

Didáctica experimental: Un modelo de enseñanza para el concepto de campo electromagnético



Rafael Andrés Alemañ Berenguer^{1,2}, Estrella Jornet Gil³, Pedro David Crespo Miralles⁴

¹Instituto Universitario de Física Aplicada a la Ciencia y a la Tecnología, Universidad de Alicante (España).

²Agrupación Astronómica de Alicante (División de Cosmomicrofísica), c/Arzobispo Loaces, 12-4ª, esc. dcha. Alicante-03003 (España).

³Departamento de Matemáticas, I.E.S. La Nia C/Lope de Vega, 2-03680-Aspe (Alicante, España).

⁴Departamento de Física y Química, I.E.S José Cavanilles, Avenida del Alcalde Lorenzo Carbonell, 32-03007, Alicante (España).

E-mail: agrupacion.astroalicante@gmail.com

(Recibido el 3 de Mayo de 2012; aceptado el 27 de Junio de 2012)

Resumen

La noción de campo es uno de los principales conceptos en la moderna ciencia física, lo que justifica la importancia de su correcta enseñanza a los estudiantes de ciencias en cualquier nivel educativo. En este artículo se propone un modelo didáctico que trata de inculcar el concepto de campo físico, con su alcance y limitaciones, partiendo de la mecánica clásica del punto material a través de una analogía con el sólido elástico y las ondas mecánicas para llegar al ejemplo típico del campo electromagnético.

Palabras clave: Mecánica, partícula puntual, campo, ondas, electromagnetismo, didáctica, cambio conceptual.

Abstract

The notion of field is one of the main concepts in modern physical science, justifying the importance of proper teaching science students at any educational level. This article proposes a teaching model that tries to instill the concept of physical field, with its scope and limitations, based on the classic mechanics of the particle through an analogy with the elastic solid and mechanical waves to reach to typical instance of the electromagnetic field.

Keywords: Mechanics, pointlike particles, field, waves, electromagnetism, didactics, conceptual change.

PACS: 01.40.-d, 01.50.-i, 01.40.gb

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La práctica totalidad de los modelos didácticos renovadores utilizados hoy día en la enseñanza de las ciencias poseen una característica en común, y es partir de las ideas y creencias previas de los alumnos sobre la materia que se va a tratar. Son ya bien conocidas las conclusiones de estudios y trabajos en los que se constata las concepciones resistentes al cambio poseídas por los alumnos [1, 2, 3, 4]. Esto es, que las ideas asimiladas por los alumnos en el proceso de aprendizaje se ven a menudo forzadas a adaptarse al marco conceptual previo, el cual resulta generalmente erróneo en ciertos aspectos específicos. De este modo, las enseñanzas adquiridas por los estudiantes quedan desvirtuadas, devaluadas y en no pocas ocasiones pierden buena parte de su valor.

De ahí la importancia del aprendizaje significativo por cambio conceptual, en la que el alumno es enfrentado a las inconsistencias de su conocimiento previo, y a las contradicciones con la experiencia que éste ocasiona. Así se llega a un punto en que para formar una nueva imagen coherente de la realidad es imprescindible abandonar las concepciones previas y sustituirlas por otras –o al menos modificarlas sensiblemente– para dar paso al marco de ideas que configura la ciencia como tal. Con este propósito proliferan los estudios sobre los prejuicios intelectuales de los alumnos en diferentes niveles educativos, aunque menos numerosos son los trabajos concernientes a las opciones y estrategias didácticas concretas [5, 6, 7, 8, 9, 10]. En esta línea es en la que presentaremos a lo largo de este artículo nuestra propia propuesta didáctica para la enseñanza de las ideas fundamentales de la teoría de campos en la física preuniversitaria o de primera etapa universitaria. En ambos

casos se partirá de los conocimientos anteriores del estudiante sobre la mecánica del punto y las ondas.

II. MODELO DIDÁCTICO E INVESTIGACIÓN DE IDEAS PREVIAS

Con objeto de planificar la estrategia de enseñanza-aprendizaje recurrimos a una propuesta esquemática de recorrido didáctico que explicita nuestros objetivos así como la secuencia conceptual adoptada para alcanzarlos. Al igual que los planos de carretera pueden ayudarnos a escoger el camino más cómodo entre dos lugares –que no siempre es el más corto– asimismo deben ayudarnos estos esquemas como guía para elegir el recorrido didáctico que más eficazmente permite lograr un aprendizaje significativo dependiendo de las circunstancias en que haya de aplicarse. Nuestra opción de recorrido pedagógico, como secuencia de contenidos que después permitirá explicitar la secuencia de actividades, es la siguiente:

Mecánica del punto material → *Ondas elásticas* → *Ondas electromagnéticas* → *Teoría de campos (Campo E.M.)*

III. ELUCIDACIÓN DE IDEAS PREVIAS

Para averiguar las preconcepciones de los alumnos sobre la materia a tratar, se les invita a responder a una consulta abierta cuya cuestión única es: “Expón cuál es tu idea de campo electromagnético, explicando si hay otros tipos de campos y qué características comunes comparten todos ellos”. Así se concreta una opción pedagógica en la que los alumnos comienzan definiendo lo que para ellos significa un cierto concepto y acaban reelaborando dicho significado a la luz de los nuevos contenidos asimilados. El ensayo destina a un grupo de cincuenta estudiantes que en el año lectivo 2010-2011 cursaban la asignatura de física de 2º curso de Bachillerato LOGSE en tres centros educativos de la Comunidad Valenciana (España). Todos ellos presentaban las características típicas de los alumnos de su nivel de desarrollo intelectual y emocional, sin que ninguno precisase de refuerzos docentes ni ayudas especiales de tipo alguno.

A continuación se analiza en las respuestas de los alumnos la presencia o ausencia de los descriptores escogidos, o de términos equiparables (obviamente “zona espacial”, por ejemplo, debe considerarse equivalente a “región del espacio”), en el marco semántico de los significados que los alumnos atribuyen a tales expresiones, para lo cual, llegado el caso, se solicitan aclaraciones posteriores a las respuestas.

Los resultados obtenidos con este método fueron los siguientes:

1º) El 95% mencionaba de algún modo la extensión del campo sobre una zona del espacio, pero sólo un 37% consideraba que el campo electromagnético posee un alcance infinito. Singularmente, el 75% de quienes mencionaron el campo de gravedad como otro ejemplo de campo físico pertenecían al grupo caracterizado por este último porcentaje.

2º) El 70% citaba el carácter vectorial del campo electromagnético, pero sólo un 56% dentro de este grupo aclaraba expresamente que se refería a las “fuerzas electromagnéticas”. Un 23% sobre el 70% mencionado incluía una referencia al potencial sin relacionarlo con la posibilidad de que él mismo constituya un tipo de campo (escalar) asociado de algún modo al familiar campo de fuerzas electromagnéticas. Nadie se refería únicamente al potencial –sin citar el concepto físico de fuerza– como característica básica del campo electromagnético.

3º) Un 42% hacían mención del comportamiento de una carga eléctrica de prueba como medio de determinar la existencia de un campo electromagnético, y sobre este porcentaje sólo el 50% aclara que ha de ser una carga positiva.

4º) Un 80% habla de las ondas electromagnéticas como una consecuencia del campo electromagnético (sin explicitar en esta etapa cómo y por qué), mientras que un 20% menciona un imán como ejemplo de un sistema envuelto por un campo electromagnético.

A pesar de la gran diversidad de respuestas, quedan de relieve una serie de características comunes a tener en cuenta en la acción didáctica ulterior:

- Existe un apreciable desconcierto sobre la naturaleza física del campo en general y del electromagnético en particular. Para algunos sujetos del estudio el campo es algo semejante a un fluido invisible que ejerce sus influencias por el hecho de ocupar todo el espacio. Para otros (25%) se trata de un “mar de flechitas” (literal) que también ocupa todo el espacio y afecta a los cuerpos situados en él. Nótese que con este modelo mental –muy semejante al de los primeros pioneros en la investigación de esta rama de la física– es posible abordar la explicación semi-intuitiva de numerosos fenómenos electromagnéticos. Sólo una minoría (10%) hace referencia en sus explicaciones a términos como “pantallas o escudos de fuerza”, obviamente extraídas del ámbito de la ciencia-ficción de menor calidad.

- La totalidad de los alumnos citan el campo de gravedad, como otro ejemplo de este concepto físico, junto al electromagnético. Pero son muy pocos (apenas cinco) los que citan campos de fuerzas nucleares o de otro tipo.

- El único rasgo común que los alumnos encuentran entre las distintas clases de campo es el hecho de hallarse extendidos por el espacio. Llama la atención la peculiaridad de que para los encuestados el término “campo” es sinónimo de “campo de fuerzas”. En ningún caso se menciona la posibilidad de otro tipo de campos vectoriales (como el del gradiente –o variación direccional– de presiones atmosféricas sobre un área geográfica) o escalares (como los de potenciales o temperaturas).

IV. SECUENCIACIÓN DE ACTIVIDADES

Partiendo de la situación revelada por la encuesta previa nos disponemos a realizar nuestra secuencia de actividades prevista de acuerdo con la opción recorrido conceptual consignado anteriormente, flexible, provisional y siempre susceptible de las oportunas modificaciones que el desarrollo de la investigación aconseje. Como es lógico, este desarrollo ha de llevarse a cabo en el marco de una programación docente que permita haber abordado con anterioridad aquellos conceptos y temas a los que ahora se va a hacer referencia como punto de apoyo en los aprendizajes subsiguientes.

A. Mecánica de partículas

Comenzamos recordando las características fundamentales de la mecánica clásica de partículas (Fig. 1). En ella se considera que los cuerpos materiales son masas puntuales – y por eso sin extensión– caracterizadas por un conjunto de tres coordenadas de posición, las cuales pueden variar en función del tiempo [11, 12, 13, 14, 15]. A partir de estas coordenadas pueden calcularse tanto la velocidad como la aceleración de la partícula, y añadiendo la masa a este cuadro conceptual podemos construir la idea de fuerza y algunos tipos de energía. En esta teoría las fuerzas entre partículas se ejercen a distancia, es decir, un cuerpo se influyen mutuamente sin afectar para nada en el espacio que media entre ellos.

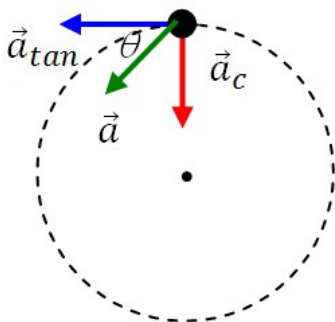


FIGURA 1. Componentes de la aceleración en un movimiento circular en torno a un centro de fuerzas, según la mecánica clásica de partículas.

Los alumnos se ven conducidos a manifestar a una patente insatisfacción en cuanto se les pregunta por el mecanismo de acción de tales fuerzas, en apariencia transmitidas instantáneamente a través del vacío [16]. Los estudiantes considerados pasaron por tres fases claramente determinadas:

- Perplejidad ante el hecho de que, en efecto, la acción de las fuerzas a distancia parece revestir características “mágicas”, o al menos “no físicas”.

- Afianzamiento transitorio de su confianza en tal descripción de los hechos sobre la base de que la Luna gira alrededor de la Tierra y la Tierra alrededor del Sol sin que haya una conexión material evidente que explique la fuerza de interacción. Aquí se explicita de nuevo la analogía entre los campos electrostático y gravitatorio fundada en un razonamiento que –más elaborado, claro está– podría ser así: *El modelo newtoniano de acción a distancia funciona excelentemente en astronomía, lo que refuerza la confianza de que un modelo físico semejante triunfe en su aplicación a los fenómenos eléctricos, regidos por una ley (de Coulomb) formalmente análoga.* Se abre paso, pues, en los alumnos, al igual que en los primeros investigadores de la historia (Newton, Euler, Laplace), una actitud pragmática que prima los éxitos predictivos y experimentales sobre la explicación del proceso subyacente.
- Una tercera y última etapa de inevitable insatisfacción surge cuando se les hace ver que para una misma secuencia de hechos pueden conjeturarse infinitos de mecanismos explicativos distintos. La acción a distancia, eléctrica o gravitatoria, con todo su poder empírico, no suministra una explicación más profunda de los fenómenos.

B. Ondas elásticas

A continuación proponemos a los alumnos que imaginen una fila de corchos flotantes sobre un estanque, alineados desde uno de sus bordes hasta el centro. Dejando caer una piedra en el centro del estanque se formará una serie de olas que sacudirán esta fila de corchos. Si se encuentran enlazados entre sí por un hilo, y si se ha dejado caer la piedra con cierta habilidad, es posible conseguir que los corchos apenas se muevan de su posición inicial, sino que simplemente oscilen arriba y abajo con la ola que pasa. Es evidente que no son los corchos los que se desplazan sobre el agua; más bien es que una perturbación del medio en el que se encuentran es la que se propaga a través de sus posiciones obligándolos a oscilar [17, 18].

Ningún esfuerzo cuesta ahora eliminar mentalmente los corchos y quedarnos sólo con la propagación de las olas. Los mismos razonamientos podemos hacer sobre las moléculas que forman el agua, con lo que los alumnos retienen la idea de una onda como propagación de una perturbación en un medio, la cual porta cantidad de movimiento y energía [19], como se ha manifestado en el movimiento de los corchos.

C. Ondas electromagnéticas

El paso siguiente consiste en introducir la posibilidad de ondas que se propague en ausencia de medio transmisor, cual es el caso de las ondas electromagnéticas. Se explica a los alumnos que los fenómenos de polarización (ciertas

gafas de sol –aunque no todas– pueden ser buen ejemplo de ello) inclinan a pensar en las ondas electromagnéticas como oscilaciones transversales, mientras que la transmisión de luz a través de espacio vacío entre el Sol y los planetas demuestra la posibilidad de su propagación sin un medio que vibre [20, 21]. En efecto, los mismos alumnos razonan que de haber un medio elástico –un éter– que ocupase el espacio sideral, el movimiento de los planetas se vería frenado por la fricción con el mismo (aunque pueden dejarse las discusiones sobre este punto para cuando se aborde la introducción a la Relatividad que figura en los temarios de ciencias).

D. Campos electromagnéticos y de otros tipos

Acto seguido, se introduce el concepto de campo físico, en este caso el campo electromagnético (Fig. 2), suponiendo que las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío como las perturbaciones de algo que no es un medio elástico interpuesto, sino que es una distribución de propiedades físicas en el espacio cuya variación produce efectos como el de las ondas electromagnéticas [22, 23, 24, 25]. Los alumnos encuentran cierta dificultad en asumir que algo puede ser a la vez inmaterial y a la vez físicamente objetivo y real. Su resistencia cede al presentarse el ejemplo del eje de rotación terrestre. El giro de la Tierra sobre sí misma define un eje de rotación que no es tan palpable como el de una noria, pero resulta tan físicamente real como éste último.

Otro argumento experimental es el que aduce que un electrón, por ejemplo, situado en el vacío, oscilaría al paso de una onda electromagnética como cada uno de los corchos del estanque ante las olas del agua. En consecuencia estamos justificados al suponer que se ha transmitido una perturbación ondulatoria por ese lugar [26, 27].

A continuación se ofrece una definición más formal de campo como aquella región del espacio en la que a cada punto y en cada instante se asigna un cierto valor de alguna propiedad física. Si esa propiedad es vectorial, como sucede con la fuerza, en cada punto del espacio sobre el que exista el campo puede imaginarse asociado un vector.

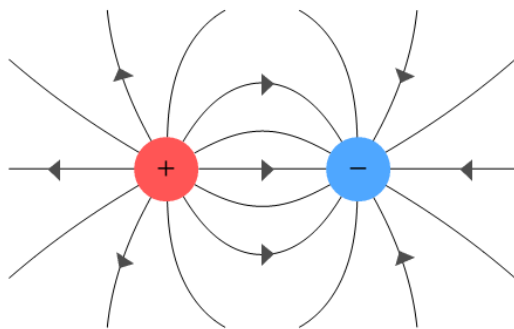


FIGURA 2. Campo eléctrico entre dos cargas según el modelo de “vector-flecha”.

Debe huirse en todo momento de la interpretación materialista ingenua que considera a las “flechitas” representativas de los vectores como una suerte de tentáculos o hilos invisibles pero materialmente reales. Pese a ello, la utilidad de la imagen vectorial es notoria, pues permite comprender fácilmente la razón por la cual los campos electromagnéticos o gravitacionales, se debiliten con el inverso del cuadrado de la distancia.

Los alumnos no encuentran muchas dificultades en comprender que si suponemos que la intensidad de un campo de esta clase viene dada por la cantidad de estas flechas que atraviesan una superficie esférica centrada en la fuente del campo, ya que el área de la superficie esférica es $4\pi r^2$, se deduce que el campo debe debilitarse con $1/r^2$ puesto que a medida que nos alejamos de la fuente las flechas deben repartirse sobre un área esférica progresivamente mayor que aumenta con el cuadrado del radio.

E. Características y limitaciones de la idea de campo

La nota distintiva y fundamental de la idea del campo en física es la de que se trata de un ente real y objetivo (aunque no “material”, en el sentido ingenuo del término) extendido por el espacio, que transite las influencias físicas entre los cuerpos, en contraposición a las fuerzas a distancia de la mecánica newtoniana. A diferencia de las partículas puntuales, caracterizables con tres coordenadas cada una de ellas, los campos necesitan un infinito número de coordenadas para quedar completamente definidos, puesto que ahora hemos de asignar una magnitud –un vector, por ejemplo– a cada punto del espacio. Por ello los campos suelen representarse matemáticamente por funciones continuas del espacio y del tiempo [28].

Sin embargo, la idea de un campo formado por líneas de fuerza materialmente reales es demasiado simplista. La primera objeción que cabe presentar [29] se refiere al número de las líneas de fuerza en el espacio. Si en cualquier lugar del espacio en el que existe, digamos, un campo eléctrico una carga situada en él experimentará su influencia, esto significa que ha de haber líneas de fuerza pasando por los infinitos puntos del espacio que rodea a la fuente de dicho campo. De ser así, la intensidad del campo sería infinita en cualquier parte si es que identificamos, como hizo Faraday [30], el número de líneas que atraviesan una región con la intensidad del campo en ella.

Este resultado absurdo ilustra ante los alumnos los límites de todo modelo explicativo en la ciencia, y da paso a la posibilidad de explicar, a modo de apunte, que las modernas teorías de campo identifican las fuerzas entre partículas por intercambio de otras partículas a las que se llama “mediadoras”. Ese modelo es el que en la actualidad intenta unificar las interacciones nuclear fuerte, nuclear débil, electromagnética y gravitacional.

F. Seguimiento posterior del proceso de enseñanza-aprendizaje

La transición desde la mecánica de partículas puntuales al concepto de campo como ente físico extenso –dando por supuesto que los conceptos que nos sirven de pivote han sido ya tratados– ha durado dos sesiones lectivas, con respecto a la exposición e introducción, únicamente cualitativa, de conceptos novedosos para el alumno.

El resto del tiempo dedicado al tema del electromagnetismo (variable según la programación docente de cada caso) se ha destinado a la profundización de conceptos y al desarrollo de habilidades prácticas mediante la resolución de problemas de planteamiento abierto que manifestasen las contradicciones de los conceptos previos explicitando la necesidad de su refinamiento, o de sencillos ejemplos de aplicación de las ideas más complicadas.

Tras el tratamiento didáctico expuesto a lo largo de este artículo (al que se dedicó, en conjunto, unas ocho sesiones lectivas), se procedió a devolver a los alumnos la hoja de respuestas en las que habían cumplimentado la pregunta inicial, invitándoles a que comentasen los aciertos y errores de sus primeras contestaciones. Los resultados fueron:

- A) Un 90% identificó el campo eléctrico como un caso análogo al gravitacional, señalando similitudes (dependencia del inverso del cuadrado de la distancia) y diferencias (cambio de masas por cargas y de una constante por otra). Dentro de este grupo, un 50% manifestó que la constante K_e del campo electrostático es variable dependiendo del medio que rodea las cargas, mientras que la constante gravitatoria G es universal e independiente de tal circunstancia.
- B) Un 75% explicó que el campo magnético aparece por efecto del movimiento de cargas eléctricas. De este grupo un 10% incurrió en el error de mencionar “movimiento acelerado”, por clara confusión con el origen de las ondas electromagnéticas. Del 65% que respondió correctamente, un 45% señaló de forma explícita las diferencias del campo magnético con el eléctrico (dependencia de la velocidad y fuerzas no radiales).

En la evaluación ordinaria de este tema se incluyó como una cuestión más la pregunta de la encuesta inicial exactamente formulada en los mismos términos que al comienzo, con el fin de comprobar la evolución en el aprendizaje de los alumnos. Aplicamos así una concepción criterial de la evaluación, en lugar de la tradicional visión sumativa. Es decir, consideramos que la evaluación debe constituir un juicio ponderado sobre el desarrollo del alumno en sus múltiples facetas (comprensión, ejercitación y disposición intelectual), y no un simple promedio aritmético de las calificaciones numéricas obtenidas en las pruebas realizadas a lo largo del curso. Los alumnos –que no esperaban algo semejante– respondieron en más de un 90% citando las características esenciales de la idea de campo, singularizadas para el caso del campo electromagnético- desarrolladas a lo largo de este artículo.

Un mes después de dicha evaluación, y sin aviso previo, se solicitó a los alumnos que respondiesen a un breve pliego de preguntas relacionadas con el tratamiento didáctico del electromagnetismo, con el fin de averiguar la persistencia de las ideas presuntamente asimiladas. Las preguntas formuladas fueron:

- 1º) ¿Dónde debemos situarnos para evitar los efectos de un campo electromagnético?, ¿y de uno gravitatorio?
- 2º) ¿Cómo podemos apantallar el campo producido por una carga eléctrica?, ¿y el de una masa gravitacional?
- 3º) Un punto A se encuentra a mayor potencial eléctrico que otro punto B, ¿cómo se orientará el campo eléctrico entre ellos, de A a B o a la inversa?
- 4º) Si nos desplazamos a igual velocidad que a una carga eléctrica móvil, ¿experimentaremos efectos magnéticos?
- 5º) ¿Cómo pueden transmitirse las ondas electromagnéticas desde el Sol a la Tierra atravesando un espacio vacío?

Los resultados obtenidos avalaron nuestra confianza en la fertilidad del esquema didáctico utilizado:

- Un 78% contestó correctamente las cinco preguntas, muchas de las cuales recibieron respuestas acompañadas de dibujos y esquemas que clarificaban el sentido de lo que el alumno deseaba transmitir.
- De entre los fallos cometidos el mayor índice de error se obtuvo en la pregunta 3º (65%), seguida por la 2º (30%) y la 4º (5%).

V. CONCLUSIONES

El modelo didáctico que intenta introducir la noción de campo físico en los estudiantes preuniversitarios a través de un progresivo avance conceptual desde la mecánica de partículas hasta el campo electromagnético, pasando por las ondas elásticas y las electromagnéticas, parece resultar no solo viable sino aconsejable.

La importancia de este modelo reside, en definitiva, no solo en el aprendizaje significativo de los principales conceptos del electromagnetismo y de los campos físicos. Tanto o más importante que esto es la adquisición de una nueva visión de la ciencia y un nuevo modo de razonar en el que se destaquen la adecuación de cada hipótesis a los casos para los que se propone, la detección de sus límites de validez y la necesidad de su sustitución en aquellas situaciones en la que se muestra inaplicable. Es de esperar que ello desarrolle en los estudiantes unas actitudes cognitivas y unos hábitos mentales más abiertos, flexibles y dispuestos a la revisión permanente de sus propias ideas.

REFERENCIAS

- [1] Gil, D., *La metodología científica y la enseñanza de las ciencias. Unas relaciones controvertidas*, Enseñanza de las Ciencias **4**, 111–121 (1986).

- [2] Skordoulis, C. D., *A Philosophy for Critical Science Education*, Kritiki: Critical Science and Education **9**, 81–92 (2009).
- [3] Vitsas, Th., Dafermos, V. and Koleza, E., *The system of coordinates as an obstacle in understanding the concept of dimension*, International Journal of Science and Mathematics Education **7**, 3–24 (2009).
- [4] Brown, J. S., Collins, A. and Duguid, P., *Situated cognition and the culture of learning*, Educational Researcher **1**, 32–42 (1989).
- [5] Cauzinille-Marmeche, E., Meheut, M., Séré, M. G. And Weil-Barais, A., *The influence of a priori ideas on the experimental approach*, Science Education **69**, 201–211 (1985).
- [6] Germann, P. J. and Aram, R. J., *Student performances on the science processes of recording data, analyzing data, drawing conclusions, and providing evidence*, Journal of Research in Science Teaching **33**, 773–798 (1996).
- [7] Kirschner, P. A., *Epistemology, practical work and academic skills in science education*, Science y Education **1**, 273–299 (1992).
- [8] Leach, J., *Students' understanding of the co-ordination of theory and evidence in science*, International Journal of Science Education **21**, 798–806 (1999).
- [9] Chi, M., Slotta, J. and Leeuw, N., *From Things to Processes: The Theory of Conceptual Change Goes Learning Science Concepts*, Learning and Instruction **4**, 27–43 (1994).
- [10] Marín, N., *Delimitando el Campo de Aplicación del Cambio Conceptual*, Enseñanza de las Ciencias **17**, 80–92 (1999).
- [11] Goldstein, H., *Classical Mechanics*, (Addison Wesley, New York, 1980).
- [12] French, A. P., *Mecánica Newtoniana, M. I. T. Physics Course*, (Reverté, Barcelona, 1974).
- [13] Feynman, R., Leighton, R. y Sands, M., *The Feynman Lectures on Physics: Mecánica, radiación y calor*, (Fondo Educativo Interamericano, México D.F., 1971).
- [14] Landau, E. y Lifshitz, E., *Física Teórica, Mecánica*, (Editorial Reverté, Madrid, 1970).
- [15] Arnold, V., *Mecánica clásica*, (Paraninfo, Madrid, 1983).
- [16] Rowlands, S., Grahlan, T. and Berry, J., *Can we Speak of Alternatives Frameworks and Conceptual Change in Mechanics?*, Science and Education **8**, 241–271 (1999).
- [17] Crawford, J., *Ondas. Berkeley Physics Course*, Vol. III, (Reverté, Barcelona, 1977).
- [18] Cassidy, D., Holton, G. and Rutherford, F., *Understanding Physics*, (Springer, New York, 2002).
- [19] Alonso, M. y Finn, E., *Física*, (Fondo Educativo Interamericano, México D.F., 1976).
- [20] Wangsness, R., *Campos electromagnéticos*, (Limusa, Mexico, 1992).
- [21] Reitz, J. R., Milford, F. J. and Christy R. W., *Fundamentos de la teoría electromagnética*, (Addison-Wesley Iberoamericana, Buenos Aires, 1996).
- [22] Panofsky, P., *Classical electricity and magnetism*, (Addison-Wesley, New York, 1972).
- [23] Feynman, R., Leighton, R. and Sands, M., *The Feynman Lectures on Physics: Electromagnetismo y materia*, (Fondo Educativo Interamericano, México, 1972).
- [25] Landau y Lifshitz, *Física Teórica. Electrodinámica de los medios continuos*, (Editorial Reverté, Madrid, 1975).
- [26] Seroglou, F., Koumaras, P. and Tselfes, V., *History of Science and Instructional Design: The Case of Electromagnetism*, Science and Education **7**, 261–280 (1998).
- [27] Seker, H. and Welch, L. C., *The Use of History of Mechanics in Teaching Motion and Force Units*, Science and Education **15**, 55–89 (2006).
- [28] Jammer, M., *Concepts of force*, (Oxford Univ. Press, London, 1957).
- [29] Alemañ, R. A., *Grandes metáforas de la física*, (Celeste Ediciones, Madrid, 1998).
- [30] Williams, L. P., *Faraday as a natural philosopher*, (Univ. of Chicago Press, Chicago, 1971).