su masa inerte ($F = m \times a$).

Tercera ley (principio de acción y reacción): Si un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro, éste ejercerá sobre el primero una fuerza igual en sentido contrario.

Esos veinte siglos de Historia de la Mecánica, que acabamos de revisar, resultan enormemente aleccionadores. Asistimos en ellos a una lenta acumulación de nuevos saberes que acaba materializándose en un único sistema. Existe una clara continuidad entre la obra de sus predecesores y el modelo de Newton. El mismo lo reconoció en su famosa frase: «si he visto más lejos que otros hombres es porque estaba subido a hombros de gigantes». Esta modificación gradual hace difícil el establecimiento de períodos de «ciencia normal» o «ciencia revolucionaria» (Kuhn, 1962). De hecho, si efectivamente la aristotélica y la newtoniana son dos cosmologías distintas, en todos los autores intermedios existe en realidad una coexistencia, en diversos grados, de esas formas de ver el mundo. En esta evolución parece difícil establecer el momento exacto en que se produjo esa revolución científica. Y, sin embargo, visto desde hoy, podemos afirmar que la hubo.

Lo que sí parece documentado es que Newton sí era consciente de que se producía tal revolución, cosa que otros autores no lograron captar, con la posible excepción de Descartes. Esa toma de conciencia de Newton con respecto al significado de su teoría, que la *vox populi* atribuye a una oportuna manzana, ocupa sin duda un lugar esencial en la propia elaboración de su modelo teórico. En gran medida, parece que, desde un punto de vista cualitativo, lo que diferencia a Newton de Galileo —que se quedó a las puertas del modelo newtoniano— es esa toma de conciencia, que se acompaña, al modo de la *navaja de Occam*, de una comprensión del carácter semejante de fenómenos que para otros autores eran diversos, mediante el establecimiento de leyes de carácter más general.

Ahora bien, ¿qué relevancia tiene el análisis histórico que acabamos de realizar para la enseñanza de la ciencia? En un principio, puede proporcionarnos una especie de organización conceptual básica en esta área. En la breve historia que hemos trazado hay conceptos que

proceden *evolutivamente* de otros conceptos anteriormente definidos. Esta organización conceptual de la mecánica resulta aún más significativa cuando se analizan las ideas espontáneas de los alumnos en esta área. No sólo existen pasmosas similitudes con la mecánica prenewtoniana sino que además el proceso de superación de esas ideas parece seguir caminos paralelos a los observados en la propia Historia de la Mecánica. En otras palabras, no se trata de observar sólo la posible semejanza entre unas y otras ideas sino sobre todo de analizar si los mecanismos de progreso conceptual son semejantes en ambos casos (Piaget y García, 1981).

CONCEPCIONES ESPONTANEAS DE LOS ALUMNOS

Los primeros estudios sobre las ideas causales ante problemas mecánicos se deben, significativamente, a Piaget (1927), habiendo retomado el propio Piaget, con una nueva perspectiva, estos trabajos en su última etapa (Piaget, 1972; 1973a, 1973b). Junto a estos trabajos evolutivos, que han tenido menos repercusión de la que merecen, se han realizado otras muchas investigaciones agrupadas en torno al estudio de las *concepciones erróneas (misconceptions)* que tienen los adolescentes y adultos, en muchos casos estudiantes universitarios de ciencias, en el área de la mecánica. Junto a su naturaleza no evolutiva, estos trabajos suelen tener en común el uso de situaciones aparentemente simples con materiales familiares, que requieren un conocimiento cualitativo y no cuantitativo. Asimismo, muchos de ellos estudian la relación entre aprendizajes escolares o universitarios y concepciones mecánicas. Pero a pesar de estos rasgos comunes existen múltiples diferencias dentro de esos trabajos, sobre todo de tipo metodológico. Mientras unos utilizan pruebas grupales de papel y lápiz, otros recurren a entrevistas clínicas individuales. Igualmente difiere la edad y la formación académica de los sujetos entrevistados, así como las técnicas utilizadas en el análisis de los datos. Resulta por ello difícil establecer unos resultados globales, sobre todo normativos, con respecto a las teorías causales en mecánica. No obstante, dado que no podemos detenernos en una crítica metodológica (véase, al respecto, Driver, 1981; Driver y Easley, 1978; Driver y Erickson, 1983; West y Pines, 1985), intentaremos hallar unas tendencias generales a partir de estos trabajos que nos permitan responder a algunas preguntas con respecto a la consistencia, el origen y el desarrollo de las concepciones espontáneas en mecánica, así como a su sorprendente similitud con las explicaciones anteriores históricamente al modelo newtoniano.

Dado que no podríamos analizar aquí con todo el detalle necesario todas las concepciones espontáneas estudiadas en relación con el «sistema del mundo» newtoniano, limitaremos nuestra exposición a dos áreas concretas especialmente relevantes: las ideas sobre fuerza y movimiento y las ideas sobre la gravitación de los cuerpos. El lector encontrará el análisis de otras áreas, como el desarrollo de los conceptos de velocidad/aceleración, así como una exposición más minuciosa de los resultados que se presentarán a continuación, en Pozo (1987a).

Concepciones sobre fuerza y movimiento

La mayor parte de las investigaciones se han ocupado de las ideas cualitativas de los sujetos con respecto a las relaciones entre fuerza y movimiento, recogidas en las dos primeras leyes del sistema newtoniano (en realidad la primera ley es un caso particular de la segunda, que se produce cuando ninguna fuerza neta actúa sobre un cuerpo, de forma que $F = 0$, por lo que también $a = 0$). Se ha estudiado particularmente la comprensión del principio de la inercia. Ahora bien, este principio, aparentemente simple en su enunciado, podemos descomponerlo, desde un punto de vista psicológico, en diversas nociones de distinta complejidad.

La más simple de todas sería la idea de que los cuerpos se mueven indefinidamente a no ser que haya una fuerza que se les oponga. De hecho, este es el sentido intuitivo que tiene para la mayor parte de la gente la inercia. Según White (1983), el 80 por 100 de una muestra con una edad media de 16 años compartía esta idea cuando se le enfrentaba a un movimiento en el vacío, mientras que el 20 por 100 creía que el objeto en el vacío se acabaría deteniendo (en la Tabla 1, que resume todas las concepciones espontáneas que vamos a comentar sobre

TABLA I
Concepciones espontáneas en mecánica (fuerza y movimiento).

núm.	Mecánica newtoniana	Concepción alternativa	sujetos
FM1	Los cuerpos en el vacío se mueven indefinidamente	Los cuerpos en el vacío acaban deteniéndose	adolescentes
FM2	El «motor» de un movimiento puede actuar a distancia	El «motor» ha de estar en contacto físico con el móvil	niños
FM3	Sobre los cuerpos actúan fuerzas no visibles	Las fuerzas tienen que ser visibles. Si no, son simples resistencias	niños adolescentes adultos
FM4	En ausencia de fuerzas los cuerpos en movimiento siguen moviéndose	Todo movimiento implica una fuerza actuando en su misma dirección	niños adolescentes adultos
FM5	La detención de los móviles se debe a la acción de una fuerza contraria	La detención se debe al desgaste de la propia fuerza del móvil	niños adolescentes adultos
FM6	En ausencia de fuerzas los cuerpos se mueven en línea recta	En ausencia de fuerzas los cuerpos conservan su movimiento curvo	adolescentes adultos
FM7	Las fuerzas que actúan sobre un móvil se suman produciendo un único movimiento	Las fuerzas que actúan sobre un móvil producen movimientos sucesivos	niños adolescentes
FM8	En su caída un proyectil lleva dos movimientos que son independientes y cuyo producto es una trayectoria en forma de parábola	Los dos movimientos de un proyectil en caída no son independientes, ya que corresponden a la acción de dos fuerzas	adolescentes adultos
FM9	El movimiento y el reposo son estados relativos y por tanto se rigen por las mismas leyes	El movimiento y el reposo son estados absolutos, cualitativamente distintos	adultos

fuerza y movimiento, esta idea errónea se recoge como FM1). De cualquier forma, no es extraño que los sujetos respondan correctamente, si tenemos en cuenta que ya Aristóteles mantenía esta tesis (¡aunque a continuación negara la existencia del vacío!).

¿Pero cuáles pueden ser las fuerzas que actúen contra un objeto? Algunos sujetos, especialmente niños, creen que el motor ha de estar en contacto directo con el objeto (FM2), esto es, no comprenden la causalidad a distancia o transmisión mediada (Piaget, 1972), siguiendo una regla de contigüidad espacial en el pensamiento causal (Pozo, 1987a). Otra idea relativamente extendida, sobre todo entre los niños, es que las fuerzas tienen que ser visibles (FM3). En otras palabras, ignoran el efecto del rozamiento, o lo entienden de modo incorrecto (Piaget, 1972; Seré, 1982) —creyendo, al modo aristotélico, que esas fuerzas pueden actuar a favor del movimiento— o son incapaces de componer el efecto de dos fuerzas invisibles (Selman *et al.*, 1982). Incluso los adultos suelen creer equivocadamente que el rozamiento no constituye una fuerza sino una simple resistencia (Clement, 1979; 1983b). En una investigación realizada por nosotros (Pozo, 1985; 1987a) y a la que haremos alusión extensamente más adelante, pudimos comprobar que, tras realizar una amplia serie de problemas mecánicos, sólo un 30 por 100 de los sujetos adolescentes y adultos universitarios habían recurrido a la existencia de fuerzas no observables (rozamientos, etc.) para explicar los fenómenos que habían percibido. Se diría que los alumnos creen que sólo lo que actúa de modo perceptible y dinámico sobre un objeto hace fuerza sobre él. Hay razones más fundadas para pensar tal cosa.

Si los objetos en el mundo real no se mueven indefinidamente y, sin embargo, no se entiende bien la existencia de fuerzas no visibles, ¿a qué se atribuye su detención? Y en un sentido más amplio, ¿a qué se debe el movimiento indefinido en el vacío? ¿Y el movimiento de un objeto que ya no está en contacto con su motor inicial? La respuesta de Newton, anticipada ya por Galileo, es increíblemente simple: a la inercia. Sin embargo, la mayor parte de los sujetos, incluidos los adultos universitarios, se niegan a aceptar la existencia de movimiento en ausencia de fuerzas, por lo que atribuyen ese movimiento a una fuerza que el objeto ha recibido de su motor (FM4). Clement (1982, 1983a) pidió a alumnos de primero de universidad que acababan de completar un curso de mecánica que le dijeran qué fuerzas estaban actuando sobre una moneda lanzada al aire.

Sorprendentemente, dos de cada tres sujetos creían en la existencia de dos fuerzas opuestas: además de la gravedad, según ellos el objeto poseía otra fuerza contraria, hacia arriba. Clement encontró que los sujetos son incapaces de imaginar la existencia de un movimiento cuando existe una fuerza neta contraria. En palabras de Clement, existe una creencia generalizada de que «*un movimiento implica una fuerza*». La existencia de esta concepción errónea generalizada se ha visto confirmada por gran cantidad de trabajos que obtienen resultados semejantes con tareas y sujetos muy diversos (por ejemplo, Champagne, Klopfer y Anderson, 1980; Gilbert, Watts y Osborne, 1982; Gunstone y Watts, 1985; Lythcott, 1983; Osborne, 1985; Piaget, 1972; DiSessa, 1982; Viennot, 1979, 1983; Watts y Zylberstajn, 1981; White, 1983). En una investigación realizada en nuestro país, Sebastián (1984) pudo comprobar que, en su muestra, esta creencia la compartían ni más ni menos que en el 98,4 por 100 de estudiantes de B.U.P., el 93,7 por 100

en C.O.U., el 92,6 por 100 en primero de universidad y el ¡90,5 por 100 de licenciados en ciencias matriculados en el Curso de Aptitud Pedagógica, algunos ya profesores! Lo impresionante de esta concepción errónea no es sólo su gran generalidad sino sobre todo su persistencia a pesar de años y años de enseñanza formal de la física newtoniana, hecho que se repite en la mayor parte de los trabajos antes citados.

Una idea que suele acompañar a la anterior es la de que la fuerza de que ha sido dotado el objeto y que le hace moverse se va «gastando» progresivamente hasta consumirse por completo (FM5), momento en el que, en el ejemplo citado, la moneda en el aire iniciaría su caída (por ejemplo, Champagne, Klopfer y Anderson, 1980; Clement, 1983b; DiSessa, 1983).

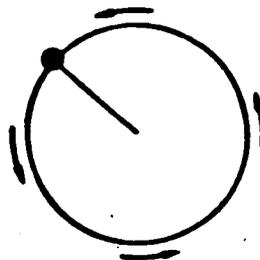
En torno a la idea de que «un movimiento implica una fuerza» se ha suscitado una interesante polémica sobre su paralelismo indudable con algunas teorías científicas previas al modelo newtoniano. Mientras algunos autores sostienen que es semejante a la concepción aristotélica, otros creen que está más cerca de la teoría medieval del «ímpetus», mientras otros no encuentran ninguna similitud. Más adelante, volveremos sobre este paralelismo histórico.

Otra de estas ideas, deudora en parte de la anterior, sostiene que siempre que ninguna otra fuerza actúe sobre ellos, los cuerpos siguen moviéndose en la dirección que llevaban cuando estaban en contacto con su motor inicial (FM6). Esta flagrante violación del movimiento rectilíneo postulado por el principio de la inercia está presente en sujetos de todas las edades y condiciones.

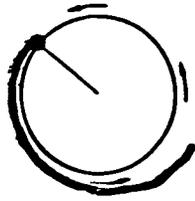
En una investigación realizada por nosotros (Pozo, 1985, 1987a) planteamos a tres grupos adolescentes (de 7.º de E.G.B., 1.º y 3.º de B.U.P., respectivamente) y a dos grupos de adultos universitarios (uno de ellos especializado en Física y el otro en Historia) el problema que recoge la Figura 1, tomado de McCloskey (1983a). Lo que los sujetos tenían que hacer era dibujar la trayectoria que seguiría la bola cuando se rompiera la cuerda. Los niveles de respuesta observados, en orden

FIGURA 1

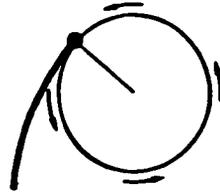
Imagina que alguien tiene una bola de metal sujeta al final de una cuerda y está haciéndola girar muy deprisa por encima de su cabeza. En el dibujo se ve la bola desde arriba. La circunferencia indica el camino seguido por la bola y las flechas la dirección en que se mueve. La línea del centro es la cuerda a la que está sujeta la bola. Supongamos que la cuerda se rompe cuando la bola está en el punto indicado en el dibujo. Dibuja el camino que seguirá la bola.



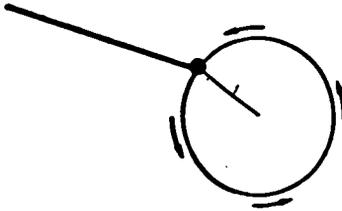
Respuestas típicas de cada nivel tomadas de Pozo (1987a).



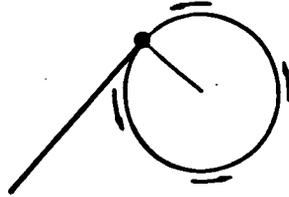
Nivel 1



Nivel 2



Nivel 3



Nivel 4

de complejidad creciente, se ejemplifican en la Figura 2, y eran los siguientes:

1. Trayectoria completamente circular (similar a la que llevaba el objeto inicialmente).
2. Trayectoria curvilínea (una suerte de compromiso entre la trayectoria curva inicial y la rectilínea correcta).
3. Trayectoria rectilínea no tangente a la trayectoria circular inicial.
4. Trayectoria rectilínea y tangente.

Los datos obtenidos por nosotros (Pozo, 1987a) mostraban que sólo un 27 por 100 de los sujetos alcanzaba el nivel 4, mostrando una concepción claramente newtoniana, mientras que el 60 por 100 de los sujetos no superaban los niveles 1 y 2, mostrando una comprensión de la inercia similar a la del período científico prenewtoniano. Pero estas concepciones erróneas no se distribuían al azar entre los distintos grupos de la muestra. Aunque en todos los grupos (incluidos los físicos) había sujetos que respondían en los niveles 1 y 2, la comprensión de la inercia era globalmente mejor en el grupo de 3.º de B.U.P. y en los expertos en Física. En cambio, los historiadores se comportaban en esta prueba igual que los adolescentes más pequeños y claramente peor que los de 3.º de B.U.P.

En otras palabras, la mayor parte de los alumnos adolescentes y de los adultos universitarios no especializados en ciencias creen que el objeto (en este caso una bola), una vez lanzado libremente, sigue manteniendo su trayectoria curva inicial. Resultados semejantes han sido obtenidos no sólo por McCloskey (1983a; McCloskey y Kohl, 1983) con esta misma tarea, sino también en otras tareas por Saltiel y Viennot,

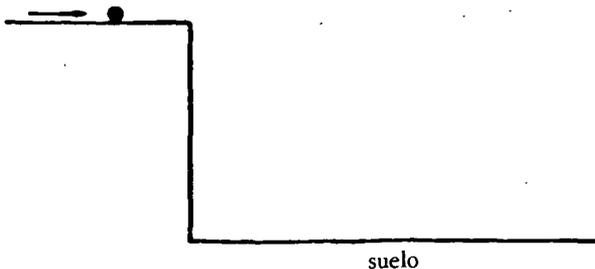
(1985); Viennot (1979) entre otros. No es de extrañar la persistencia de esta idea si tenemos en cuenta que el propio Galileo incurrió en ella, lo que le impidió establecer la ley de la gravitación universal. Hubo que esperar hasta Descartes y Newton para encontrar la formulación del movimiento rectilíneo y uniforme. En cierto modo, esta idea podría considerarse como un corolario necesario de la concepción según la cual «todo movimiento implica una fuerza» (FM4). En este caso, se diría, todo movimiento se asemeja, en su trayectoria, a la fuerza que lo ha originado.

Dados los problemas existentes en la comprensión de las relaciones entre fuerza y movimiento cuando el objeto posee un único movimiento, la presencia de dos movimientos, simultánea o sucesivamente iniciados, añade nuevas trabas. Por ejemplo, se han comprobado los problemas que plantea la suma de vectores (FM7), tanto en niños (Piaget, 1973b; DiSessa, 1982) como en sujetos de más edad (Aguirre y Erickson, 1984; White, 1983). Así, DiSessa (1982) encontró que los sujetos incurrían en lo que significativamente él llama «la estrategia de la esquina aristotélica», que consiste en considerar que dos fuerzas que actúan de modo perpendicular sobre un objeto, no se combinan sino que son sucesivas, de forma que la trayectoria del objeto dibuja un ángulo recto. White (1983) comprobó con sujetos mayores que si bien no tenían dificultades para determinar la dirección del movimiento en situaciones simples de adición de fuerzas, por el contrario se mostraban reacios a aplicar esa misma adición en el caso de la velocidad. Por su parte, Aguirre y Erickson (1984) han desarrollado, a partir de Siegler (1981), un sistema de «reglas inferidas» que constituye un buen ejemplo de cómo las concepciones que estamos comentando pueden desdoblarse aún en otras unidades conceptuales más simples, estableciendo redes conceptuales con indudables repercusiones educativas.

Un caso parecido al anterior lo constituyen los problemas de trayectorias de proyectiles, en los que hay que combinar el movimiento horizontal que lleva el objeto con el movimiento vertical debido a la gravedad, como el que recoge la Figura 3. En contra de la demostración del movimiento parabólico hecha por Galileo, los alumnos no creen que ambos movimientos sean de hecho independientes (FM8). Pero dentro de esta creencia errónea existen a su vez diversos niveles que se asemejan una vez más de modo sorprendente a las respuestas habidas en la historia ante este mismo problema. Según hemos podido

FIGURA 3

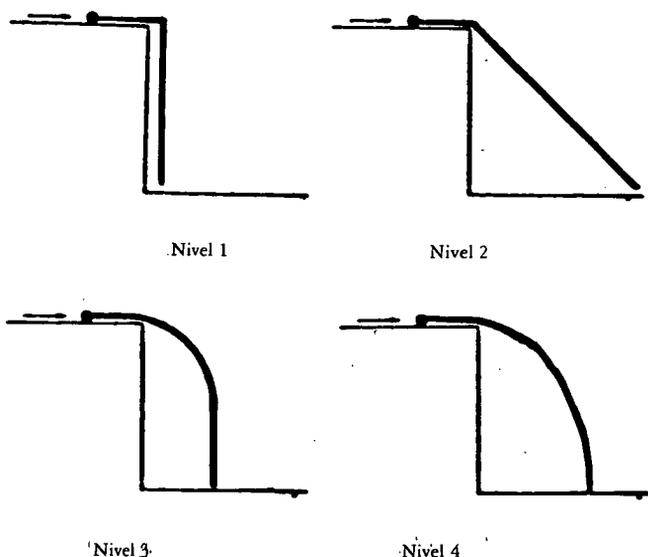
En el dibujo puede verse un escalón alto. Una bola se dirige a una alta velocidad en la dirección indicada por la flecha. Dibuja el camino que seguirá hasta llegar al suelo.



comprobar en nuestra investigación, anteriormente mencionada, existen cuatro niveles de respuesta en la solución al problema de la Figura 3, ejemplificados a su vez en la Figura 4:

FIGURA 4

Respuestas típicas de cada nivel tomadas de Pozo (1987a).



1. El objeto cae con un solo movimiento vertical o con dos movimientos sucesivos, el primero horizontal y el segundo vertical (concepción aristotélica).

2. El objeto en su caída tiene dos movimientos que se componen dando lugar a un solo movimiento rectilíneo diagonal, por así decirlo, a los dos movimientos simples (incomprensión de que la gravedad es una fuerza constante que, por tanto, produce una aceleración o aumento constante de la velocidad vertical).

3. El objeto en su caída tiene dos movimientos que se componen en forma de movimiento curvilíneo, pero no parabólico (los dos movimientos se conciben como dependientes o, en otras palabras, no se acepta que la velocidad horizontal sea constante).

4. El objeto que cae tiene dos velocidades independientes: una horizontal constante y otra vertical con aceleración uniforme, que dan lugar a un movimiento compuesto de forma parabólica.

Según los datos obtenidos por nosotros (Pozo, 1987a) la práctica totalidad (88 por 100) de alumnos adolescentes y adultos, con la excepción de los expertos en física, tienen ante este problema una concepción prenewtoniana, es decir, tal vez imbuidos de la creencia de que «todo movimiento implica una fuerza», piensan que ambos movimientos son sucesivos en vez de simultáneos. Dentro de estas creencias prenewtonianas se encuentra toda la gama de respuestas habidas en la historia, desde la «esquina aristotélica» (nivel 1), respuesta dada por el 27 por 100 de nuestra muestra, al «compromiso diagonal» (nivel 2, 23 por 100 de la muestra) o el «compromiso curvo» que, según Leonardo da Vinci y otros partidarios de la teoría medieval del «ímpetus», esta-

blece tres fases sucesivas en la caída de un proyectil (nivel 3, 38 por 100 de la muestra): movimiento horizontal inicial, movimiento curvo compuesto y movimiento vertical final. Pautas parecidas de resultados, generalmente acompañadas de creencias en el desgaste de la fuerza (FM5), han sido encontradas también por otros autores (Caramazza, McCloskey y Green, 1981; Green, McCloskey y Caramazza, 1985; McCloskey, 1983a, 1983b; Whitaker, 1983a, 1983b).

Una última creencia errónea con respecto a las relaciones entre fuerza y movimiento es aún más persistente, si cabe. Según esta idea (FM9), y en contra del relativismo newtoniano, el movimiento y el reposo son dos condiciones cualitativamente distintas que se rigen por diferentes leyes. Así, según esta concepción, la inercia sólo es aplicable a los objetos en movimiento, que están sometidos a fuerzas (FM4), mientras que los objetos en reposo no están sujetos a ninguna fuerza (Minstrell, 1982). En estas condiciones cuando se deja caer un objeto desde una plataforma móvil (por ejemplo, un avión), estos sujetos le atribuyen un solo movimiento, el debido a la gravedad (McCloskey, 1983b; Whitaker, 1983a, 1983b), sin comprender que los marcos de referencia son siempre relativos (de hecho, todos los objetos que están situados sobre la Tierra están *siempre* en movimiento, pero al tiempo pueden «estar» en reposo). En nuestra investigación todos los alumnos adolescentes y adultos no expertos en física incurrieron en este error conceptual, mientras que entre los físicos sólo la mitad eran capaces de superarlo (Pozo, 1987a).

Concepciones espontáneas sobre gravedad

Además de las relativas a las nociones de fuerza y movimiento, existen otras muchas concepciones mecánicas desviadas de la física newtoniana. Tal vez una de las más espectaculares sea la idea generalizada de que los cuerpos más pesados caen más deprisa que los más livianos (G1, en la Tabla 2). Esta idea la mantienen en porcentajes variables no sólo niños (Selman *et al.*, 1982) y adolescentes (Pozo, 1987a), sino también adultos universitarios (Champagne, Klopfer y Anderson, 1980; Gunstone y White, 1981; Pozo, 1987a; Whitaker, 1983a). No obstante, incluso entre los sujetos que responden correctamente son muy corrientes las explicaciones prenewtonianas. Por ejemplo, muchos afir-

núm.	Mecánica newtoniana	Concepción alternativa	sujetos
G1	Todos los cuerpos independientemente de su masa caen con la misma aceleración (g)	Los cuerpos más pesados caen más deprisa que los más ligeros	niños adolescentes adultos
G2	«La fuerza de la gravedad» (peso) es directamente proporcional a la masa de un cuerpo que cae	«La fuerza de la gravedad» es la misma para todos los cuerpos	adolescentes adultos
G3	La Tierra tiene forma ovalada y atrae a los cuerpos hacia su centro	La Tierra es redonda y la gente sólo habita en su parte superior	niños
G4	La Tierra tiene forma ovalada y atrae a los cuerpos hacia su centro	La Tierra es redonda y atrae a los cuerpos hacia su superficie	niños

man que «la fuerza de la gravedad» es constante (G2), mostrando una nueva indiferenciación conceptual, en este caso entre velocidad y aceleración por un lado y fuerza por otro (Whitaker, 1983b). Para concluir, dos curiosas ideas respecto a la gravedad en relación con la Tierra observadas en niños (Nussbaum, 1979, 1985). Algunos niños creen que la Tierra es redonda, pero la gente sólo habita en la parte superior, ya que si no se caería (G3). Otros, de más edad, opinan que la Tierra es redonda y puede habitarse en toda su superficie, pero las cosas son atraídas hacia el suelo, no hacia el centro de la Tierra, de forma que las cosas que se hallan bajo tierra tienden a salir a la superficie (G4). Estas dos ideas, de naturaleza muy distinta de las anteriores, se han encontrado también en niños de culturas no-occidentales (Mali y Howe, 1979).

ALGUNAS PREGUNTAS A MODO DE CONCLUSION

La mayor parte de los trabajos sobre concepciones erróneas tienen una orientación básicamente descriptiva. No obstante, parece conveniente detenerse un momento e intentar establecer algunas generalizaciones sobre la forma en que surgen y se organizan estas ideas. Varias son las preguntas.

¿Muchas ideas distintas o una sola teoría?

Un primer problema es determinar la consistencia y la cohesión del amplio catálogo de concepciones espontáneas desviadas de la mecánica newtoniana que hemos encontrado. La mayor parte de los autores están de acuerdo en considerar esas ideas no como un problema individual de una serie de sujetos sino como algo mucho más profundo, que requiere un análisis más riguroso, al tiempo que plantea fascinantes preguntas sobre su origen y naturaleza. ¿Nos enfrentamos a una muchedumbre de ideas dispersas o a un ejército perfectamente organizado y jerarquizado? Puesto en términos de desarrollo y enseñanza de la física ¿esas ideas se desarrollan de una en una o todas al unísono, al modo de una «revolución científica»?

Un primer intento de respuesta debe basarse en un análisis temático de las ideas contenidas en la Tabla 1. Necesariamente, en un campo como la mecánica esas ideas están conectadas estrechamente entre sí. Pero además de esa conexión necesaria existen fuertes vínculos entre diversas ideas. Hay algunas ideas (como, por ejemplo, F4: «un movimiento implica una fuerza») que subyacen a la aparición de otras, mostrando que no todas esas ideas tienen el mismo grado de generalidad y, lo que es aún más significativo, que existe algún tipo de organización jerárquica entre ellas, aún no determinada. No obstante, existen también otras ideas que no se derivan necesariamente de ninguna de las ideas presentes o que, en otras palabras, pueden estar ausentes sin que el resto del sistema se altere (por ejemplo, los alumnos pueden creer en FM4 y no en FM1). De hecho, además de la conexión lógica existen algunos datos significativos sobre la conexión psicológica entre esas ideas. No todas las ideas recogidas son igualmente difíciles de superar. Pozo (1987a) establece una clasificación de las ideas anteriores según la cual algunas serían fáciles de superar (por ejemplo, FM7) estando presentes sólo en unos pocos alumnos inexpertos; otras (por

ejemplo, FM3, FM8) tendrían una mayor persistencia y serían superadas por menos de la mitad de los sujetos no expertos; finalmente habría ideas (como FM4, FM9 y G1) que sólo serían abandonadas por personas con una amplia preparación en esta área y no en todos los casos. En general, puede observarse que las ideas prenewtonianas más difíciles de abandonar son aquellas que más claramente diferencian al sistema newtoniano de sus predecesores o, dicho en otras palabras, aquellas que son contrarias al núcleo central (Lakatos, 1978) del modelo newtoniano, representado por sus tres leyes básicas.

Pero las diferencias no sólo afectan a la comparación de distintas nociones, sino que una misma noción puede resultar más o menos difícil según el contexto (por ejemplo, FM9 en Whitaker, 1983a). Ello nos conduce a otro problema conexo: ¿aplica siempre cada sujeto la misma idea o bien mantiene ideas diferentes para contextos diferentes? Por desgracia, no hay datos correlacionales sobre esa consistencia intraindividual, por lo que hemos de recurrir a datos indirectos, que indican que los sujetos tienden a incurrir sistemáticamente en los mismos errores ante problemas análogos, si bien con algunas excepciones (Pozo, 1987a; Whitaker, 1983a; White, 1983). En cuanto a la consistencia interindividual, McCloskey (1983b) ha observado notables diferencias individuales en los marcos conceptuales, pero que resultan interpretables como diversas variantes de una misma teoría y no como teorías distintas. Igualmente se han observado diferencias conceptuales en el área de la mecánica entre sujetos dependientes e independientes de campo (Pozo, 1987a), pero sin que estas diferencias se traduzcan en la aparición de teorías alternativas diferentes sino únicamente en un mayor acercamiento a las concepciones newtonianas en el caso de los independientes de campo.

En definitiva, tanto los análisis teóricos como empíricos indican la existencia si no de una sola teoría, sí de varias teorías mecánicas conectadas, posiblemente de un modo jerárquico. La delimitación de esas teorías y su conexión puede resultar más fácil a partir de los datos históricos sobre el desarrollo de la mecánica.

¿Qué relación hay entre las teorías mecánicas espontáneas y la mecánica prenewtoniana?

Muchos autores afirman haber encontrado sorprendentes paralelismos, tanto conceptuales como terminológicos, entre las ideas de los alumnos actuales y las de los pensadores precientíficos. Pero mientras unos sostienen a la luz de sus resultados que «Aristóteles no ha muerto» (Whitaker, 1983a; y, también Champagne, Klopfer y Anderson, 1980; DiSessa, 1982, 1983); otros en cambio sostienen que esas teorías son semejantes a las teorías medievales del ímpetus (por ejemplo, Clement, 1983a; McCloskey, 1983a, 1983b; Viennot, 1979). Tal desacuerdo no resulta sorprendente si tenemos en cuenta que la doctrina aristotélica del movimiento y la teoría medieval del ímpetus tienen muchos aspectos comunes. Los datos disponibles parecen, no obstante, más coherentes con la teoría del ímpetus, entre otras cosas porque quienes defienden el paralelismo aristotélico suelen apoyarse en ideas que también comparten los filósofos medievales.

Sin duda, la mejor aportación a este tema, al tiempo que la más trascendente ya que supera los estrechos límites en los que suele definirse, procede de Piaget. En *Psychogenèse et histoire des sciences*, un

libro fundamental, en el que ya al final de su vida culmina definitivamente su enorme proyecto epistemológico, Piaget y García (1981) establecen cuatro niveles evolutivos en el desarrollo de las ideas mecánicas, el primero y el tercero de los cuales se corresponden al detalle con la teoría aristotélica y del ímpetus, mientras que los otros dos establecen la transición respectivamente desde Aristóteles al ímpetus y desde éste a la física newtoniana. Este extraordinario parecido puntual no debe interpretarse como una repetición exacta de la Historia en la psicogénesis sino como una mera analogía (Gould, 1984), ya que las circunstancias en que aparecen los dos términos comparados son diferentes. Además, las semejanzas entre ambos no deben ocultarnos las diferencias, la más importante de las cuales es sin duda el grado de formalización —o tematización (Piaget y García, 1981)— alcanzado en la historia y que sin embargo está ausente en las versiones actuales de esa misma teoría.

Pero para Piaget y García (1981) la trascendencia de esta relación no está en la semejanza de contenido, sino en la transición de una teoría a otra, en el proceso de cambio que posibilita la aparición de las propias teorías causales. Piaget y García (1981) identifican unos mecanismos comunes en el progreso de las teorías causales tanto en la psicogénesis como en la historia de la ciencia, en los que no podemos detenernos aquí (véase Pozo, 1987a). No obstante, para concluir debemos plantearnos brevemente el cambio de las concepciones espontáneas.

¿Cómo pueden modificarse las teorías espontáneas?

Tras leer las páginas anteriores, en las que se narran con un detenimiento casi morboso las múltiples trampas que la naturaleza humana impone a nuestra comprensión del movimiento de los objetos, se hace necesario preguntarse cómo pueden cambiarse esas ideas. A estas alturas de la exposición es razonable que todo profesor de ciencias, con la paciencia y el interés suficiente para llegar hasta aquí, se plantee que existe, en la mente del alumno, una especie de conspiración cognitiva contra su trabajo. Tristemente no puede darse una respuesta simple, unívoca, a la pregunta formulada, pero sí pueden eliminarse algunas tentaciones fáciles.

En primer lugar, dada la persistencia de las concepciones prenewtonianas incluso en sujetos bastante instruidos en estos temas, hay que convenir que no basta con la simple exposición al modelo newtoniano para que sea asimilado por el alumno. En otras palabras, la enseñanza tradicional, que se limitaba a presentar al alumno la «verdad» científica, esperando que éste fuera capaz de reproducirla, se muestra insuficiente. Pero tampoco parece más eficaz la «enseñanza por descubrimiento» basada en el ejercicio del pensamiento formal (véase Pozo y Carretero, en este mismo número). Según hemos podido comprobar (Pozo, 1987a) la práctica totalidad de los alumnos adolescentes logran razonar formalmente ante un problema bien definido; sin embargo, ese razonamiento formal apenas produce ningún avance en sus concepciones. De hecho, incluso adultos universitarios especializados en Historia, que razonan de un modo claramente formal no sólo en su área de especialidad (Pozo, 1985, 1987b) sino también ante problemas físicos, mantienen concepciones mecánicas muy similares a las de los alumnos de 7.º de E.G.B. Como señalábamos anteriormente (Pozo y Ca-

rretero, en este mismo número) el pensamiento formal es una condición necesaria, pero no suficiente para la superación de las concepciones espontáneas.

¿Qué otras condiciones se requieren además del pensamiento formal? En nuestra opinión, para que un alumno abandone sus concepciones espontáneas erróneas es necesario que disponga de una explicación mejor. Dado que él no será capaz generalmente de descubrirla por sí mismo, es necesario que le sea proporcionada de un modo expositivo, lo cual no tiene que implicar necesariamente una actividad mental pasiva por parte del alumno. Otero y Brincones (en este mismo número) ilustran claramente las dificultades que se plantean en el diseño de unidades didácticas expositivas alejadas de los presupuestos repetitivos de la enseñanza tradicional.

Notas

¹ Análisis parciales o globales de la evolución que aquí vamos a esbozar pueden encontrarse, en diferentes contextos, por ejemplo, en Geymonat (1957), Holton y Brush (1972), Koyré (1965, 1966), Mason (1962), Piaget y García (1981) y Wartofsky (1968).

Resumen

Una de las áreas en las que se han estudiado más abundantemente las concepciones científicas espontáneas de los alumnos es la mecánica newtoniana. El presente artículo revisa detenidamente las concepciones espontáneas de adolescentes y adultos universitarios con respecto a algunas de las nociones más relevantes en ese dominio: fuerza y movimiento, y gravedad. Se analiza especialmente el paralelismo sorprendente existente entre dichas concepciones espontáneas y la propia evolución histórica de las ideas científicas prenewtonianas. Por último, se estudia brevemente la consistencia interna de las concepciones espontáneas identificadas y la forma en que pueden ser modificadas.

Summary

The newtonian mechanics is one of the most studied areas in the misconception tradition for the science teaching. This paper reviews the spontaneous conceptions of adolescents and university students in relation to some central ideas about force and motion, and gravity. The similarity of students' misconceptions to the prenewtonian ideas during the History of the Mechanics is amazing. The internal consistency of the students' conceptions is briefly analysed. Finally, a discussion is presented in relation to the psychological mechanisms for the conceptual change.

Résumé

Dans la recherche des conceptions spontanées des élèves un des domaines plus étudiés est la Mécanique Newtonienne. Le présent article analyse avec détail les idées spontanées chez l'adolescent et l'adult universitaire à l'égard de quelques concepts très importants dans ce domaine: la force et le mouvement et la gravité. On étudie l'étonnante ressemblance des ces idées avec la propre évolution historique de la mécanique. On étudie aussi la consistance intérieure des conceptions décrites et comment elles peuvent être modifiées.

Referencias

- AGUIRRE, J., y ERICKSON, G.: «Students' conceptions about the vector characteristics of three physics concepts». *Journal of Research in Science Teaching*, 1984, 21 (5), 439-457.
- ANDERSSON, B., y KARRQUIST, C.: «How Swedish pupils, aged 12-15 years understand light and its properties». *European Journal of Science Education*, 1983, 5 (4), 187-402.
- BRUMBY, M.: «Problems in learning the concept of the natural selection». *Journal of Biological Education*, 1979, 13, 119-122.
- BULLOCK, M.: «Animism in childhood thinking: a new look at and old question». *Developmental Psychology*, 1985, 21 (2), 217-225.
- CARAMAZZA, A.; MCCLOSKEY, M., y GREEN, B.: «Naive beliefs in 'sophisticated' subjects: misconceptions about trajectories of objects». *Cognition*, 1981, 9, 117-123.
- CAREY, S.: *Conceptual change in childhood*. Cambridge, Mass.: The MIT Press, 1985.
- CARRETERO, M.: «¿Por qué flotan las cosas? El desarrollo del pensamiento hipotético-deductivo y la enseñanza de las ciencias». *Infancia y Aprendizaje*, 1979, 8, 7-22.
- «De la larga distancia que separa la suposición de la certeza», en M. Carretero y J. A. García Madruga (Eds.). *Lecturas de psicología del pensamiento*. Madrid: Alianza, 1984.
- CHAMPAGNE, A. B.; KLOPFER, L. E., y ANDERSON, J. H.: «Factors influencing the learning of classical mechanics». *American Journal of Physics*, 1980, 48, 1074-1079.
- CLEMENT, J.: «Mapping a student's causal conceptions from a problem solving protocol», en J. Lochhead y J. Clement (Eds.): *Cognitive process instruction*. Filadelfia: Franklin Institute Press, 1979.
- «Students' preconceptions in introductory mechanics». *American Journal of Physics*, 1982, 50, 66-71.
- «A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students», en D. Gentner y A. L. Stevens (Eds.): *Mental models*. Hillsdale, N. J.: Erlbaum, 1983 (a).
- «Students' alternative conceptions in mechanics: a coherent system of preconceptions?», en H. Helm y J. S. Novak (Eds.): *Proceedings of the International Seminar Misconceptions in Science and Mathematics*. N. York: Cornell University, 1983 (b).
- CONTENTO, I.: «Children's thinking about food and eating. A piagetian-based study». *Journal of Nutrition Education*, 1981, 13, 86-90.
- COSGROVE, M., y OSBORNE, R.: «Lesson frameworks for changing children's ideas», en R. Osborne y P. Freyberg (Eds.): *Learning in science*. Hong-Kong: Heinemann, 1985.
- DEADMAN, J. A., y KELLY, P. J.: «What do secondary school boys understand about evolution and heredity before they are taught the topics». *Journal of Biological Education*, 1978, 12 (1), 7-15.
- DELVAL, J. A.: *El animismo y el pensamiento infantil*. Madrid: Siglo XXI, 1975.
- DRIVER, R.: «Pupils' alternative frameworks in science». *European Journal of Science Education*, 1981, 3 (1), 93-101.
- «Beyond appearances: the conservation of matter under physical and chemical transformations», en R. Driver, E. Guesne y A. Tiberghien (Eds.): *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press, 1985.
- «Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos». *Enseñanza de las ciencias*, 1986, 4 (1), 3-15.
- DRIVER, R., y EASLEY, J.: «Pupils and paradigms: a review of related to concept development in adolescent science students». *Studies in Science Education*, 1978, 5, 61-84.
- DRIVER, R., y ERICKSON, G.: «Theories-in-action: some issues in the study of students' conceptual frameworks in science». *Studies in Science Education*, 1983, 10, 37-60.
- ERICKSON, G., y TIBERGHEN, A.: «Heat and temperature», en R. Driver, E. Guesne y A. Tiberghien (Eds.): *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press, 1985.
- FREDETTE, N. H., y LOCHHEAD, J.: «Students conceptions of simple circuits». *The Physics Teacher*, 1980, 18, 194-198.
- GENTNER, D., y GENTNER, D. R.: «Flowing waters of teeming crowds: mental models of electricity», en D. Gentner y A. L. Stevens (Eds.): *Mental models*. Hillsdale: Erlbaum, 1983.
- GEYMONAT, L.: *Galileo Galilei*. Turín: Einaudi, 1957. Trad. cast. de J. R. Capella: *Galileo Galilei*. Barcelona: Península/Nexos, 1986.
- GILBERT, J. K.; WATTS, D. M., y OSBORNE, R. J.: «Students conceptions of ideas in mechanics». *Physics Education*, 1982, 17, 62-66.
- GOLDBERG, F. M., y McDERMOTT, L. C.: «Not all many answers students give represent misconceptions: examples from interviews on geometrical optics», en H. Helm y J. S. Novak (Eds.): *Proceedings of the International Seminar Misconceptions in Science and Mathematics*. N. York: Cornell Univ, 1983.
- GOULD, S. J.: «Relationships of individual and group change: ontogeny and phylogeny in biology». *Human Development*, 1984, 27, 233-239.
- GREEN, B. F.; MCCLOSKEY, M., y CARAMAZZA, A.: «The relation of knowledge to problem solving with examples of kinematics», en S. F. Chipman; J. W. Segal y R. Glaser (Eds.): *Thinking and learning skills*. Vol. 2. Hillsdale, N. J.: Erlbaum, 1985.
- GUESNE, A.: «Light», en R. Driver, E. Guesne y A. Tiberghien (Eds.): *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press, 1985.

- GUNSTONE, R. F., y WATTS, M.: «Force and motion», en R. Driver; E. Guesne y A. Tiberghien (Eds.): *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press, 1985.
- HOLTON, G., y BRUSH, S. G.: *Introduction to concepts and theories in physical science*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1972. Trad. cast. de J. Aguilar: *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Reverté, 1984.
- JOHNSON, C. N., y WELLMAN, H. M.: «Children's developing conceptions of the mind and the brain». *Child Development*, 1982, 53, 222-234.
- KOYRE, A.: *Newtonian studies*. Londres: Chapman & Hall, 1965.
— *Etudes galiléennes*. París: Hermann, 1966.
- LAKATOS, I.: *The methodology of scientific research programmes-philosophical papers. Volumen I* (Ed. de J. Worall y G. Currie). Cambridge: Cambridge University Press, 1978. Trad. cast. de J. C. Zapatero: *La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid: Alianza, 1983.
- LYTHCOTT, J.: «'Aristotelian' was the answer, but what was the question?», en H. Helm y J. D. Novak (Eds.): *Proceedings of the International Seminar Misconceptions in Science and Mathematics*. N. York: Cornell University, 1983.
- MALI, G. B., y HOWE, A.: «The development of the earth and gravity concepts among Nepali children». *Science Education*, 1979, 63 (5), 658-691.
- MASON, S. F.: *A history of the sciences*. N. York: McMillan, 1962. Trad. cast. de C. Solís: *Historia de las ciencias* (varios vols.). Madrid: Alianza, 1985.
- MCCLOSKEY, M.: «Intuitive physics». *Scientific American*, 1983 (a), 248, 122-130.
— «Naive theories of motion», en D. Gentner y L. A. Stevens (Eds.): *Mental models*. Hillsdale, N. J.: Erlbaum, 1983 (b).
- MCCLOSKEY, M.; CARAMAZZA, A., y GREEN, B.: «Curvilinear motion in the absence of external forces: naive beliefs about the motion of objects». *Science*, 1980, 210, 1139-1141.
- MCCLOSKEY, M., y KOHL, D.: «Naive physics: the curvilinear impetus principle and its role in interactions with moving objects». *Journal of Experimental psychology: Learning, memory and Cognition*, 1983, 9 (1), 146-156.
- MCDERMOTT, L. C.: «An overview of research on conceptual understanding in mechanics». *Physics Today*, 1984, 37, 7-24.
- MINSTRELL, J.: «Explaining the 'at rest' condition of an object». *The Physics Teacher*, 1982, enero, 10-14.
- NUSSBAUM, J.: «Children's conceptions of the earth as a cosmic body». *Science Education*, 1979, 61 (1), 83-93.
— «The earth as a cosmic body», en R. Driver; E. Guesne y A. Tiberghien (Eds.): *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press, 1985.
- OSBORNE, R.: «Building on children's intuitive ideas», en R. Osborne y P. Freyberg (Eds.): *Learning in science*. Hong-Kong: Heinemann, 1985.
- PIAGET, J.: *La représentation du monde chez l'enfant*. Neuchâtel: Delachaux et Niestlé, 1926. Trad. cast. de V. Valls y Anglés: *La representación del mundo en el niño*. Madrid: Morata, 1973.
— *La causalité physique chez l'enfant*. París: Alcan, 1927. Trad. cast. de J. Comás: *La causalidad física en el niño*. Madrid: Espasa Calpe, 1934.
— *La transmission des mouvements*. París: P.U.F., 1972.
— *La formation de la notion de force*. París: P.U.F., 1973 (a).
— *La composition des forces et le problème des vecteurs*. París: P.U.F., 1973 (b). Trad. cast. de D. Blasco: *La composición de las fuerzas y el problema de los vectores*. Madrid: Morata, 1975.
- PIAGET, J., y GARCÍA, R.: *Psychogenese et histoire des sciences*. París: P.U.F., 1981. Trad. cast. de P. Pínero: *Psicogénesis e historia de la ciencia*. México: Siglo XXI, 1982.
- POZO, J. I.: *Teorías y reglas de inferencia en la solución de problemas causales*. Tesis Doctoral inédita. Universidad Autónoma de Madrid, 1985.
— *Aprendizaje de la ciencia y pensamiento causal*. Madrid: Visor/Aprendizaje, 1987a.
— «Las explicaciones causales en Historia: una comparación entre expertos y novatos», en M. Carretero, J. I. Pozo y M. Asensio (Eds.): *La enseñanza de las ciencias sociales*. Madrid: Visor/Aprendizaje, 1987b.
- POZO, J. I., y CARRETERO, M.: «Del pensamiento formal a las concepciones espontáneas: ¿qué cambia en la enseñanza de la ciencia?». *Infancia y Aprendizaje*, 1987, en este mismo número.
- ROWELL, J. A., DAWSON, C. J.: «Laboratory counter examples and the growth of the understanding in science». *European Journal of Science Education*, 1983, 5 (2), 203-215.
- SALTIEL, E., y VIENNOT, L.: «¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes?». *Enseñanza de las ciencias*, 1985, 3 (2), 137-144.
- SCHOLLUM, B. W.: «Chemical change». *New Zealand Science teacher*, 1982, 33, 5-9.
- SEBASTIÁ, J. M.: «Fuerza y movimiento: la interpretación de los estudiantes». *Enseñanza de las ciencias*, 1984, 2 (3), 161-169.
- SELMAN, R. L.; KRUPA, M. P.; STONE, C. R., y JAQUETTE, D. S.: «Concrete operational thought and the emergence of the concept of unseen force in children's theories of electromagnetism and gravity». *Science Education*, 1982, 66 (2), 181-194.
- SERE, M. G.: «A study of some frameworks for the field of mechanics used by childrens when they interpret experiments about air pressure». *European Journal of Science Education*, 1982, 4 (3), 299-309.

- DISSA, A.: «Unlearning aristotelian physics: a study of knowledge-based learning». *Cognitive Science*, 1982, 6, 37-75.
- DISSA, A.: «Phenomenology and the evolution of intuition», en D. Gentner y A. L. Stevens (Eds.): *Mental models*. Hillsdale, N. J.: Erlbaum, 1983.
- SHIPSTONE, D.: «Electricity in simple circuits», en R. Driver, E. Guesne y A. Tiberghien (Eds.): *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press, 1985.
- SIEGLER, R. S.: «Developmental sequences within and between concepts». *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 1981, 46, completo.
- SMITH, C.; CAREY, S., y WISER, M.: «On differentiation: a case study of the development of the concepts of size, weight and density». *Cognition*, 1984.
- STRAUSS, S.: «Cognitive development in school and out». *Cognition*, 1981, 295-300.
- VIENNOT, L.: «Spontaneous reasoning in elementary dynamics». *European Journal of Science Education*, 1979, 1, 205-221.
- WARTOFSKY, M. W.: *Conceptual foundations of scientific thought: an introduction to the philosophy of science*, 1968. Trad. cast. de M. Andreu y otros: *Introducción a la filosofía de la ciencia*. Madrid: Alianza, 1983 (nueva edición).
- WATTS, D., y ZYLBERSTAJN, A.: «A survey of some children's ideas about force». *Physics Education*, 1981, 16, 360-365.
- WEST, L. H. T., y PINES, A. L.: *Cognitive structure and conceptual change*. Orlando: Academic Press, 1985.
- WHITAKER, R. J.: «Aristotle is not dead: student understanding of trajectory motion». *American Journal of Physics*, 1983 (a), 51, 352-357.
- «An examination of student inconsistencies in their understanding of trajectory motion», en H. Helm y J. S. Novak (Eds.): *Proceedings of the International Seminar misconceptions in Science and Mathematics*. N. York: Cornell University, 1963 (b).
- WITHE, B. Y.: «Sources of difficulty in understanding newtonian dynamics». *Cognitive Science*, 1983, 7, 41-65.
- WISER, M., y CAREY, S.: «When heat and temperature were one», en D. Gentner y A. Stevens (Eds.): *mental models*. Hillsdale, N. J.: Erlbaum, 1983.