

Aprendizaje avanzado: comprensión del concepto de "invariancia" a partir de textos

Advanced Learning: understanding of the invariance concept from texts

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Elena Hoyos^{1,2} y M. Cecilia Pocovi³

¹Sede Regional Tartagal, Universidad Nacional de Salta. Warner y Ejército Argentino, CP 4561, Tartagal, Salta. Argentina.

²Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, CP 4400, Salta. Argentina.

³Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Av. Bolivia 5150, CP 4400, Salta. Argentina.

E-mail: hoyosele@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se describen el tipo de concepciones erróneas que poseen los estudiantes que, habiendo aprendido el concepto de "invariancia" en cursos anteriores de mecánica, deben aplicarlo al contexto nuevo del electromagnetismo. Este tipo de concepciones erróneas asociadas a sobresimplificaciones adquiridas durante el aprendizaje formal previo han sido predichas en la teoría de la flexibilidad cognitiva (Spiro y otros, 2006) como uno de los problemas más importantes que surgen en situaciones de "aprendizaje avanzado", particularmente en el caso de aprendizaje a partir de la lectura (Spiro, 2006). Se concluye que entre las deficiencias señaladas por Spiro y otros (2006), algunas de las más frecuentes corresponden a la transmisión pasiva del conocimiento, a la representación conceptual simplificada independiente del contexto y al tratamiento separado de componentes de conocimiento interrelacionadas.

Palabras clave: Teoría de flexibilidad cognitiva; Aprendizaje avanzado; Comprensión lectora; Invariancia; Electromagnetismo.

Abstract

This study targets the description of the type of misconceptions that students have about the "invariance" concept is presented here. These students have previously learned the concept of invariance in a mechanics course and must use it in the new context of electromagnetism. This type of misconceptions associated to oversimplifications acquired during previous formal education has been predicted by the Cognitive Flexibility Theory (Spiro et al., 2006) as one of the most salient problems that emerge during "advanced learning" situations, particularly in learning from texts (Spiro, 2006). It is concluded that among those deficiencies signaled by Spiro et al. (2006), those that appear most frequently are: the passive transmission of knowledge, the oversimplified conception that makes it independent of context, and the separate treatment of interrelated knowledge components.

Keywords: Cognitive flexibility theory; Advanced learning; University students; Invariance; Electromagnetism.

I. INTRODUCCIÓN

La comprensión lectora realizada de una manera hábil y eficiente requiere la consideración simultánea y flexible de múltiples elementos (Cartwright, 2009). La teoría de flexibilidad cognitiva (Spiro y otros, 2006) y Spiro (2006), en adelante TFC, explica algunos de los problemas que surgen en el "aprendizaje avanzado" (p. 641) a partir de la lectura.

El objeto de la presente investigación es describir el tipo de preconceptos que poseen los alumnos que, habiendo estudiado el concepto de "invariancia" en cursos de mecánica, deben aplicarlo al contexto nuevo del electromagnetismo. En este sentido, los alumnos participantes de esta investigación llevan a cabo un aprendizaje avanzado; en particular, el aprendizaje se realiza a partir de textos elegidos para esta investigación.

El concepto de invariancia es un concepto de fundamental importancia en física. El estudio de cualquier fenómeno de la mecánica clásica requiere de la elección de un sistema de referencia conveniente;

esto es, un sistema de referencia inercial en el cual sean válidas las Leyes de Newton. La pregunta que surge naturalmente después de realizada esta elección es si la descripción, es decir las leyes y las magnitudes asociadas al fenómeno analizado, se modifican cuando cambia el sistema de referencia inercial elegido. La contestación a esta pregunta es proporcionada por el análisis de la invariancia de leyes y magnitudes frente a las Transformaciones de Galileo. En la mecánica newtoniana la respuesta se reduce a que las Leyes de Newton son invariantes frente a las Transformaciones de Galileo o, dicho de otra forma, las leyes de la mecánica son las mismas en todos los sistemas inerciales.

En la mayoría de los diseños curriculares a nivel universitario, los cursos de mecánica clásica son seguidos de aquellos de electromagnetismo. Las leyes del electromagnetismo clásico no son invariantes frente a las Transformaciones de Galileo, es decir que, desde el punto de vista de la física clásica, un fenómeno electromagnético puede verse distinto desde distintos sistemas de referencia inerciales. Al realizar el análisis de la invariancia de leyes del electromagnetismo frente a las Transformaciones de Galileo, un alumno deberá involucrar un concepto estudiado previamente en un nuevo contexto.

II. MARCO TEÓRICO Y PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

Existe evidencia que sugiere que el desarrollo cognitivo, que incluye la flexibilidad cognitiva, tiene características propias de cada dominio a aprender (Alexander, 1998) y, más aún, se puede mejorar mediante intervenciones específicas correspondientes a ese dominio, de manera similar a como se logra mejorar el uso del lenguaje con la práctica (Kloo y Perner, 2003; Wellington y Osborne, 2001). Cartwright (2009) afirma que, a pesar de esta evidencia, resta llevar a cabo investigaciones que ayuden a dilucidar la naturaleza de la flexibilidad cognitiva en un lector. En este sentido, la autora indica que los resultados obtenidos en investigaciones de este tipo podrían señalar qué clase de actividades específicas pueden diseñarse para mejorar la flexibilidad cognitiva de los lectores menos hábiles (p. 130).

Spiro y otros (2006), en su presentación de la TFC, identificaron algunas deficiencias en la adquisición de conocimiento avanzado al cual definieron como el aprendizaje que llevan a cabo sujetos que han superado la fase introductoria de aprendizaje en un área pero que aún no pueden ser calificados de expertos, condición que se consigue mediante una experiencia masiva en el tema (p. 640–641). Una de las deficiencias más importantes detectadas es que estos lectores poseen preconceptos que derivan de la sobre-simplificación de conceptos complejos que han sido aprendidos formalmente en una instancia previa. A esta tendencia a reducir aspectos importantes de un concepto a una forma sencilla pero equivocada se la denomina "prejuicio reductivo" (*reductive bias*). Si bien este fenómeno puede tomar diferentes formas descritas por estos autores, por razones de espacio, enumeraremos a continuación sólo aquellas que resultaron de utilidad para interpretar los resultados en el presente trabajo: 1) representación conceptual independiente del contexto, 2) tratamiento separado de componentes de conocimiento interrelacionadas, 3) transmisión pasiva de conocimiento (p. 642–643). La identificación de estas formas de sobre-simplificación es importante porque permitirá, en una etapa posterior, el diseño de material didáctico escrito apuntado a subsanar estos problemas.

En el caso del aprendizaje a nivel universitario, los libros y, en general, los textos constituyen uno de los materiales didácticos más utilizados por los estudiantes. Específicamente, el carácter teórico del concepto de "invariancia" implica que gran parte de su aprendizaje deba realizarse a partir de textos. Hoyos y Pocoví (2014) analizaron la presentación de las Transformaciones de Galileo en los libros de mecánica básica encontrando que muchos de ellos no presentan en su desarrollo, las características necesarias para facilitar la comprensión lectora de este tema. En ese trabajo, las autoras advirtieron que estos resultados que inciden directamente sobre el aprendizaje del concepto en el contexto de la mecánica, podrían repercutir desfavorablemente en el uso y análisis de la invariancia en un contexto nuevo y estudiado con posterioridad, como lo es el del electromagnetismo (p.4506–6). Sostienen que el fracaso en comprender, y por ende utilizar, el concepto de invariancia en el estudio de sus leyes impedirá a los alumnos comprender el carácter inherentemente relativista de los fenómenos electromagnéticos.

Para plantear un caso que se acercara lo más posible a la situación real de aprendizaje, tal como se desarrolla a medida que los alumnos avanzan en el currículo de su carrera, se tomó como muestra a un grupo de 56 alumnos de Ingeniería en Perforaciones que habían estudiado de manera tradicional la noción de invariancia en el curso de Física I; esto es, mediante la explicación teórica del concepto y la lectura de textos introductorios sobre el tema (analizados en Hoyos y Pocoví, 2014). Durante la presente investigación, este grupo de estudiantes cursaba Física II (electromagnetismo básico) y las actividades diseñadas para analizar la comprensión del concepto de invariancia en ese contexto, fueron incorporadas como parte de las actividades prácticas del cursado, sin incidencia en la nota final de la materia. Así, se plantearon las siguientes preguntas de investigación respecto a este grupo de estudiantes en condiciones de realizar un aprendizaje avanzado:

- 1) ¿Se puede describir la comprensión lectora de estos estudiantes como limitada a lo que Spiro y otros (2006) describen como la "transmisión pasiva del conocimiento"?
- 2) ¿Existe evidencia de que estos alumnos poseen una representación conceptual de la invariancia que es tan simplificada y básica que resulta independiente del contexto? ¿En qué consiste esa evidencia?
- 3) ¿Existe evidencia de que se traten separadamente componentes de conocimiento interrelacionadas? ¿En qué consiste esa evidencia?

III. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Una de las características sobresalientes de la presente investigación es que trata de determinar las deficiencias en la utilización del concepto de invariancia, estudiado en el contexto de la mecánica, en situaciones que corresponden a un nuevo contexto, el del electromagnetismo. El análisis de la invariancia de las leyes que rigen el electromagnetismo frente a las Transformaciones de Galileo, pondrá de manifiesto su carácter relativista. La mayoría de los textos de electromagnetismo básico, comienzan su desarrollo presentando la Ley de Coulomb y, luego, la Ley de Gauss. Es en la comprensión de textos relacionados a estas dos leyes, en los cuales se centró el presente análisis.

Para este propósito, se eligió el diseño de investigación planteado por Lesh y otros (2000) que se basa en el uso de actividades posteriores a la realización de una lectura y que revelan el pensamiento de los estudiantes, en este caso particular, sobre el concepto de invariancia aplicado a la Ley de Coulomb y a la Ley de Gauss. Las lecturas y actividades correspondientes a los dos temas fueron realizadas por los alumnos de manera secuencial. Los textos seleccionados se muestran a continuación y fueron facilitados a los estudiantes conjuntamente con la actividad a llevar a cabo posteriormente. Para mayor claridad en la presentación, se detallará cada caso por separado.

A. El caso de la Ley de Coulomb

Texto presentado a los alumnos:

A continuación se transcribe un texto correspondiente a Ley de Coulomb. Léalo atentamente y luego realice la actividad indicada a continuación: Sabido es que la interacción entre cargas eléctricas en reposo se explica por la Ley de Coulomb: Dos cargas eléctricas estacionarias se repelen o atraen entre sí con una fuerza proporcional al valor de las cargas e inversamente proporcional a su distancia mutua (Purcell, 1988).

Actividad 1:

En base a la lectura anterior, responda las siguientes preguntas de manera escrita e individual. Su respuesta deberá ser presentada al profesor:

- a1) ¿Se puede calcular mediante la Ley de Coulomb la fuerza entre cargas en movimiento uniforme? Justifique su respuesta.*
- b1) Si se tienen dos cargas en reposo en el sistema inercial O , ¿puede encontrar la fuerza entre estas cargas en un sistema inercial O' que se mueve a velocidad constante u respecto de O , utilizando la Ley de Coulomb? Justifique su respuesta. (Ayuda: En el sistema O' , ¿las cargas están en reposo o en movimiento?)*
- c1) ¿Se puede analizar la invariancia de la Ley de Coulomb respecto de las transformaciones de Galileo? Justifique su respuesta.*

Las preguntas anteriores fueron diseñadas teniendo en cuenta las preguntas de investigación planteadas (ver sección anterior) y el nivel de procesamiento de la información leída, supuestamente adquirido en cursos anteriores, tal como lo plantea Alexander (1998).

Las preguntas a_1) y b_1) están centradas en la posibilidad del cálculo de una magnitud, "fuerza", bajo ciertas condiciones especificadas, mientras que la pregunta c_1) requiere un análisis de la invariancia de una ley. Se debe notar que el análisis de invariancia de magnitudes y , específicamente, de fuerzas, ya ha sido presentado y estudiado por los alumnos participantes en el contexto de la mecánica. La respuesta a la pregunta a_1) está contenida explícitamente en el texto en el cual se menciona que la Ley de Coulomb es válida para describir la interacción entre cargas eléctricas en reposo. Por lo tanto, la elaboración de la respuesta requiere sólo de la transmisión pasiva del conocimiento ya que el alumno no debe realizar ninguna inferencia a partir del texto leído ni tampoco debe recurrir a conceptos estudiados previamente. Un alumno que solamente conteste correctamente la pregunta a_1), posee la deficiencia llamada transmisión pasiva del conocimiento, según Spiro y otros (2006) y el grupo de alumnos que estén en esta condición constituirán los datos en base a los cuales se podrá responder la pregunta 1) de la investigación.

La respuesta a la pregunta b_1) también requiere de un nivel muy básico de procesamiento, pero, implica recordar la idea de velocidad como un concepto relativo. Es decir, no se puede encontrar la fuerza entre cargas en el sistema O' pues para ese observador, las cargas están en movimiento. Una vez que el alumno llega a esta afirmación, puede concluir, nuevamente en base al texto, que no es posible aplicar la Ley de Coulomb.

La pregunta c_1) es la que requiere de mayor nivel de procesamiento para ser contestada correctamente. Primero requiere que el alumno "traduzca" la expresión "analizar la invariancia de la Ley de Coulomb" a lo que operativamente implica. Esto es, comparar la expresión de la fuerza dada por esa ley en distintos sistemas inerciales. Sin embargo, si se ha comprendido el alcance de la pregunta b_1), se llegará a la conclusión de que dicho análisis no se puede realizar pues la Ley de Coulomb no será válida en el sistema O' respecto del cual las cargas se están moviendo. En otras palabras, a pesar de que se requiere un procesamiento más avanzado por parte del alumno, la respuesta correcta está contenida en el texto leído, es decir que el análisis de la fuerza en distintos sistemas inerciales es una componente de conocimiento que está relacionada con el análisis de la invariancia de la ley estudiada.

Una de las características que presenta esta actividad es que las respuestas correctas en los tres casos a_1), b_1) y c_1) son respuestas negativas, es decir, en ninguno de los tres casos es posible realizar lo que plantean las preguntas. Se debe recordar que en el contexto previo en el cual se aprendió el concepto de invariancia, la mecánica Newtoniana, las leyes que la rigen son las mismas en cualquier sistema inercial. En este sentido, se puede decir que, si bien tanto las preguntas como el concepto involucrado (invariancia) no son nuevos para el estudiante, el contenido de las respuestas cambia radicalmente.

En consonancia con la pregunta 2) de la investigación, se puede considerar que aquellos alumnos que contestan erróneamente todas las preguntas, extienden sin razón o bien fuerzan su conclusión en base a la invariancia de las fuerzas frente a las transformaciones de Galileo estudiada en mecánica. Si este fuera el caso, se podría decir que los alumnos poseen una representación conceptual acerca de la invariancia que es tan simplificada y básica que resulta independiente del contexto.

Para contestar a la pregunta 3) de la investigación, se analizó si existen alumnos que, habiendo respondido negativamente y de manera correcta la pregunta b_1) acerca de la validez de la Ley de Coulomb desde distintos sistemas de referencia, expresan que se puede realizar el análisis de la invariancia de esta ley, como se requiere en la pregunta c_1). En otras palabras, se podría concluir que estos alumnos tratan separadamente componentes de conocimiento interrelacionadas y contestan las preguntas utilizando en este caso una respuesta afirmativa que conocen que es correcta en otro contexto.

B. El caso de la Ley de Gauss

Texto presentado a los alumnos:

*A continuación se transcribe extractos de un texto correspondiente a la Ley de Gauss. Léalo atentamente y luego realice la actividad indicada a continuación:
Existe evidencia experimental concluyente de que la carga total de un sistema, no varía por el movimiento de los portadores de carga [...] Los experimentos que hemos descripto y algunos otros, demuestran que el valor de la integral $\int \vec{E} \cdot d\vec{a}$ de nuestra Ley de Gauss depende solamente del número y variedad de partículas cargadas en el interior de la superficie y no de cómo se mueven. (Purcell, 1988)*

Actividad 2:

*En base a la lectura anterior, responda las siguientes preguntas de manera escrita e individual:
a2) ¿Se puede calcular el campo eléctrico para cargas en movimiento, mediante la Ley de Gauss? Justifique su respuesta.
b2) Dada una distribución de cargas en reposo respecto de un sistema O , y un sistema inercial O' que se mueve a velocidad constante respecto de O , ¿se puede calcular el campo eléctrico en O' utilizando la Ley de Gauss? Justifique su respuesta.
c2) ¿Se puede analizar la invariancia de la Ley de Gauss frente a las transformaciones de Galileo? Justifique su respuesta.*

Así como en el caso de la Ley de Coulomb, las preguntas anteriores fueron diseñadas teniendo en cuenta las preguntas de investigación planteadas de manera que las respuestas reflejaran el nivel de procesamiento de la información leída.

Las preguntas de la segunda actividad fueron diseñadas de manera que tuvieran similitudes estructurales con las planteadas en la primera actividad: por un lado, poseen el mismo formato gramatical que aquellas presentadas para la Ley de Coulomb. Por otro lado, el foco de las preguntas referidas a Gauss es similar a aquel planteado en Coulomb; es decir, las dos primeras, requieren que el lector determine si se puede calcular una magnitud –en este caso “un campo” y en el anterior, “una fuerza”– bajo ciertas condi-

ciones especificadas. La tercera, por su parte, requiere un análisis de la invariancia de una ley, la Ley de Gauss, de forma análoga a la pregunta c_1 referida a la invariancia de la Ley de Coulomb.

Sin embargo, en el diseño de esta investigación, se procuró que existiera una diferencia importante entre las dos actividades: mientras que en la primera el análisis de invariancia se realiza sobre una magnitud (fuerza) ya presentada en el curso de mecánica, en la segunda, el análisis de invariancia involucra una magnitud (campo Eléctrico) recién introducida en el contexto del electromagnetismo; esta última situación requiere llevar a cabo un tipo de análisis aprendido previamente en el contexto de la mecánica, dentro del contexto del electromagnetismo. Cabe remarcar que la forma tradicional en que se presenta el concepto de campo eléctrico en los cursos básicos de electromagnetismo es mediante una relación entre el campo y la fuerza: $\vec{F} = q\vec{E}$. En el contexto de la mecánica las fuerzas son invariantes frente a las transformaciones de Galileo. Si los estudiantes poseen una representación del concepto de "invariancia" simplificada, el nuevo concepto aprendido (\vec{E}) heredará las características del viejo (\vec{F}), independientemente del nuevo contexto en el que se define el campo eléctrico.

La respuesta a la pregunta a_2) está contenida explícitamente en el texto en el cual se menciona que la integral involucrada en la Ley de Gauss no depende del movimiento de cargas. En este caso, redactar la respuesta correcta implica sólo la transmisión pasiva del conocimiento adquirido mediante la lectura ya que el alumno no debe realizar ninguna inferencia a partir del texto leído ni tampoco debe recurrir a conceptos estudiados previamente. Así como en el caso de la pregunta a_1) para la Ley de Coulomb, un alumno que responda exclusivamente la pregunta a_2) de manera correcta sólo es capaz de transmitir pasivamente el conocimiento, según Spiro y otros (2006). El grupo de alumnos en esta situación posee un grado muy bajo de procesamiento de la información, característica que no sería deseable en alumnos avanzados.

La respuesta a la pregunta b_2) requiere de un nivel básico de procesamiento pero que no se limita simplemente a la transmisión pasiva del conocimiento. En este sentido, involucra la siguiente secuencia de dos razonamientos: i) las cargas que están en reposo en O, están en movimiento como vistas desde el sistema O'; ii) como la Ley de Gauss no depende del movimiento de las cargas entonces, un observador en O' puede calcular el campo utilizando la Ley de Gauss. Es, justamente, en la secuencia mencionada en donde los alumnos deben interrelacionar conceptos y procesos que ya fueron estudiados en mecánica, de manera de aplicarlos en el nuevo contexto, el electromagnetismo.

Así como en el caso de la respuesta a la pregunta c_1), para contestar correctamente a la pregunta c_2), es necesario interpretar que el análisis de invariancia de una ley Física implica comprobar si esa ley se cumple en sistemas inerciales de referencia en movimiento relativo. El proceso que se lleva a cabo para realizar el análisis de la invariancia de una ley, también se estudió en el contexto de la mecánica. Lograr aplicar este tipo de análisis para el caso de una ley del electromagnetismo implica, por parte de los estudiantes, relacionar áreas de conocimiento que podrían, ingenuamente, interpretarse como totalmente independientes. Como la Ley de Gauss vale independientemente del movimiento de las cargas, el análisis requerido se puede realizar de manera sencilla.

En la segunda actividad se propone analizar el campo eléctrico en el contexto de la Ley de Gauss. Esta ley involucra el cálculo de la integral sobre una superficie cerrada del campo eléctrico y la consideración de las cargas que encierra dicha superficie. En la aplicación práctica de dicha ley, se requiere de la elección de una superficie gaussiana y del conocimiento de la carga o de la distribución de cargas que genera el campo eléctrico. De los conceptos que intervienen en la Ley de Gauss, el único para el cual se ha establecido su invariancia es el de carga; en la presentación teórica inicial de este concepto en los cursos de electromagnetismo básico, se parte del hecho que la carga es una magnitud invariante frente a las Transformaciones de Galileo. Si los estudiantes poseen una representación de la invariancia simplificada de manera que la consideran un atributo independiente del contexto, es posible utilicen su conocimiento acerca de la invariancia de la carga en el análisis que se requiere en la Actividad 2.

También puede darse el caso de alumnos para los cuales la invariancia sea uno de los atributos heredados por el concepto de campo a partir del concepto de fuerza. Estos estudiantes contestarán afirmativamente a las preguntas de la Actividad 2, utilizando una justificación que, si bien es correcta en el contexto de mecánica, no es válida en electromagnetismo. Estos alumnos nos permitirán contestar a la pregunta 2 de la investigación.

IV. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS

Se han descrito dos casos estudiados en esta investigación: el correspondiente a la Ley de Coulomb y el de la Ley de Gauss. Para la presentación de los resultados en ambas situaciones, se eligió hacerlo mediante tablas en las cuales, se muestra el tipo de respuesta dada por cada alumno a cada uno de los incisos. Las respuestas correctas están indicadas en color gris mientras que las incorrectas se indican en color blanco. Este tipo de presentación fue seleccionado, por un lado, porque muestra visual y explícitamente la densidad de celdas coloreadas por columna, es decir, la densidad de respuestas correctas/incorrectas en cada inciso. Por otro lado, permite visualizar la relación entre las respuestas de un alumno a las distintas preguntas, cuestión de importancia para contestar las preguntas 2) y 3) de esta investigación. En la última fila de ambas tablas se explicita la cantidad total de respuestas correctas dadas por los alumnos para cada pregunta. La Tabla I muestra las respuestas de los alumnos a la Actividad 1 (Ley de Coulomb) mientras que la Tabla II presenta las respuestas de los estudiantes a la Actividad 2 (Ley de Gauss).

Primera Pregunta de Investigación: Seis de los 57 alumnos participantes no contestan ninguna de las preguntas de manera correcta y uno contesta de manera ambigua la primera pregunta y las siguientes bien. A simple vista resulta obvio cómo el número de alumnos que contestan adecuadamente las distintas instancias va decayendo a medida que la pregunta requiere de un procesamiento más complejo. 50 alumnos son capaces de contestar correctamente la primera pregunta. Sin embargo, a los efectos de esta investigación, la frecuencia de respuestas correctas a esta pregunta no es un dato tan importante como lo es su relación con el número de respuestas acertadas en las preguntas siguientes por esos mismos sujetos. Se nota, entonces que de esos 50, el 40% de los casos (20 alumnos) contesta de forma errónea la pregunta b_1) y luego la c_1), o sea, consideran que se puede aplicar la Ley de Coulomb en sistemas de referencia en los cuales las cargas se encuentran en movimiento y en base a ello usan las transformaciones de Galileo para analizar la invariancia de la ley en cuestión. Este grupo de alumnos posee indiscutiblemente un nivel alarmante del tipo de deficiencia catalogada por Spiro y otros (2006) como "transmisión pasiva de conocimiento" ya que no van más allá de respuestas asociadas con afirmaciones explícitas en el texto.

Segunda Pregunta de Investigación: Entre los casos de los alumnos participantes que no contestaron correctamente ninguna de las preguntas, las justificaciones a sus respuestas incluyen el cálculo de la fuerza en los dos sistemas de referencia y la afirmación de que la Ley de Coulomb o la fuerza asociada es invariante, lo que refleja una noción de invariancia tan simplificada y básica que resulta independiente del contexto: el alumno realiza cálculos o saca conclusiones sin analizar si sus suposiciones son válidas en el nuevo contexto en cuestión.

Tercera Pregunta de Investigación: Se puede observar que un 42% de aquellos 50 alumnos que contestaron bien la primera pregunta, contestan bien la segunda pero mal la tercera. Esta situación corresponde a estudiantes que tratan separadamente componentes de conocimiento interrelacionadas; es por ello que, a pesar de que ellos mismos afirmaron (en las preguntas a_1) y b_1)) que la Ley de Coulomb no se puede aplicar en el caso en que las cargas se estén moviendo relativamente respecto de un sistema de referencia, afirman que es posible realizar el análisis de la invariancia de la Ley de Coulomb. A primera vista, podría pensarse que el nivel de esta deficiencia manifestada en estos alumnos podría ser más leve que el de los descriptos en la primera pregunta de investigación ya que logran, por lo menos, identificar que existe el movimiento relativo de las cargas respecto de O' . Sin embargo, sigue siendo preocupante el grado de desconexión lógica entre sus respuestas.

De los 57 alumnos encuestados, 2 no realizaron esta actividad. A continuación se analizan las respuestas de los 55 alumnos restantes.

Como se explicó previamente, la peor situación en cuanto a la presencia de deficiencias de comprensión asociadas a las sobre-simplificaciones (Spiro y otros, 2006 y Spiro, 2006) corresponde a aquellos nueve casos que, en la tabla, aparecen como filas en blanco. Esas deficiencias impiden a los alumnos procesar correctamente la información que esta explícita en el texto y no poseen la comprensión lectora básica que debieran poseer los estudiantes avanzados. En detalle, estos nueve casos están compuestos por: un alumno que no contesta las preguntas (a_2) y (b_2), y contesta equivocadamente la pregunta (c_2); dos alumnos que no contestan la pregunta (a_2) y contestan mal las dos restantes y, seis de los 55 alumnos participantes que no contestan ninguna de estas preguntas de manera correcta.

Primera Pregunta de Investigación: Se recuerda que la primera pregunta de la investigación se refiere a si la comprensión lectora de estos estudiantes podría estar limitada a la transmisión pasiva del conocimiento. En esta segunda actividad, así como en la Actividad 1, también se observa en la tabla, cómo disminuye la cantidad de respuestas correctas a las distintas preguntas a medida que éstas requieren un procesamiento más complejo por parte del lector.

La justificación que se consideró como correcta para la primera pregunta (a_2) es que la Ley de Gauss es aplicable a cargas en movimiento, sin embargo, algunos estudiantes justificaron su respuesta usando un argumento del tipo: “se puede aplicar la ley de Gauss siempre que la gaussiana utilizada envuelva a las cargas en movimiento”. Si bien estas respuestas son restrictivas en cuanto a la aplicación de la Ley de Gauss, se consideraron correctas dado que en este tipo de argumento está implícito que la ley es aplicable para cargas en movimiento. Para distinguirlas de otros casos, estas respuestas se señalaron con un gris claro en la Tabla II. Una de las hipótesis que se puede plantear respecto a esta justificación es que los estudiantes tienen en mente que para aplicar la ley para cargas en movimiento, es fundamental la adecuada elección de la superficie gaussiana que se utiliza. El resaltar el papel que juega la superficie elegida, podría ser un resabio de la importancia que se le otorga, en los problemas prácticos, a la selección de una superficie adecuada que permita simplificar los cálculos. Pareciera que la mencionada elección condiciona la respuesta de los alumnos de manera que se resta importancia a las condiciones de aplicación de la ley, aun cuando están implícitas en la respuesta. Considerando como apropiadas estas justificaciones 46 de los 55 alumnos, fueron capaces de contestar correctamente la primera pregunta.

Se consideraron como justificaciones correctas (relleno gris de la Tabla II) a la pregunta (b_2) de la actividad 2, además de la descrita en III.B., a aquellas en las cuales los estudiantes plantean la ley de Gauss para dos observadores inerciales distintos. En este caso, se podría interpretar que estos estudiantes consideran, implícitamente, que la Ley de Gauss es independiente del movimiento de las cargas. En este tipo de respuestas se repite un patrón identificado en el párrafo anterior para el inciso a_2) de esta actividad: en el contexto del aprendizaje de la ley de Gauss lo que los alumnos priorizan es la posibilidad de realizar los cálculos de manera sencilla, en detrimento del análisis de las condiciones en las cuales las leyes se aplican. Estas respuestas se señalaron en la Tabla II con gris claro de manera de diferenciarlas de aquellas en las cuales los alumnos explícitamente analizan la aplicación de la Ley de Gauss en distintos sistemas inerciales.

De los 46 alumnos que respondieron correctamente a la pregunta (a_2), 17 responden en forma errónea (las preguntas b_2) y c_2). Se puede argumentar que estos 17 alumnos tienen una comprensión lectora limitada sólo a la transmisión pasiva del conocimiento, dado que logran interpretar el texto al contestar a_2) correctamente, pero no son capaces de procesar información previa para contestar las preguntas siguientes de la actividad.

En detalle, el análisis de las justificaciones de los 17 alumnos que no responden correctamente las respuestas b_2) y c_2) nos muestra que: 9 de ellos no contestan o no justifican el inciso b_2); entre los restantes existen justificaciones de dos tipos. Por un lado, algunos manifiestan que el campo es el mismo en los dos sistemas de referencia. Por otro lado, algunos estudiantes afirman que el campo eléctrico es invariante frente a las Transformaciones de Galileo y no hacen referencia a la validez de la ley de Gauss para cargas en movimiento, es decir a la validez de la ley para distintos observadores inerciales en movimiento relativo. Cabe destacar que el análisis de la invariancia del campo eléctrico frente a las transformaciones de Galileo no había sido presentado en el curso, hasta el momento del desarrollo de las actividades. En otras palabras, estos estudiantes utilizan como justificación, una afirmación no demostrada, sobre la invariancia del campo. Podría pensarse que están utilizando una frase que involucra la palabra invariancia pero vaciada de significado.

Segunda Pregunta de Investigación: Para el estudio de la representación conceptual de la invariancia que poseen los alumnos, fue necesario analizar la secuencia de las justificaciones a las tres preguntas dadas por cada alumno. Se detectó que la referencia en el texto a que “las cargas totales de un sistema no varían con el movimiento de los portadores” fue asociado por los alumnos con la invariancia de la carga frente a las Transformaciones de Galileo y esta conclusión fue utilizada a lo largo de toda la actividad. El referirse a la

invariancia de una magnitud para analizar las tres preguntas de esta actividad muestra que estos estudiantes tienen una representación conceptual de la invariancia simplificada. En el caso de la pregunta c_2) que se refiere a si se puede analizar la invariancia de la Ley de Gauss frente a las transformaciones de Galileo, las respuestas se caracterizaron por eludir el requerimiento de la pregunta. En este sentido; 21 alumnos desarrollan su respuesta como si la pregunta fuera acerca de si la Ley de Gauss es invariante; otros 13 estudiantes se centraron en determinar si el campo eléctrico es invariante frente a las transformaciones de Galileo. En el último caso, los estudiantes reducen la pregunta al análisis de la invariancia de una magnitud y no realizan el análisis de la invariancia de una ley. Las dos situaciones descritas, refuerzan la conclusión de que estos alumnos poseen una representación conceptual de la invariancia simplificada que se manifiesta a través de la mala interpretación o "modificación" de la pregunta realizada.

Tercera Pregunta de Investigación: En el párrafo anterior, se destacó que los estudiantes no realizaron explícitamente el análisis de cargas en movimiento, ni se centraron en el movimiento relativo de los sistemas de referencia. A pesar de que se consideraron correctas sus respuestas, esta situación merece un análisis más profundo. Estos alumnos no logran utilizar argumentos desarrollados en materias previas en el análisis requerido en la actividad; es decir, no hacen referencia al movimiento de las cargas en sus justificaciones y tampoco trabajan con los sistemas de referencia inerciales en movimiento relativo. Es decir, no logran aplicar lo aprendido en el contexto de la mecánica a un nuevo contexto, el del electromagnetismo. En otras palabras, no son capaces de interrelacionar distintas áreas de conocimiento.

V. COMENTARIOS FINALES

En este trabajo se ha mostrado evidencia concordante con lo señalado en la TFC de Spiro y otros (2006) respecto a los problemas que existen cuando se lleva a cabo un aprendizaje de nivel avanzado sobre un tema. En el caso de la invariancia, las deficiencias más notables corresponden a la transmisión pasiva del conocimiento, a la representación conceptual simplificada independiente del contexto y al tratamiento separado de componentes de conocimiento interrelacionadas. Una mala comprensión de este concepto inhibiría a los estudiantes para entender al electromagnetismo como inherentemente relativista.

Algunas de las propuestas que surgen a partir de este estudio son: profundizar el estudio del concepto de invariancia en mecánica, explicitando su importancia en los fundamentos de la teoría, realizar el análisis de invariancia para magnitudes y leyes, destacando y explicitando las diferencias entre estos análisis y la importancia de cada uno. También se podría extender el análisis de la invariancia a conceptos como el trabajo, la energía, la cantidad de movimiento, el momento angular, entre otros. De esta manera se ampliaría el número de temas de mecánica en los cuales se hace uso del concepto de invariancia, con la expectativa de favorecer estudios similares en otro contexto, como el del electromagnetismo.

Queda planteada la inquietud, a futuro, para estudiar la forma de paliar las falencias detectadas mediante el diseño de estrategias didácticas y material didáctico apropiado, acompañado de una evaluación de su eficiencia.

REFERENCIAS

- Alexander, P. A. (1998). The nature of disciplinary and domain learning: The knowledge, interest, and strategic dimensions of learning form a subject matter text. En C. R. Hynd (Ed), *Learning from text across conceptual domains*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Cartwright, K. (2009). The role of cognitive flexibility in reading comprehension. Past, present, and future. En S. E. Israel y G. G. Duffy (Eds.), *Handbook of Research of Reading Comprehension*, (115–139). NY: Routledge.
- Hoyos, E. y Pocoví, M. C. (2014). Explicitación de las transformaciones de Galileo: el eslabón perdido en los libros de Física Básica. *Latin American Journal Physics Education*, 8(4), 4506–1 – 4506–7.
- Kloo, D. y Perner, J. (2003). Training transfer between card sorting and false belief understanding: Helping children apply conflicting descriptions. *Child Development*, (74), 1823–1839.
- Lesh, R., Hoover, M., Hole, B., Kelly, A. E. y Post, T. (2000). Principles for developing Thought-Revealing Activities for students and Teachers. En A. E. Kelly y R. Lesh (Eds.), *Handbook of Research Design in Mathematics and Science Education*. NJ: LEA.

Purcell, E. M. (1988). *Berkeley Physics Course. Electricity and Magnetism*.

Spiro, R. J. (2006). Principled Pluralism for Adaptive Flexibility in Teaching and Learning to Read. En R. B. Ruddell y N. J. Unrau (Eds.), *Theoretical Models and Processes of Reading*. Quinta Edición. NJ: LEA.

Spiro, R. J., Coulson R. L., Feltovich P. J. y Anderson D. K. (2006). Cognitive Flexibility Theory: Advanced Knowledge Acquisition in Ill-Structured Domains. En R. B. Ruddell y N. J. Unrau (Eds.), *Theoretical Models and Processes of Reading*. Quinta Edición. NJ: LEA.

Wellington, J. y Osborne, J. (2001) *Lenguaje and Literacy in Science Education*. Philadelphia: Open University Press.