

LAS CONDICIONES DE VALIDEZ DE LAS LEYES DE LA MECÁNICA NEWTONIANA: INCOMPRESIONES DE ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS ¹

WAINMAIER, C.¹; SPELTINI, C. ²; SALINAS, J.³

¹ Dto. Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Quilmes
Roque Sáenz Peña 352, Bernal.

² Universidad Tecnológica Nacional, Regional Avellaneda

³ Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán
cwainmaier@unq.edu.ar, cspeltini@fra.utn.edu.ar, jsalinas@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo, que forma parte de una Tesis de Maestría en Enseñanza de la Física ya defendida, presentamos limitaciones e incomprensiones, de estudiantes de cursos básicos universitarios de carreras científico tecnológicas, en torno al establecimiento y reconocimiento de las condiciones de validez de leyes fundamentales de la Mecánica Newtoniana. Los resultados parecerían mostrar vínculos importantes entre la comprensión de aspectos epistemológicos y conceptuales de la Física cuyo reconocimiento y caracterización pueden contribuir a la formulación fundamentada de estrategias educativas más eficientes.

Palabras clave: condiciones validez, leyes, incomprensiones, estudiantes universitarios

¹Un resumen de este trabajo fue publicado en las Memorias del *International Congress of Science Education*, 15 al 18 de julio de 2009, Cartagena Colombia y presentado en forma oral.

INTRODUCCIÓN

Numerosas investigaciones ponen de manifiesto la presencia de serias y extendidas dificultades de entendimiento en el campo de la Mecánica Newtoniana de estudiantes universitarios, una vez que han concluido el cursado y han aprobado la asignatura correspondiente (Viennot, 1979; Covián *et al.*, 2008, entre otros). Particularmente, las incomprensiones relacionadas con las leyes de la Mecánica Newtoniana parecen ir más allá de concepciones conceptuales alternativas a las que sostienen los científicos en la actualidad.

Distintos planteamientos, basados en concepciones constructivistas del aprendizaje, consideran que aquello que los estudiantes “ya saben” es un factor decisivo sobre lo que son capaces de aprender (Ausubel *et al.* 1983). Son numerosos los trabajos que, además, ponen en evidencia un cierto paralelismo entre esquemas explicativos-predictivos de los estudiantes y construcciones conceptuales aceptadas en épocas pasadas por la comunidad precursora de los científicos actuales. Esta investigación se ubica entre las que hipotetizan que estas semejanzas podrían reconocer su origen en estrategias cognitivas, restricciones axiológicas, epistemológicas y ontológicas compartidas (Piaget, 1972; Matthews, 1994; Gil, 1993; Cudmani *et al.* 2000; Wainmaier y Salinas, 2005). Desde esta perspectiva se entiende que una adecuada comprensión de los conocimientos disciplinares requiere una adecuada comprensión de los criterios, valores, metas y concepciones que actúan como moldes en el proceso de su construcción y validación de dicho conocimiento. En particular, las concepciones de los estudiantes en relación a la naturaleza epistemológica de los conceptos, leyes, teorías y modelos, podrían constituir una clave para interpretar sus dificultades de aprendizaje, y una dimensión a ser atendida en la enseñanza para favorecer mejores comprensiones (McComas, 2000).

En nuestra práctica docente y en las investigaciones que venimos realizando se advierten, entre otros aspectos, que los estudiantes tienen serias limitaciones para relacionar adecuadamente teorización y comportamiento fáctico. Por ejemplo, tienen dificultades para reconocer el modelo adecuado en situaciones reales; no especifican las condiciones bajo las cuales es válida una ley, no son capaces de explicitar correctamente las condiciones presupuestas en las leyes de la Física, incomprensión que se refleja en dificultades conceptuales con el saber de la disciplina (Salinas, 2003; Wainmaier y Salinas, 2008).

En relación a la naturaleza de las leyes científicas fácticas, tema que nos ocupa en el presente trabajo, cabe señalar que tienen un ámbito restringido de validez. Esto se debe a que los sistemas teóricos científicos se construyen centrando la atención en un puñado de rasgos (variables) y descartando los que se consideran variables secundarias (Bunge 1985). El nexo que de esta manera se establece entre las condiciones supuestas en el modelo y el enunciado de la ley correspondiente, aconseja fuertemente el uso explícito de la forma del condicional lógico cuando se formulan las leyes de la Física. Esta forma de expresar las leyes muestra con claridad bajo qué condiciones es válida la ley (Bunge, 1985; Salinas, 2003).

El presente trabajo continúa la presentación de parte de los resultados de una Tesis de Maestría en Enseñanza de la Física (Wainmaier, 2003), ya defendida. En trabajos anteriores (Wainmaier y Salinas 2005; 2006) hemos presentado y analizado, en forma amplia y general, algunos resultados de las dificultades de los estudiantes para diferenciar, integrar y transferir conceptos y leyes, así como para relacionar adecuadamente teorización y comportamiento fáctico. Siguiendo y profundizando en torno a esta última dimensión, presentamos limitaciones e incomprensiones de estudiantes de cursos básicos universitarios de carreras científico tecnológicas que se ponen en evidencia al:

- ✓ explicar verbalmente condiciones de validez de leyes;
- ✓ reconocer condiciones de validez de leyes en situaciones problemáticas.

ASPECTOS METODOLÓGICOS²

Para evaluar si los estudiantes comprenden aspectos vinculados con las condiciones de validez de las leyes se elaboraron y validaron seis actividades, a fin de favorecer la confiabilidad mediante un control de la convergencia de las respuestas. En todos los casos se pidió una justificación, para que los estudiantes se vieran comprometidos a emitir juicios. Con esto intentamos, además, controlar la fundamentación y obtener pistas sobre el tipo de explicación elaborada.

A fin de conocer si se establecen adecuadamente las condiciones de validez de leyes elaboramos cuatro actividades, con el formato del ejemplo que sigue. Se solicitó además dar ejemplos para indagar la referencia a las condiciones de validez de las leyes en los mismos.

Explica qué condiciones deben cumplirse para que la cantidad de movimiento lineal de un sistema mecánico sea constante. Brinda un ejemplo de un sistema con cantidad de movimiento lineal constante.

Para evaluar si se reconocen las condiciones de validez de leyes, planteamos dos situaciones problemáticas que hacen referencia al movimiento de la Tierra alrededor del Sol, a lo largo de una órbita elíptica (enunciado que sigue) y en el otro caso de una órbita circular.

Considera el sistema formado por la Luna girando alrededor de la Tierra con movimiento circular. No tomes en cuenta el movimiento de traslación de la Tierra.

- a) *¿Se cumplen las condiciones para que la cantidad de movimiento lineal de la Tierra permanezca constante?*
- b) *¿Se cumplen las condiciones para que permanezca constante la cantidad de movimiento angular de la Tierra (respecto de un eje que pase por el Sol y sea perpendicular al plano de la trayectoria)?*
- c) *¿Se cumplen las condiciones para que la energía cinética de la Tierra permanezca constante?*
- d) *¿Se cumplen las condiciones para que la energía mecánica de la Tierra permanezca constante?*

En todos los casos justifica las respuestas

Todas las actividades, por otro lado, permiten indagar si el alumno discrimina las condiciones de validez de diferentes leyes.

Las actividades fueron resueltas por escrito y en forma individual en diferentes encuentros. El estudio se realizó con una totalidad de 77 estudiantes pertenecientes a cuatro grupos a cargo de docentes diferentes: GRUPO 1 y 2: 18 y 14 estudiantes, respectivamente, de Ingeniería (UBA); GRUPO 3 y 4: 20 y 25 estudiantes, respectivamente, de la Diplomatura en Ciencia y Tecnología (UNQ). Todos los estudiantes habían aprobado, o al menos regularizado la asignatura. En el Grupo 4, paralelamente al tratamiento de los contenidos conceptuales, se había prestado especial atención a aspectos relacionados con la naturaleza epistemológica de los conceptos, leyes, teorías y modelos.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En lo que sigue se presentan y analizan los resultados obtenidos en torno a la explicación y reconocimiento de las condiciones de validez de cada una de las leyes.

Tabla 1. Cantidad de movimiento lineal

Explicar condiciones	Argumentación	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
		%	%	%	%
Explicar condiciones	Científica	89	90	14	86
	Formal	11	0	14	7
	Incorrecta	0	10	14	7
	NC	0	0	58	0
Reconocer condiciones	Científica	61	21	5	84
	Formal	17	29	20	16
	Incorrecta	22	36	50	0
	NC	0	14	25	0

✓

- ✓ Se advierte el uso de condiciones de validez formales en lugar de condiciones físicas. Por ejemplo, afirman que “*para que se conserve la cantidad de movimiento deben permanecer constantes la masa y el vector velocidad*”.
- ✓ Al recurrir a condiciones formales aparecen argumentos inapropiados vinculados al carácter escalar/vectorial de las magnitudes. Se afirma, por ejemplo: “*la cantidad de movimiento lineal es constante en un MCU porque la velocidad es constante*”.
- ✓ Se establecen condiciones de validez incorrectas. Por ejemplo, se afirma que “*se conserva la cantidad de movimiento porque la fuerza que actúa sobre el mismo es constante*”.
- ✓ Si bien se reconocen las condiciones de validez, se hace uso de argumentaciones incorrectas vinculadas a concepciones alternativas. Se afirma, por ejemplo que, “*se conserva la cantidad de movimiento de la Luna porque la fuerza gravitatoria se anula con la centrífuga*” señalando que la fuerza resultante es nula.

Tabla 2. Cantidad de movimiento angular

Explicar condiciones	Argumentación	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
		%	%	%	%
Explicar condiciones	Científica	44.5	75	38	80
	Formal	44.5	0	16	7
	Incorrecta	11	0	38	13
	NC	0	25	8	0
Reconocer condiciones	Científica	50	43	5	84
	Formal	11	0	5	0
	Incorrecta	22	14	30	0
	NC	17	43	60	16

- ✓ Un número importante de estudiantes, particularmente del grupo 1, establece condiciones formales haciendo alusión a que “*I. w debe ser constante*”.
- ✓ Al recurrir a condiciones formales para justificar si se cumplen ciertas relaciones, aparecen argumentos inapropiados vinculados a razonamientos monoconceptuales (Viennot 1979): los estudiantes recurren a la definición: $\mathbf{l}_o = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ y afirman que “*la cantidad de movimiento angular, respecto de un eje, no es constante en un movimiento elíptico porque r varía*”, sin centrar la atención en que p también lo hace.

- ✓ Se identifican condiciones de validez de leyes inadecuadas. Por ejemplo, se señala que “*para que se conserve la cantidad de movimiento angular la sumatoria de las fuerzas debe ser nula*”.

Tabla 3. Energía cinética

Explicar condiciones	Argumentación	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
		%	%	%	%
Explicar condiciones	Científica	44.5	30	14	100
	Formal	11	20	0	0
	Incorrecta	44.5	50	0	0
	NC	0	0	86	0
Reconocer condiciones	Científica	17	21	5	64
	Formal	33	21	15	20
	Incorrecta	33	29	50	12
	NC	17	29	30	4

- ✓ Se emplean argumentos basados en condiciones formales. Tal como señala Mc Dermott (1993) se advierte que para justificar los estudiantes no recurren al análisis del trabajo de todas las fuerzas sino que basan sus razonamientos en la definición de E_C , y se limitan a plantear que la velocidad (no se hace referencia, además, al módulo de la velocidad) debe permanecer constante.
- ✓ Se detecta un modo de razonamiento incorrecto, por el que se establece una indiferenciación entre el antecedente y el consecuente de una ley: al preguntar sobre las condiciones que deben cumplirse para que la energía cinética permanezca constante, se obtiene como respuesta que “*la energía cinética final debe ser igual a la inicial*”.
- ✓ Se identifican condiciones de validez de leyes inadecuadas. Con frecuencia se afirma que “*la energía cinética se conserva cuando la fuerza que actúa es conservativa*”. En otros casos, a través de un razonamiento causal lineal (Viennot 1979), se establece una relación incorrecta entre fuerza y cambio de energía. Por ejemplo se señala: “*para que la energía cinética se mantenga constante no tiene que haber fuerza externa neta, para que no se produzca aceleración en el sistema y así la velocidad permanezca constante*”.

Tabla 4. Energía mecánica

Explicar condiciones	Argumentación	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
		%	%	%	%
Explicar condiciones	Científica	78	50	5	80
	Formal	0	0	0	0
	Incorrecta	22	25	95	20
	NC	0	25	0	0
Reconocer condiciones	Científica	55	36	5	72
	Formal	6	0	0	4
	Incorrecta	11	21	55	12
	NC	28	43	40	12

- ✓ Se establece una indiferenciación entre el antecedente y el consecuente de una ley. Por ejemplo, al preguntar sobre las condiciones que deben cumplirse para que la energía mecánica permanezca constante, se obtiene como respuesta que “*la energía mecánica final*”

debe ser igual a la inicial”, en lugar de establecer como condición que el trabajo de las fuerzas no conservativas sea nulo.

- ✓ Se evidencian condiciones de validez de leyes inadecuadas: Por ejemplo, se afirma que *“la energía mecánica de un sistema dado se conservan cuando no actúan fuerzas no conservativas”*.
- ✓ De acuerdo con Speltini *et al.* (2002) no queda claro si los estudiantes perciben la gran diferencia que existe entre el empleo de leyes dinámicas y las leyes de conservación de la energía.

El análisis global de las respuestas permite concluir que:

- ✓ Los estudiantes del grupo 4 no tienen mayores dificultades para explicar y reconocer en casos concretos las condiciones de validez de leyes. En cambio, se advierten serias dificultades en las respuestas del grupo 3.
- ✓ Las mayores incomprensiones y limitaciones se advierten cuando los estudiantes tiene que reconocer las condiciones de validez en situaciones problemáticas.
- ✓ Las mayores dificultades están vinculadas con la energía cinética.
- ✓ Hay limitaciones e incomprensiones entorno al reconocimiento de las condiciones de validez de leyes:
 - Se establecen condiciones formales: se hace uso de la definición del concepto y se analiza si cada una de las magnitudes involucradas en la definición cambia o no.
 - Se detecta, en coincidencia con lo que señala Salinas (2002), un modo de razonamiento incorrecto por el que se establece una indiferenciación entre el antecedente y el consecuente de una ley: se establece como antecedente de la ley (o sea como condiciones necesarias y suficientes para que se cumpla) al consecuente de la misma (o sea a la relación entre las magnitudes que se afirma).
 - Se identifican condiciones de validez de leyes inadecuadas, algunas de los cuales dan cuenta de confusiones entre las condiciones de validez de diferentes leyes.
- ✓ Al brindar ejemplos las respuestas son breves, incompletas y mayoritariamente aluden a casos tipo (*“una bailarina conserva su cantidad de movimiento angular”*, *“en un choque se conserva la cantidad de movimiento lineal”*). Algunas parecerían dar cuenta de una confusión entre explicación y nominación: se considera que el hecho de poder dar un nombre a lo que se quiere explicar es ya una explicación (Salinas, 2007). Así, al brindar ejemplos vinculados con la energía cinética se señala: *“en un choque elástico se conserva la energía cinética por el tipo de choque”*.

COMENTARIOS FINALES

Las incomprensiones y limitaciones a las que hicimos referencia en el análisis de las actividades presentadas, y de otras incluidas en preguntas pertenecientes a otras dimensiones que no fueron analizadas en este trabajo, consideramos que ponen de manifiesto la existencia de incomprensiones conceptuales vinculadas a cuestiones epistemológicas. Estos resultados y otros que venimos obteniendo avalan la necesidad de considerar en la enseñanza:

- ✓ el uso explícito de la forma del condicional lógico cuando se formulan las leyes de la Física;
- ✓ la diferenciación entre proposiciones necesarias (tales como las definiciones, nominaciones) y proposiciones contingentes (tales como las leyes).

Los resultados de esta investigación refuerzan, a nuestro criterio, la importancia de incorporar aspectos de índole epistemológica en las clases de Física que podrían ser utilizadas como herramientas para acceder al conocimiento científico. En tal sentido cabe señalar que los

resultados del Grupo 4, en el que se introdujeron funcionalmente reflexiones de índole epistemológicas, son alentadores. Cabe destacar que en una indagación más amplia (Wainmaier, 2003), de la que se ha hecho un recorte de los aspectos presentados en este trabajo, se ha obtenido una correlación significativa entre “comprensión conceptual” y “comprensión epistemológica” de conceptos, leyes, teorías y modelos de la Mecánica Newtoniana. Los resultados parecerían mostrar, vínculos importantes entre la comprensión de aspectos epistemológicos y conceptuales cuyo reconocimiento y caracterización pueden contribuir a la formulación fundada de estrategias educativas más eficientes.

BIBLIOGRAFÍA

Ausubel, D.; Novak, J. y Hanesian, H. (1983). *Psicología Educativa: Un punto de vista cognoscitivo*. México, Trillas.

Bunge, M. (1985). *La investigación científica*. Barcelona, Ariel.

Covián Regales, E. y Celemín Matachana, M. (2008). Diez años de evaluación de la enseñanza-aprendizaje de la Mecánica de Newton en Escuelas de Ing. españolas. Rendimiento académico y presencia de preconceptos. *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 26, Nro.1, pp. 23-42.

Cudmani, L.; Pesa, M. y Salinas, J. (2000). Hacia un modelo integrador para el aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, Vol.18, Nro.1, pp. 3-13.

McComas, W. (2000). *The nature of science in science education. Rationales and strategies*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Gil D. (1993). Contribución de la historia y la filosofía de la ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza /aprendizaje como investigación dirigida. *Enseñanza de las Ciencias* Vol.11, Nro. 2, pp. 197-212.

Matthews, M. (1992). History, philosophy and science teaching: The present rapprochement. *Science & Education*, Vol.1, Nro.1, pp.11-48.

Mc Dermott, L. (1993). Cómo enseñamos y cómo aprenden los estudiantes: ¿Un desajuste? *Revista de Enseñanza de la Física*, Vol. 6, Nro. 1, pp.19-33.

Piaget, J. (1972). *Psicología y Epistemología*. Buenos Aires, Emecé Editores.

Salinas, J. (2003). El dominio de validez de las leyes de la Física: Incomprensiones de estudiantes y docentes. Salinas J. *Actas de la XIII Reunión Nacional de Educación en Física*. Corrientes, Argentina, versión CD.

Salinas, J. (2007). Confusiones entre proposiciones necesarias y contingentes en el aprendizaje de la física clásica. Jornadas de Enseñanza e Investigación Educativa en el campo de las Ciencias Exactas y Naturales. 18 al 19 de octubre, La Plata.

Speltini, C. y Dibar M.C. (2002). Conservation in Physics Teaching, History of Science and Child Development; *Science and Education*; Vol 11 Nro.5, pp.475-486.

Viennot, L. (1979). *Le rasoinement spontané en dynamique élémentaire*. París., Hermann.

Wainmaier, C.; 2003; Incomprensiones en el aprendizaje de la mecánica clásica básica. *Tesis de Maestría*. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

Wainmaier, C. y Salinas, J. (2005). Incomprensiones en el aprendizaje de la Mecánica Clásica Básica. *Revista de Enseñanza de la Física*, Vol. 18, Nro.1, pp. 39-54.

Wainmaier, C. y Salinas, J. (2006). Mecánica newtoniana: dificultades de estudiantes universitarios *IX CIAEF*. Costa Rica.

Wainmaier, C. y Salinas, J. (2008). Incomprensiones en el modelo de punto material en estudiantes que regularizaron Física I. *Revista de Enseñanza de la Física*, Vol. 21 Nro. 1, pp. 29-42.