



Secuencias de enseñanza y aprendizaje basadas en resultados de investigación: propuesta de un marco teórico para el abordaje de la teoría especial de la relatividad

Teaching-learning sequences based on research results: proposal of a theoretical framework to address Special Relativity Theory

Irene Arriasecq

ECienTec, Facultad de Cs. Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. de Bs. As (CIC). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
irenearr@exa.unicen.edu.ar

Ileana M. Greca

Departamento de Didácticas Específicas, Universidad de Burgos, España
imgreca@ubu.es

Esther E Cayul

ECienTec, Facultad de Cs. Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Campus Universitario, Paraje Arroyo Seco, Tandil, Pcia. de Bs. As., Argentina. Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. de Bs. As. (CIC)
ecayul@exa.unicen.edu.ar

RESUMEN • En este trabajo se analiza el diseño de una secuencia de enseñanza aprendizaje (SEA) desde una perspectiva contextualizada para la enseñanza de la física en el nivel secundario que enfatiza la necesidad de encontrar coherencia entre las diversas perspectivas teóricas utilizadas para elaborarla. Esta propuesta pretende avanzar, en relación con otras propuestas didácticas existentes, proponiendo la articulación de aspectos epistemológicos, psicológicos y didácticos. Se ejemplifica la potencialidad del marco teórico con un análisis crítico del diseño, la implementación y la evaluación de una SEA para la teoría especial de la relatividad (TER).

PALABRAS CLAVE: secuencias de enseñanza aprendizaje; teoría especial de la relatividad; escuela secundaria.

ABSTRACT • This paper discusses the design of a general theoretical framework for teaching physics in secondary education that emphasizes the necessity to find consistency between the different theoretical perspectives used to develop teaching-learning sequences. This proposal aims to advance, in relation to other educational proposals, proposing the articulation of epistemological, psychological and learning aspects within a wider educational approach called Teaching for Understanding. It exemplifies the potential of the framework with a critical analysis of the design, implementation and evaluation of a teaching learning sequence for the Special Relativity Theory.

KEYWORDS: Teaching Learning sequences; Special Relativity Theory; High school level.

Recepción: marzo 2015 • Aceptación: septiembre 2016 • Publicación: marzo 2017

Arriasecq, I., Greca, I.M., Cayul, E. E., (2017) Secuencias de enseñanza y aprendizaje basadas en resultados de investigación: propuesta de un marco teórico para el abordaje de la teoría especial de la relatividad. *Enseñanza de las Ciencias*, 35.1, pp. 133-155

INTRODUCCIÓN

La enseñanza de la física moderna aparecía como problemática ya a comienzos de los ochenta. Gil *et al.* (1986), en un amplio estudio acerca de la introducción de la física moderna en la escuela secundaria, constataron que la enseñanza en dichos aspectos ha estado habitualmente relegada de los planes de estudio, siendo realizada de una forma poco estructurada, sin evidenciar las dificultades que originaron la crisis de la física clásica ni establecer diferencias entre ambas. Además, señalan abundantes errores conceptuales en textos y concluyen que los alumnos no logran una mínima comprensión de los conceptos e ideas de la física moderna, problemas similares a los detectados en otros países (Hewson, 1982; Villani y Pacca, 1987). Propugnan una aproximación que parta de la crisis de las concepciones clásicas y muestre cualitativamente las características del nuevo paradigma (Gil y Solbes, 1993), dado que la introducción de la física moderna en la escuela secundaria proporciona una visión más adecuada acerca de cómo se desarrolla la ciencia, evitando visiones lineales y acumulativas, y mejora la comprensión de la propia física clásica, al mostrar sus límites de validez y las diferencias entre ambas. Por ello, en este trabajo, nos ocupamos particularmente de la introducción de la teoría especial de la relatividad (TER).

Diversas investigaciones han mostrado que, siendo un tema que interesa a los alumnos, estos tienen grandes dificultades con sus conceptos centrales, como con la mayor parte de los conceptos físicos (por ejemplo, Aleman Berenger y Pérez Selles, 2000; Scherr *et al.*, 2001; Levrini y di Sessa, 2008). A esto se añade la escasa formación del profesorado de secundaria en este tema, lo que los lleva a utilizar como principal recurso el mismo libro de texto recomendado a sus alumnos (Arriasecq y Greca, 2003; Pérez y Solbes, 2003). Este punto es importante, ya que si los docentes en su formación no han tenido oportunidad de analizar en profundidad conceptos de la TER, difícilmente puedan aprenderlos en los libros que dicen consultar, que la abordan de forma muy superficial y con numerosos errores. Frente a esta realidad, la elaboración de una secuencia didáctica y el material didáctico correspondiente, que podrían utilizar tanto docentes como alumnos, es relevante para introducir la TER en la escuela secundaria. Con este objetivo se diseñó, implementó y evaluó una secuencia de enseñanza aprendizaje desde una perspectiva contextualizada (Arriasecq, 2008; Arriasecq y Greca, 2012).

Para ello, partimos de un análisis crítico de los elementos necesarios para presentar la TER en secundaria desde una perspectiva histórica y epistemológicamente contextualizada, así como de los resultados obtenidos sobre los manuales más utilizados en Argentina, que no incorporan ni resultados de la investigación en enseñanza de las ciencias, ni discusiones históricas y epistemológicas sobre el tema. Una parte importante del diseño de la propuesta consistió en la elaboración de un material escrito con formato de libro de texto (texto completo disponible en Arriasecq, 2008) que contempla las carencias observadas desde la perspectiva de nuestro marco teórico. Este material presenta una discusión de los aspectos conceptuales relevantes de la TER, a partir de las aportaciones de investigaciones en el área de enseñanza de la física, incluyendo tópicos específicos, artículos originales para su lectura y discusión crítica, así como también diversos tipos de actividades (resolución de problemas, ejercicios, elaboración de cuentos e historietas, etc.). En el diseño de la propuesta se escogieron conceptos relevantes del abordaje cinemático de la TER para comprender los cambios profundos que la teoría introduce en la propia física y fuera de ella. Cabe destacar que los conceptos de dinámica relativista no se abordaron porque los diseños curriculares no contemplan un desarrollo profundo de los conceptos de mecánica clásica necesarios para comprender el cambio que plantea la relatividad y, por otra parte, «masa relativista», «masa en reposo» y la relación entre masa y energía han sido tema de debate en el ámbito de la propia física hasta hace pocas décadas (Pérez Celada, 2003).

En este trabajo discutimos el marco teórico general que fue utilizado para el diseño de la secuencia. Este marco enfatiza que para el diseño de cualquier SEA es necesario utilizar y hacer explícitos los re-

ferentes epistemológicos, psicológicos y didácticos, que dan sentido a las opciones pedagógicas y a las actividades elegidas y su secuenciación, referentes que, lógicamente, deben ser claramente coherentes.

LAS SECUENCIAS DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE

Según Duit (2006), las tradiciones de investigación en la enseñanza de las ciencias en los últimos treinta años pueden clasificarse en dos grandes enfoques. Uno está orientado hacia la ciencia, donde investigadores en enseñanza de las ciencias cercanos a un campo disciplinar particular centran su atención en la práctica docente, poniendo mayor énfasis en los problemas de los contenidos científicos y en la elaboración de nuevas secuencias de enseñanza y aprendizaje. El otro enfoque está orientado hacia el alumno, con investigaciones que enfatizan las necesidades de los estudiantes en diversos ámbitos y la mejora de los entornos de aprendizaje, a veces desestimando los contenidos de las ciencias como materia de estudio.

Una mejoría en el aprendizaje de las ciencias parecería ser posible solo cuando existe un razonable equilibrio entre estas dos perspectivas. Esta visión, más holística, al intentar conjugar perspectivas parciales, es compartida por diversos investigadores (Fensham, 2001; Psillos, 2001; Duit, 2006) y se encuadra en lo que se ha denominado secuencias de enseñanza y aprendizaje (SEA). Su objetivo es el diseño y evaluación, en condiciones reales de aula, de SEAs sobre tópicos específicos, basadas en resultados de investigación sobre las concepciones de alumnos y profesores y contenidos científicos (Psillos y Méheut, 2001). Esta perspectiva focaliza la investigación en el «nivel micro» (estudio de una clase en un tema específico) o en el «nivel medio» (estudio de la secuencia de un único tópico), pero no en el «nivel macro» (estudio de todo un currículo durante uno o varios años) (Kariotoglou y Tselfes, 2000). De esta forma, se podría contribuir a que los docentes, no comprometidos con grupos específicos de investigación, tomen contacto con resultados aplicables a sus clases. Si bien el diseño de SEA sustentadas en resultados de las investigaciones comienza alrededor de 1980, estas secuencias se centran fundamentalmente en las concepciones y formas de razonar de los estudiantes, pero dejaban en segundo plano –o directamente no consideraban– otros dos elementos fundamentales de una situación de aprendizaje: el conocimiento que debe ser desarrollado y el papel de los docentes (Mehuet, 2005).

Hasta el momento se han desarrollado escasos marcos teóricos focalizados en los factores y procesos involucrados en el diseño de SEA como actividad de investigación (Méheut y Psillos, 2004). Aunque han aparecido en los últimos años varios trabajos que discuten ampliamente los resultados conseguidos por los estudiantes con las secuencias diseñadas, «muchos de sus presupuestos y decisiones implícitas y explícitas que afectan, en un grado considerable, al diseño y el desarrollo de los abordajes de enseñanza son menos tratados y hasta a veces no presentados claramente» (Lijnse *et al.*, 2004: 556). Algunos modelos propuestos son: *el abordaje de resolución de problemas* de Lijnse (2000), que tiene en consideración el conocimiento que va a ser enseñado en la secuencia junto con las ideas que a priori los estudiantes puedan tener sobre él; el sistema educacional, donde la secuencia es implementada y la motivación; *la reconstrucción educacional* (Kattmann *et al.*, 1995), en la *tradición pedagógica alemana*, que relaciona la estructura conceptual de la ciencia con el análisis del significado educacional del contenido y con estudios empíricos de los procesos de aprendizaje de los alumnos y de sus intereses en un marco constructivista; y la *ingeniería didáctica* (Artigue, 1988), que realiza un análisis a priori para definir los problemas que deberán abordar los alumnos, teniendo en cuenta la dimensión epistemológica del contenido, la dimensión psicocognitiva y la dimensión didáctica vinculada al funcionamiento de la institución escolar.

Para Buty *et al.* (2004) la construcción de SEA debe basarse en hipótesis claramente definidas sobre el conocimiento, el aprendizaje y la enseñanza, relacionados con los referentes teóricos epistemológico, psicológico y didáctico, sin perder de vista las instituciones en las que van a ser implementados. Estos

referentes limitan las diferentes elecciones que pueden ser realizadas en el diseño de una secuencia didáctica –elecciones que no son consecuencia directa de los referentes y deben ser explícitas–, pero, a su vez, llevan a buscar nuevos aspectos del conocimiento, nuevas organizaciones de las clases, etc., brindando indicadores para el desarrollo de la SEA. Sin embargo, una reciente revisión sobre intervenciones didácticas que usan estrategias histórica e epistemológicamente contextualizadas indica que uno de los aspectos negativos encontrados fue que pocos de los estudios justificaban las elecciones pedagógicas o las estrategias didácticas utilizadas (Teixeira *et al.*, 2012). Reflexiones en esta dirección fueron el punto de partida para el diseño de la SEA sobre la TER que presentamos.

MARCO TEÓRICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA SEA SOBRE LA TER

Para nosotros, la historia de la ciencia y la epistemología en el diseño de propuestas concretas de aula deben tener igual importancia que los marcos psicológicos y didácticos adoptados para desarrollarlas. Un enfoque contextualizado permite determinar obstáculos epistemológicos que guían la elección de los contenidos relevantes para ser enseñados, así como la discusión sobre la producción del conocimiento científico, el rol del contexto sociocultural del momento histórico en el que se produce y sus repercusiones, dentro y fuera del ámbito científico, para favorecer el acercamiento de los alumnos a la ciencia (Hodson, 1986; Kragh, 1989). Debe incluir, además, un fuerte énfasis conceptual de los temas abordados, indispensable para que las discusiones histórico-epistemológicas tengan sentido. Esta perspectiva favorece la consecución de algunos de los objetivos de las propuestas curriculares que plantean formar a ciudadanos alfabetizados científicamente que construyan, durante la etapa de escolarización, conocimientos de y sobre la ciencia.

Dado este enfoque general, describimos las elecciones específicas en los ejes epistemológico, psicológico y didáctico. Para nosotros, el *eje epistemológico* debe permitir la selección de las ideas científicas fundamentales que los alumnos han de aprender significativamente en relación con el tema científico en cuestión. Por su énfasis en los obstáculos epistemológicos que deben ser superados para la comprensión de una teoría científica, adoptamos los siguientes elementos de la epistemología de Bachelard (1991):

- El conocimiento científico avanza sobre sucesivas rectificaciones de las teorías precedentes.
- Solo se construye nuevo conocimiento a partir de uno anterior que es erróneo y que actúa como obstáculo epistemológico para el progreso científico, y esto puede estudiarse tanto en el desarrollo histórico del pensamiento científico como en la práctica de la educación.
- Los conceptos científicos deben ser comprendidos en síntesis psicológicas progresivas, que muestren cómo un concepto produce otro y se relaciona con los demás.

Este referente nos permitió desarrollar el análisis epistemológico del contenido de la TER (Arriasecq y Greca, 2002), delimitando los conceptos que debían ser aprendidos por los alumnos: espacio, tiempo y las nociones asociadas de sistema de referencia, observador, simultaneidad y medición, indispensables para la comprensión relativista del espacio-tiempo. Indicar que los alumnos deben aprender significativamente el concepto de tiempo, dentro de la noción de obstáculo de Bachelard, implica revisar explícitamente la noción de tiempo en la física clásica, a partir de la cual se desarrolla la noción relativista.

El *eje psicológico* incluye la elección de los principios sobre cómo los alumnos conceptualizan un contenido y lo aprenden en una situación de aula, así como el papel del profesor en dicho proceso. Para ello, realizamos una síntesis de diversas perspectivas –Vergnaud (1990), Ausubel *et al.* (1991) y Vygotsky (1987)– tomadas como marcos teóricos complementarios. Nuestras hipótesis fueron:

- El aprendizaje requiere comprender y esa comprensión se construye desde el interior estableciendo relaciones entre las informaciones nuevas y las que ya se poseían o entre los conocimientos ya adquiridos pero aislados que forman los esquemas mentales.
- La conceptualización es el eje de la cognición. Los procesos cognitivos y las respuestas del sujeto dependen de las situaciones a las que se enfrenta. Del dominio que progresivamente alcanza sobre ellas el sujeto conforma su conocimiento, siendo relevante el análisis conceptual de las situaciones para que los alumnos desarrollen esquemas propios.
- El sentido atribuido a la situación no está en la situación en sí misma, sino en la relación entre la situación y la representación que el sujeto haga de ella. Así, los conceptos adquieren significado a través de la interacción de los conceptos y teoremas en acción –los invariantes operatorios de Vergnaud– con numerosas y diversas situaciones. Esa interacción es la principal fuente de representaciones simbólicas, que constituyen el significante del concepto.
- Es indispensable que el alumno esté dispuesto a aprender para lograr un aprendizaje significativo y que cuente con los subsumidores adecuados, lo que depende de las situaciones planteadas.
- El profesor es el principal mediador en el ámbito escolar de la adquisición de significados contextualmente aceptados al dominar los instrumentos, signos y sistemas de signos diferentes a los del alumno. La enseñanza se concreta cuando alumno y profesor logran compartir significados. Así, el docente posee el rol imprescindible de mediador, facilitador y regulador de situaciones que le permitan al alumno evolucionar y/o romper con sus invariantes operatorios e internalizar los instrumentos, sistemas y signos del lenguaje social de la ciencia escolar.
- El aprendizaje significativo que se puede lograr en clase está muy condicionado por el tipo de interacciones que se propicien entre alumnos y docente y entre los propios alumnos, y que estimulen compartir significados contextualmente aceptados dentro de la zona de desarrollo proximal de los alumnos.
- Instrumentos facilitadores del aprendizaje significativo, como mapas conceptuales, pueden ayudar en la negociación de significados y reflejar la forma como cada alumno ha conceptualizado un contenido en un cierto momento.

Con la teoría de Vergnaud fueron analizadas las representaciones de los alumnos –en término de invariantes operatorios– de los conceptos seleccionados. Esta información, junto con los estudios sobre sus concepciones alternativas, permitió determinar sus dificultades (Arriasecq y Greca, 2006).

En el *eje didáctico* incluimos las elecciones sobre la secuenciación específica de la SEA, como la determinación de objetivos y actividades para conseguirlos. En relación con los objetivos, se usó la concepción de objetivo-obstáculo de Martinand (1986), quien propone la existencia de una relación dialéctica entre los objetivos de la enseñanza y los obstáculos que se interponen en la concreción de estos (de donde emerge el concepto de objetivo-obstáculo). Como Bachelard, Martinand insiste en que los obstáculos deben ser considerados de forma dinámica y estimulante. Así, los objetivos de la educación en ciencias no pueden definirse a priori y con independencia de las representaciones de los alumnos, sino que deben plantearse a partir de las transformaciones intelectuales que se producen al superar un determinado obstáculo. Por ello, es necesario analizar, de entre todos los obstáculos existentes o posibles para un determinado objeto de estudio, aquellos que parezcan más superables para un determinado nivel y contexto, siendo necesario identificar las representaciones de los alumnos (los teoremas-en-acto respecto del campo conceptual que se pretende abordar). De los teoremas-en-acto inferidos, que no se correspondían con los científicamente consensuados, fueron seleccionados los que se consideraron que podían transformarse en objetivos para la propuesta didáctica y que implican la superación de obstáculos por parte del alumno para realizar un aprendizaje significativo del tema TER. En el cuadro 1 aparece la relación entre los conceptos centrales escogidos a partir del análisis

epistemológico, las representaciones de los estudiantes (teoremas-en-acto) determinadas en el estudio previo –con estudiantes de un curso semejante a aquel en el que fue implementada la propuesta–, los obstáculos emergentes de esas representaciones y los objetivos que, a partir de esos obstáculos, consideramos relevantes para que los alumnos aprendan significativamente la TER. Un elemento central en el diseño de SEA es su evaluación, siendo necesario establecer los resultados esperados. En nuestro caso, las predicciones están relacionadas con la superación de los objetivos propuestos. O sea, una vez implementada la propuesta en situación real de aula estudiamos en qué medida los objetivos que hemos definido fueron alcanzados por los alumnos.

En este eje también son determinados el tipo y la organización de las actividades didácticas. El enfoque global contextualizado, las hipótesis con relación a como los alumnos construyen la conceptualización, el rol del profesor y los objetivos escogidos determinaron el tipo y secuenciación de actividades que describiremos en la próxima sesión.

Cuadro 1.

Relación entre los conceptos centrales escogidos, las representaciones de los estudiantes (teoremas-en-acto), los obstáculos que a partir de esas representaciones fueron inferidos y los objetivos que, a partir de esos obstáculos, consideramos relevantes para un aprendizaje significativo de la TER para el grupo de alumnos considerado.

CONCEPTOS	INVARIANTES OPERATORIOS	OBSTÁCULOS	OBJETIVOS
Tiempo	El concepto de tiempo es difícil de definir.	<ul style="list-style-type: none"> - Los alumnos asumen que el concepto de tiempo que se utiliza en el ámbito científico no difiere del utilizado en el lenguaje cotidiano. - Cuando los alumnos se refieren al concepto de tiempo, supuestamente desde el contexto de la ciencia, incurren en errores tales como confundir magnitudes con unidades y no establecen claramente las relaciones entre estos conceptos y el significado del proceso de medición de la magnitud tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Analizar el concepto de tiempo desde diversos enfoques: filosófico, científico y psicológico. - Reconocer las diversas posibilidades de representación gráfica de la magnitud tiempo. - Identificar los conceptos involucrados en el proceso de medición del tiempo. - Interpretar el concepto de tiempo en el campo conceptual de la TER estableciendo las diferencias con la mecánica clásica.
	El tiempo es una unidad.		
	Se representa al tiempo con un reloj.		
	El tiempo se puede representar como la variable independiente en un sistema de ejes coordenados. El tiempo no se puede representar.		
	No es posible, actualmente, viajar en el tiempo por cuestiones tecnológicas. No es posible viajar en el tiempo físicamente.		
Espacio	El espacio no se puede representar	Las representaciones de los alumnos respecto del espacio coinciden con el modelo platónico.	<ul style="list-style-type: none"> - Reelaborar el modelo construido de espacio, adecuándolo al requerido en la mecánica clásica. - Interpretar el concepto de espacio en el campo conceptual de la TER estableciendo las diferencias con la mecánica clásica.
	El espacio es el lugar que ocupan los cuerpos y los huecos que quedan entre ellos. El observador puede ser un individuo o un instrumento que registra datos detalladamente.		
Observador		Los alumnos vinculan la idea de observador con la de una persona que "observa", otorgándole el sentido de "ver" o "mirar".	Redefinir la noción de observador adecuándola a la TER.
Simultaneidad	Dos sucesos son simultáneos cuando ocurren al mismo tiempo y en el mismo lugar.	Los alumnos consideran que la simultaneidad de eventos sólo puede ocurrir cuando éstos acontecen en un mismo lugar.	<ul style="list-style-type: none"> - Analizar las diversas posibilidades de eventos simultáneos en mecánica clásica. - Analizar las diversas posibilidades de eventos simultáneos en la TER.
Medición	Lo más importante en el proceso de medición es el instrumento.	Para el alumno no es relevante el rol del observador en el proceso de medición.	<ul style="list-style-type: none"> - Distinguir, desde el punto de vista físico, que en el contexto de la TER "ver" no es lo mismo que medir. - Analizar la relación entre proceso de medición, observador e instrumentos.
Sistemas de Referencia	Para resolver problemas de Física no es necesario tener en cuenta el sistema de referencia.	Ante situaciones problemáticas concretas que requieren del concepto de sistema de referencia para su resolución, los alumnos no lo utilizan.	Resolver diferentes situaciones problemáticas que requieran ser analizadas desde diferentes sistemas de referencia.
Postulado	Los postulados son creencias que pueden convertirse en teorías científicas.	Los alumnos no otorgan el significado epistemológicamente correcto al concepto de postulado.	Analizar el rol de los postulados en la TER.
Teoría científica	Las teorías científicas explican fenómenos.	Los alumnos manifiestan una visión restringida respecto de las teorías científicas.	Comprender el estatus actual de la TER.

DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

La metodología utilizada tanto en las etapas de investigación previas como en la implementación de la SEA fue cualitativa (Goetz y LeCompte, 1988). Las fases de la investigación fueron:

- Análisis histórico y epistemológico de cuestiones relevantes dentro de la TER (Arriasecq y Greca, 2002; Arriasecq y Greca, 2007).
- Indagación de las dificultades de los docentes de secundaria para abordar la TER en el aula (Arriasecq y Greca, 2003 y 2004).
- Análisis de los libros de texto usados por docentes y alumnos (Arriasecq y Greca, 2003; Arriasecq y Greca, 2007).
- Análisis de las dificultades de los estudiantes para conceptualizar los aspectos más relevantes de la TER (Arriasecq *et al.*, 2004; Arriasecq y Greca, 2004 y 2006).
- Desarrollo de la SEA para el abordaje de la TER (Arriasecq, 2008), coherente con el marco teórico antes descrito.
- Implementación y evaluación de la SEA desarrollada (Arriasecq, 2008).
- Reelaboración de algunos aspectos de la SEA y profundización en el marco teórico subyacente (Arriasecq y Greca, 2010; Cayul y Arriasecq, 2014 y 2015).

La SEA consta de cinco etapas. En la primera se analizan cuestiones histórico-epistemológicas referidas a la noción de ciencia, características del trabajo científico, evolución de las ideas en ciencia, influencias del contexto social, histórico y cultural en el surgimiento de las teorías científicas y validación de estas. En la segunda etapa se realiza una profunda revisión de los conceptos de la mecánica clásica que son necesarios para interpretar la TER, así como aquellos que se modifican sustancialmente a partir de ella y que constituyen los obstáculos epistemológicos para la adquisición de los nuevos conceptos. En la tercera se abordan los conceptos de electromagnetismo que entran en conflicto con la mecánica clásica y que son retomados por Einstein. En la cuarta etapa se discuten los aspectos fundamentales de la TER, partiendo de la introducción del artículo original de 1905 y usando diversas situaciones para que el alumno pueda construir nuevos esquemas mentales al enfrentarse con situaciones que requieran la reformulación de conceptos clásicos. En la quinta parte se pretende que los alumnos conozcan algunos aspectos de la vida de Albert Einstein como hombre, que trascienden el «mito» (Arriasecq y Adúriz Bravo, 2006).

Cada tópico fue redactado a partir de la selección de contenidos realizada en correspondencia con los objetivos que se pretendían alcanzar pero teniendo en cuenta la edad de los alumnos a los que se dirige, sin por ello dejar de lado la calidad científica del material. También, a partir de las hipótesis del marco teórico, fueron diseñadas, secuenciadas y evaluadas las actividades que complementan los desarrollos conceptuales, así como la selección de lecturas que realizarían los alumnos. En algunos casos, estas lecturas son textos originales que pueden ser trabajados en clase con la ayuda del docente y en otros, son textos elaborados por especialistas en historia de la física donde se abordan tanto cuestiones conceptuales como otras que trascienden la física como disciplina y que plantean debates en torno a las repercusiones de la TER en campos distantes de la propia ciencia, como el arte. Además de las lecturas, son propuestas diversas situaciones para auxiliar a los alumnos en el proceso de conceptualización de los aspectos centrales de la TER, situaciones que les permitirían revisar sus esquemas mentales. Estas actividades incluyen problemas de resolución cualitativa y/o cuantitativa y las famosas paradojas, secuenciadas en orden ascendente de dificultad. Los conceptos claves de la TER son retomados, en diferentes etapas de la SEA, usando diversas representaciones (lingüística, algebraica y gráfica). Otras actividades propuestas son la realización de cuentos, historietas y mapas conceptuales. Esta SEA se

plasmó en un material escrito que tiene la estructura de un libro de texto que puede ser usado por los profesores, con cinco capítulos y que sigue la secuencia antes descrita.

METODOLOGÍA

La SEA fue implementada en dos oportunidades, con alumnos del último año de la escuela secundaria en la ciudad de Tandil (Argentina) y también fue desarrollada en un curso de formación de profesores.

En la primera implementación (2007) se trabajó con un grupo de veintisiete alumnas, en dos clases semanales de una hora. Su profesora contaba con una experiencia docente de diez años. Había estudiado conceptos de la TER en una unidad de la materia Física Moderna en su formación y nunca había dado esos contenidos. A pesar de manifestar en repetidas ocasiones su inseguridad en relación con el tema, se involucró totalmente en implementar la SEA, evaluando positivamente la propuesta al finalizarla.

Como investigadores participamos realizando la doble tarea de trabajar junto al docente, analizar y reorientar la investigación. El trabajo de campo demandó la participación intensiva y durante largos períodos del investigador en el escenario estudiado, el registro cuidadoso de lo que acontecía mediante notas de campo y evidencia documental como fotocopias de las actividades realizadas por los alumnos y grabaciones del trabajo grupal en diversas clases.

En el transcurso de las clases las alumnas realizaron las diversas actividades que se encuentran en la propuesta didáctica como lecturas y análisis de textos, debates, historietas (anexo 1), mapas conceptuales, ejercicios y problemas (estas actividades se pueden consultar en los capítulos 8 y 9 de Arriasecq, 2008).

Luego de esta instancia de implementación, la SEA fue revisada, modificada y nuevamente implementada en otros cursos de secundaria (2013). En la revisión se observó que las ideas centrales de cada uno de los ejes parecen haber sido adecuadas, así como los objetivos planteados y gran parte de las actividades escogidas para alcanzarlos. Sin embargo, en la primera implementación, los alumnos evidenciaron dificultades para la comprensión del concepto espacio-tiempo, que envuelve los conceptos de simultaneidad, tiempo propio e impropio, longitud propia e impropia. Aunque fueron planteadas diversas situaciones que requerían el análisis y/o construcción de diagramas de Minkowski para explorar estas ideas, trabajar con estos diagramas con «lápiz y papel» es bastante complicado y demanda mucho tiempo en las construcciones. Por ello, en la segunda implementación, hemos trabajado los diagramas de Minkowski con applets, que facilitan la conceptualización mediante la realización de estimaciones cualitativas y cuantitativas.

La otra modificación está relacionada con la forma en que los profesores pueden evaluar, de forma coherente con la propuesta, la superación de los objetivos. Nuestra evaluación de la primera implementación se realizó en el contexto de una investigación, con demandas importantes de tiempo, que los profesores no tienen. Por ello era necesario establecer los resultados esperados de una forma clara y sencilla de aplicar para los profesores. Para ello usamos la perspectiva de la enseñanza para la comprensión (Wiske, 1999), coherente con los ejes centrales de nuestra SEA. En ella, la comprensión es la capacidad de usar lo que uno sabe cuando actúa en el mundo, extendiendo, sintetizando y aplicando ese conocimiento de formas creativas y novedosas. Existen cuatro dimensiones fundamentales que articulan el alcance de la comprensión: conocimiento, métodos, propósitos y formas de expresión. Para el desarrollo de situaciones de enseñanza, quienes las diseñan deben responder, de forma explícita, dentro de sus visiones o abordajes, a las siguientes preguntas: ¿qué tópicos vale la pena comprender?, ¿qué deben comprender los alumnos sobre esos tópicos?, ¿cómo se puede propiciar la comprensión? y ¿cómo es posible averiguar qué es lo que comprenden los alumnos?

En nuestra SEA, la primera pregunta ha sido respondida a partir del eje epistemológico y del enfoque contextualizado adoptado. La respuesta a la segunda pregunta implica clarificar lo que deben comprender los alumnos formulando metas de comprensión explícitas, en nuestro caso determinadas a partir de los objetivos obstáculos. Por último, es posible analizar lo que los alumnos han comprendido realizando una evaluación diagnóstica continua de sus desempeños, con tareas como explicar, interpretar, analizar, relacionar, comparar y hacer analogías, que se distinguen de otras actividades comunes que se realizan en el aula.

Las actividades son desempeños de comprensión solo si desarrollan y demuestran claramente que los alumnos han alcanzado metas de comprensión importantes. Estos desempeños esperados serán lo que los profesores podrán observar y serán indicativos de la superación de los objetivos. En el cuadro 2 se presentan las metas de aprendizaje propuestas para la TER y aquellas que son necesarias que el alumno haya alcanzado previamente al abordaje de la TER.

Cuadro 2.
Metas y desempeños de aprendizajes

<i>Metas de aprendizaje</i>	<i>Desempeños de aprendizaje</i>
Discriminar entre los conceptos de distancia recorrida y posición.	Decidir que conceptos consideran necesarios para describir el movimiento de un objeto.
Establecer relaciones significativas entre los conceptos de observador, sistema de referencia, proceso de medición e instrumentos.	Realizar una síntesis personal de conceptos fundamentales para la comprensión y la resolución de problemas de Mecánica Clásica como son: la invariancia y la independencia del espacio y del tiempo, la imposibilidad de definir un sistema de referencia absoluto y la noción de simultaneidad y expresarla mediante un mapa conceptual.
Analizar las nociones respecto de los conceptos de espacio y de tiempo que los alumnos han construido y compararlas con los grandes planteamientos que se han dado a lo largo de la Historia de la Ciencia respecto a estos conceptos.	Elaborar un mapa conceptual con la interpretación de los fenómenos vinculados con el electromagnetismo para los cuales existía una teoría que los explicara y aquellos que presentaban problemas para las teorías de la época.
Reconocer la necesidad de establecer respecto de qué sistema de referencia se afirma que algo se mueve cuando se analiza un movimiento.	Interpretar un dibujo que representa un movimiento desde la perspectiva de dos observadores distintos.
Reconocer la necesidad de utilizar las ecuaciones de transformación cuando se debe resolver un problema que requiere información de diferentes sistemas de referencia.	Analizar la invariancia de conceptos como «espacio» y «tiempo» en diferentes sistemas de referencia, en reposo relativo. Distinguir los fenómenos que requieren una interpretación relativista de aquellos que se explican a partir de teorías clásicas. Escoger sistemas de referencia adecuados para resolver situaciones problemáticas referidas a la TER.
Identificar conceptos relevantes para efectuar mediciones, fundamentalmente de espacio y de tiempo, desde distintos sistemas de referencia.	Realizar una lectura crítica de la introducción del artículo publicado por Einstein en 1905 en la prestigiosa revista alemana <i>Annalen der Physik</i> con el título: «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento».
Discutir nociones como «sincronización» y «simultaneidad» y vincularlas con la necesidad de que los observadores tengan los medios adecuados para comunicarse.	Explicitar de diversas maneras cómo interpretan, a partir de las lecturas y discusiones con los pares y la docente, los dos postulados de la TER y compararlos con otros conceptos analizados en Mecánica newtoniana, como el de sistema de referencia y con cuestiones aún no resueltas como el «problema del éter».

<i>Metas de aprendizaje</i>	<i>Desempeños de aprendizaje</i>
Asumir que la comunicación demanda otro tiempo, además del propio del evento en cuestión que se intente medir.	Resolver diferentes situaciones problemáticas que requieran ser analizadas desde diferentes sistemas de referencia.
Analizar la comprensión de conceptos fundamentales para la resolución de problemas en Mecánica Clásica como son: la invariancia y la independencia del espacio y del tiempo, la imposibilidad de definir un sistema de referencia absoluto y la noción de simultaneidad.	Resolver ejercicios, donde deben realizar cálculos numéricos con la intención de analizar órdenes de magnitud y campo de validez de la TER.
Interpretar la incompatibilidad del Programa Mecanicista con algunos aspectos de la Teoría Electromagnética de Maxwell.	Utilizar diagramas de Minkowsky para demostrar que, de acuerdo con la TER, es posible que los observadores situados en diferentes sistemas de referencia inerciales no se pongan de acuerdo en establecer cuándo y dónde suceden determinados eventos, pero nunca pueden estar en desacuerdo respecto de si existe o no una relación causal entre los mismos.
Discutir el rol de la experiencia de Michelson en el surgimiento de la TER.	Expresar los significados que han construido de los tópicos de la TER mediante un recurso alternativo como es la elaboración de un cuento o historieta.
Analizar los postulados de la TER y sus consecuencias para los conceptos clásicos: «evento», «observador», «sistema de referencia», «medición», «simultaneidad», «tiempo» y «espacio». Utilizar los diagramas de Minkowsky para representar e interpretar el concepto de espacio-tiempo.	Aplicar las transformaciones de Lorentz para resolver problemas relativistas. Calcular la longitud de un objeto en un sistema de referencia que se mueve a una velocidad cercana a la de la luz y compararla con su longitud propia. Calcular intervalos de tiempo de eventos en dos sistemas inerciales. Resolver situaciones problemáticas que incluyan contracción de longitudes y dilatación del tiempo.
Reflexionar, más allá de los aspectos conceptuales, acerca de cuestiones que contextualizan histórica y epistemológicamente a la TER. Entre ellas: – Reflexionar acerca de la génesis de la teoría. – Conocer las contrastaciones empíricas a las que fue sometida. – Analizar las implicaciones de la TER en la vida cotidiana, el rol de la comunidad científica en el desarrollo de una teoría y las influencias de la producción científica en la sociedad.	Comprender el rol de la experiencia de Michelson en el surgimiento de la TER. Valorar las comprobaciones experimentales de la TER desde el punto de vista epistemológico. Debatir respecto de posibles consecuencias de aplicaciones tecnológicas derivadas de la TER. Valorar las repercusiones de la TER fuera del propio ámbito de la Física, como en el arte y la filosofía.
Construir una caracterización robusta de Albert Einstein, histórica y epistemológicamente fundamentada, que trascienda la visión reduccionista y estereotipada clásica con más componentes de carácter «humano», que no suelen tenerse en cuenta en las aulas ni en los medios de comunicación masivos.	Debatir, a partir de las lecturas realizadas, sobre diferentes aspectos de la vida de A. Einstein, tanto en lo personal como su participación en cuestiones políticas y de repercusión para la sociedad.

Esta nueva versión de la SEA, con el uso de applets y de metas y desempeños de aprendizaje, fue puesta en práctica durante el año 2013, en un contexto escolar similar a la primera implementación, en dos grupos del último curso (N = 65 alumnos), de una escuela secundaria pública de Tandil (Cayul y Arriasecq, 2014). Las clases eran semanales, con una duración de dos horas continuadas. La docente que la implementó decidió utilizar gran parte del año para desarrollarla, considerando que, al hacerlo, abordaba también los conceptos de la física clásica del curso. Por ello, fueron incrementadas las actividades desarrolladas por los alumnos siguiendo el espíritu general de la propuesta.

Así, por ejemplo, la cuarta etapa de la secuencia denominada tópicos de la teoría especial de la relatividad: los diagramas de Minkowski y sus aplicaciones (Cayul y Arriasecq, 2015), se desarrolló en aproximadamente en un mes y medio de clases. En esta etapa de la SEA se realizaron debates, entre alumnos-alumnos y alumnos-docente, referidos a la simultaneidad en la mecánica clásica y la simultaneidad en la TER; se construyeron diagramas de Minkowski en lápiz y papel para establecer la simultaneidad de eventos; se realizaron cálculos para determinar el tiempo y la longitud en sistemas propios e impropios y se construyeron y analizaron «conos de luz» para representar sucesos en diferentes tiempos (presente, pasado, futuro y no permitidos). Se emplearon animaciones y simulaciones, usando el software Modellus, para representar fenómenos que involucraban la simultaneidad en la TER (Arriasecq, Cayul y Seoane, 2013). En el anexo 2 aparecen ejemplos de estas actividades realizadas en las clases y en el trabajo integrador por los alumnos.

Los desempeños de comprensión fueron evaluados a través de la construcción de mapas conceptuales, debates y realización de actividades teóricas y prácticas. La evaluación diagnóstica continua permitió identificar las dificultades que los alumnos tenían en comprender y relacionar los diversos conceptos físicos desarrollados en la SEA. Esta evaluación, de tareas individuales y grupales, desempeñó diversas funciones: diagnóstica, de seguimiento y de acreditación para obtener las notas parciales e integradoras que solicitaba la institución educativa. Para evaluar los desempeños, se observó la presencia o ausencia de determinados indicadores de cada categoría en todas las actividades propuestas. Posteriormente, se calculó el porcentaje de «presencia» del indicador en las actividades de cada alumno, en relación con el total que debería haber aparecido, si el desempeño hubiese sido completo. Las categorías se construyeron considerando las metas de comprensión planteadas al inicio de cada etapa de la SEA. Un ejemplo de esta evaluación aparece en el anexo 3.

Como se mencionó anteriormente, la SEA también fue desarrollada en un curso de formación de profesores (REF, 2015). Asistieron a este curso doce profesores de diferentes provincias de Argentina. Se les propuso realizar las mismas actividades que realizaron los alumnos y que se encuentran en la propuesta didáctica: lecturas del material, actividades utilizando simulaciones y debates respecto a los contenidos y las actividades que contiene la propuesta.

RESULTADOS DE LAS IMPLEMENTACIONES DE LA SEA

Los resultados obtenidos en la primera implementación (para una discusión detallada véanse Arriasecq, 2008; Arriasecq y Greca, 2012) muestran que la mayoría de los alumnos consiguieron superar los objetivos relacionados con la mecánica clásica, como interpretar el tiempo y el espacio de manera correcta y analizarlo desde el enfoque filosófico y científico, considerar la necesidad de establecer un sistema de referencia para resolver problemas que involucren la noción de movimiento y analizar la relación estrecha entre observador y proceso de medición. En cuanto a los conceptos relacionados con la TER, las alumnas pudieron reconocer el concepto de contracción de longitudes, pero no habrían construido teoremas-en-acción adecuados para resolver situaciones problemas al respecto. Respecto a los objetivos relacionados con aspectos históricos e epistemológicos, la totalidad de las alumnas demostraron comprender que la TER no es una mera especulación teórica, sino una teoría con suficiente comprobación experimental, siendo capaces de explicar aplicaciones tecnológicas de esta, como el GPS, y parecen haber comprendido que no es la creación aislada de un genio, sino que emerge dentro de un contexto en el que las aportaciones de otros científicos fueron importantes.

En relación con la segunda implementación, los resultados obtenidos (Cayul y Arriasecq, 2014) muestran que fueron conseguidas gran parte de las metas de aprendizaje, siendo las más difíciles de alcanzar algunas relacionadas con la mecánica clásica (diferenciación de los conceptos de trayectoria,

distancia recorrida y posición; análisis de los conceptos de espacio y tiempo; simultaneidad de los eventos; uso de ecuaciones de transformación en sistemas de referencia inerciales e interpretación de la incompatibilidad de la mecánica clásica con aspectos del electromagnetismo) y otras con la TER (determinación de la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes ocurrida en sistemas propios e impropios; aplicación de las ecuaciones de transformación de Lorentz al cálculo de velocidad en diferentes sistemas de referencias y realización de cálculos para determinar la simultaneidad de eventos). Por otra parte, el uso de los applets permitió que los alumnos comprendiesen y usasen de forma significativa los diagramas de Minkowski para representar sucesos en el espacio-tiempo.

En cuanto a los desempeños de comprensión, la mayor parte de los alumnos alcanzó desempeños buenos o muy buenos en la mayoría de las actividades propuestas. En particular, destacan los desempeños alcanzados en la comprensión de los sistemas de referencias inerciales y la interpretación de eventos desde la perspectiva de observadores diferentes; la interpretación del experimento de Michelson-Morley; la resolución de actividades que involucraban interpretar y relacionar los postulados de la TER; la resolución gráfica, utilizando diagramas de Minkowski, para establecer la simultaneidad de eventos en diferentes sistemas de referencia inerciales así como la comprensión de las diferentes comprobaciones experimentales, aplicaciones y repercusiones de la TER y los aspectos más relevantes de la vida personal y científica de Einstein. Por otra parte, los desempeños de comprensión que presentaron mayor dificultad estuvieron relacionados con la selección de sistemas de coordenadas adecuados; utilización de ecuaciones de transformación para representar el movimiento desde diferentes sistemas de referencias; resolución de problemas usando ecuaciones de transformación entre SR; utilización de la transformada de Lorentz para calcular velocidades de objetos en diferentes sistemas de referencia y la resolución de manera algebraica de problemas que involucran establecer la simultaneidad de sucesos en diferentes SRI.

Los resultados obtenidos en el curso para profesores, a través de una encuesta y debates realizados en los encuentros llevados a cabo, muestran que los docentes consideran que el material propuesto es relevante para abordar esta teoría en la escuela secundaria: presenta una visión más global de la TER, de sus conceptos centrales, de sus relaciones con los conceptos básicos, así como los aspectos históricos y epistemológicos involucrados en el surgimiento de esta. El uso de applets para abordar la simultaneidad, la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes les resultó beneficioso para lograr una mejor comprensión de estos conceptos.

CONCLUSIONES

En este artículo hemos propuesto un marco teórico que enfatiza la necesidad de encontrar coherencia entre los referentes teóricos (psicológico, epistemológico y didáctico) utilizados para el diseño de una SEA. La propuesta incluye la revisión de los principios o actividades de esta, después de sucesivas aplicaciones, que sirven para mejorar el material con el objetivo de que docentes y alumnos puedan utilizarlo. A modo de ejemplo, se describió y analizó la construcción de una SEA para la TER, contenido central en la física del último año del nivel secundario y para el cual los docentes en activo no han tenido la formación de grado adecuada ni tienen a su disposición libros de texto apropiados para suplir esa carencia.

La evaluación de las implementaciones de la propuesta didáctica utilizando el material desarrollado nos permite afirmar que, a pesar de diversas dificultades e imprevistos que surgieron durante el proceso de enseñanza,¹ los resultados logrados por los grupos de alumnos con los que se trabajó, en términos de

1. Los alumnos que cursan el último año de la escuela secundaria realizan diversas actividades extraescolares tales como: participación en ferias de ciencias, olimpiadas de diversas disciplinas, actividades deportivas, que dificultan estimar el tiempo que demanda implementar la SEA.

- ARRIASSECQ, I. y ADÚRIZ-BRAVO, A. (2006). Albert Einstein: un físico genial... ¿y qué más? *Memorias del IV Congreso Iberoamericano de Educación Científica*, Lima, Perú.
- ARRIASSECQ, I., CAYUL, E. y SEOANE, M. (2013). Incorporación de animaciones y simulaciones en una Secuencia de Enseñanza-Aprendizaje para la Teoría Especial de la Relatividad. *Memorias del 1er workshop Enseñanza de la Física en Argentina: Los desafíos de la investigación educativa y de la formación docente*. ECienTec-Facultad de Ciencias Exactas, UNICEN.
- ARRIASSECQ, I. y GRECA, I.M. (2002). Algunas consideraciones históricas, epistemológicas y didácticas para el abordaje de la Teoría Especial de la Relatividad en el nivel medio y polimodal. *Ciência & Educação*, (8) 1, pp. 55-69.
<https://doi.org/10.1590/S1516-73132002000100005>
- (2003). Enseñanza de la Teoría Especial de la Relatividad en el ciclo polimodal: dificultades manifestadas por los docentes y textos de uso habitual. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, (3) 2. ISSN: 1579-1513. Disponible en línea: <http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen3/REEC_3_2_7.pdf>.
- (2004). Análisis de algunos aspectos de la enseñanza de la Teoría Especial de la Relatividad en el nivel polimodal argentino a partir de un estudio de caso. *II Encuentro Iberoamericano sobre Investigación Básica en Educación en Ciencias*, 21 a 24 de septiembre de 2004, Universidad de Burgos, España.
- (2006). Introducción de la Teoría de la Relatividad Especial en el nivel medio /polimodal de enseñanza: identificación de Teoremas-en-Acto y determinación de objetivos-obstáculo. *Revista Investigações em Ensino de Ciências* (11), 2. Disponible en línea: <<http://www.if.ufrgs.br/ienci>>.
- (2007). Approaches to the Teaching of Special Relativity Theory in High School and University Textbooks of Argentina. *Science & Education*, (16) 1, pp. 65-86.
<https://doi.org/10.1007/s11191-005-5387-9>
- (2012). A Teaching-Learning Sequence for the Special Relativity Theory at High School Level Historically and Epistemologically Contextualized. *Science & Education*, 21(6), pp. 827-851.
<https://doi.org/10.1007/s11191-010-9231-5>
- ARRIASSECQ, I., GRECA, I.M. y STIPCICH, S. (2004). Dificultades para la conceptualización de algunos tópicos de la Teoría Especial de la Relatividad en alumnos de nivel polimodal. *7.º Simposio de Investigación en Educación en Física*. Santa Rosa, La Pampa, 7 al 9 de octubre de 2004.
- ARTIGUE, M. (1988). Ingenierie Didactique. *Recherche en didactique des mathematiques*, 9(3), pp. 281-308.
- AUSUBEL, D., NOVAK, J. y HANESIAN, H. (1991). *Psicología Educativa, un punto de vista cognoscitivo*. México: Ed. Trillas.
- BACHELARD, G. (1991). *La formación del espíritu científico*. Siglo XXI.
- BUTY *et al.* (2004). Learning hypotheses and an associated tool to design and to analyse teaching-learning sequences. *International Journal of Science Education*, (26) 5, pp. 579-604.
<https://doi.org/10.1080/09500690310001614735>
- CAYUL, E. y ARRIASSECQ, I. (2014). Implementación de una secuencia de enseñanza y aprendizaje para abordar la Teoría Especial de la Relatividad en la escuela secundaria en el marco de la Enseñanza para la Comprensión. *Revista de Enseñanza de la Física* (26), pp. 53-64.
- CAYUL, E. y ARRIASSECQ, I. (2015). Utilización de los Diagramas de Minkowski para la enseñanza de la TER en la escuela secundaria. *Revista Enseñanza de la Física* (27), pp. 323-331. ISSN 0326-7091(papel). ISSN 2469- 052X (en línea).
- DUIT, R. (2006). La investigación sobre enseñanza de las ciencias. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 11(30), pp. 741-770.

- FENSHAM, P. (2001). Science content as problematic-issues for research. In H. Behrendt *et al.* (eds.). *Research in Science Education. Past, Present and Future*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 27-41.
- GIL, D., SENENT, F. y SOLBES, J. (1986). Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2(1), pp. 16 -21.
- GIL, D. y SOLBES, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, (15) 3, pp. 255-260.
<https://doi.org/10.1080/0950069930150303>
- GOETZ, J. P. y LECOMPTE, M. D. (1988). *Etnografía y diseño cualitativo en investigación educativa*. Madrid: Morata.
- HEWSON, P. W. (1982). A case study of conceptual change en special relativity. The influence of prior knowledge in learning. *European Journal of Science Education*, 4 (61), pp. 61-78.
<https://doi.org/10.1080/0140528820040108>
- HODSON, D. (1986). Philosophy of Science and Science Education. *Journal of Studies in Science Education* (12), pp. 25-57.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9752.1986.tb00128.x>
- KARIOTOGLOU, P. y TSELFES, V. (2000). Science curricula: epistemological, didactical and institutional approach. *Physics Review*, 31, pp. 19-28
- KATTMANN, U., DUIT, R., GROPENGIESSER, H. y KOMOREK, M. (1995). A model of educational reconstruction. Paper presented at the annual meeting of the National Association for Research in Science Teaching (NARST), San Francisco, CA.
- KRAGH, H. (1989). *Introducción a la historia de la ciencia*. Barcelona: Crítica.
- LEVRINI, O. y DI SESSA, A. A. (2008). How students learn from multiple contexts and definitions: proper time as a coordination class. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 4, 010107.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.4.010107>
- LIJNSE, P. L. (2000). Didactics of science: The forgotten dimension in science education research? In R. Millar, J. Leach y J. Osborne (eds.). *Improving science education - The contribution of research*. Buckingham: Open University Press, pp. 308-326.
- LIJNSE, P. y KLAASSEN, K. (2004). Didactical structures as an outcome of research on teaching-learning sequences? *International Journal of Science Education*, (26) 5, pp. 537-554.
<https://doi.org/10.1080/09500690310001614753>
- MARTINAND, J. L. (1986). *Connaitre et transformer la matière*. Berna: Peter Lang.
- MÉHEUT, M. (2005). Teaching-learning sequences tools for Learning and/or research. In K. Boersma, M. Goedhart, O. Jong y H. Eijkelhof (eds.). *Research and the quality of science education*. Netherlands: Springer, pp. 195-208.
- MÉHEUT, M. y PSILLOS, D. (2004). Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education* (26) 5, pp. 515-535.
<https://doi.org/10.1080/09500690310001614762>
- PÉREZ, H. y SOLBES, J. (2003). Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad. *Enseñanza de las Ciencias*, 21 (1), pp. 135-146.
- PÉREZ CELADA, H. (2003). *La teoría de la relatividad y su didáctica en el bachillerato: análisis de dificultades y una propuesta de tratamiento*. Tesis doctoral. Universitat de València.
- PSILLOS, D. (2001). Science Education researchers and research in transition: Issues and policies. In H. Behrendt *et al.* (eds.): *Research in Science Education. Past, present and future*, Dordresht: Kluwer Academic Publishers, pp. 11-16.

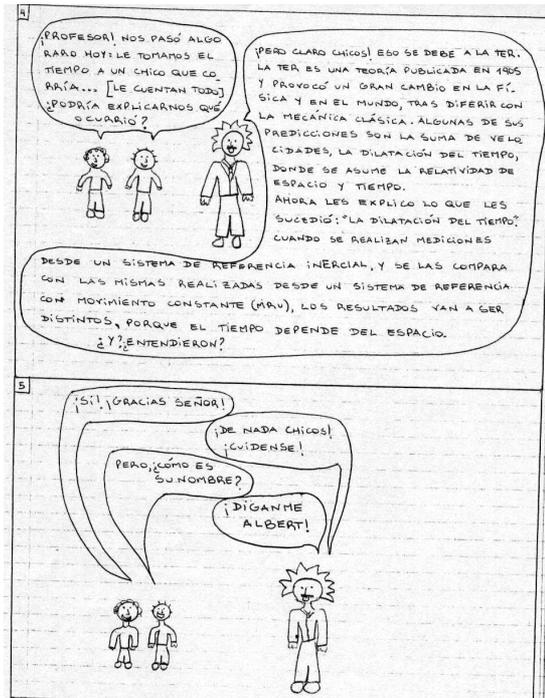
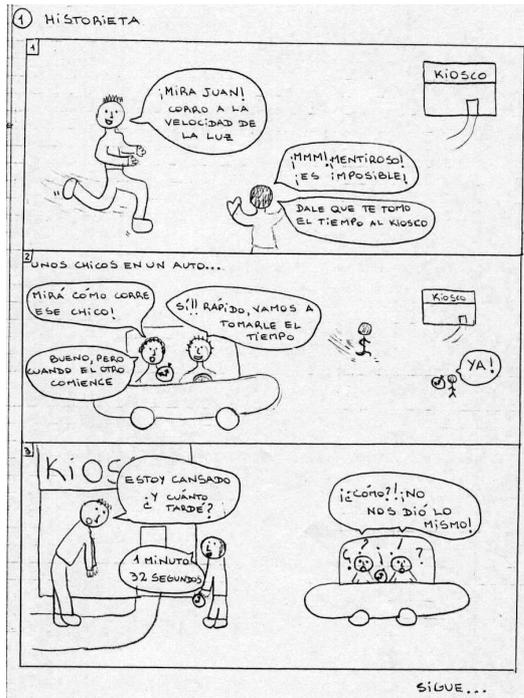
- PSILLOS, D. y MÉHEUT, M. (2001). Teaching-learning sequences as a means for linking research to development. In D. Psillos *et al.* (eds.). *Proceeding of Third International Conference on Science Education Research in the Knowledge Based Society* (Thessaloniki: Art of Text Publication), pp. 226-241.
- SCHERR, R. E., SHAFFER, P. S. y VOKOS, S. (2001). Student understanding of time in special relativity: Simultaneity and references frames. *American Journal of Physics*, 69 (7), pp. S24-S35.
<https://doi.org/10.1119/1.1371254>
- TEIXEIRA, E. S., GRECA, I. M. y FREIRE, O. (2012). The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: A Research Synthesis of Didactic Interventions. *Science and Education*, 21 (6), pp. 771-796.
<https://doi.org/10.1007/s11191-009-9217-3>
- VERGNAUD, G. (1990). *La théorie des champs conceptuels. Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10 (23), pp. 133-117.
- VILLANI, A. y PACCA, J. (1987). Students' spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal of Science Education*, (9), pp. 55-66.
<https://doi.org/10.1080/0950069870090107>
- WISKE, M. (1999) (comp.). *La Enseñanza para la Comprensión*. Buenos Aires: Paidós.
- VYGOTSKY, L. (1987). *Pensamiento y lenguaje*. Buenos Aires: La Pléyade.

ANEXO 1

EJEMPLO DE ACTIVIDADES DE LA PRIMERA IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA

Actividad 17: Elaborar, grupalmente, un cuento o historieta que contenga los conceptos que consideren más relevantes de la TER.

Resolución



ANEXO 2

EJEMPLO DE ACTIVIDADES DE LA SEGUNDA IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA

Actividad 4: Un pasajero de un tren, con velocidad constante respecto de un SRI, situado en el punto medio del vagón, enciende una lámpara y el haz de luz viaja hacia las paredes donde se encuentran ubicadas dos puertas, P1 y P2. El tren tiene un mecanismo que consigue que cuando la luz alcanza una pared, se abre una puerta. La velocidad con la que se desplaza el tren es de $0,5 c$.

Resuelve de manera algebraica tratando de establecer la posible simultaneidad de las aperturas de las puertas para observadores situados en el interior del vagón (O') y otro (O) sobre el andén del tren. Para el caso en que la velocidad del tren es de $0,5 c$.

Resuelve usando diagramas de espacio-tiempo para establecer la simultaneidad de los eventos.

Resolución

④ a. Observador O'

$$\frac{l'}{c} = \frac{3m}{c} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ seg}$$

La simultaneidad de apertura se da para el observador $O' \rightarrow$ los $1 \cdot 10^{-8}$ seg

$$O = t_1 = \frac{l}{c + v} = \frac{l'}{1.154 \cdot c} = \frac{3}{1.154 \cdot 3 \times 10^8} = 8.7 \times 10^{-9} \text{ s}$$

simultaneidad absoluta: sus $cp = 0$

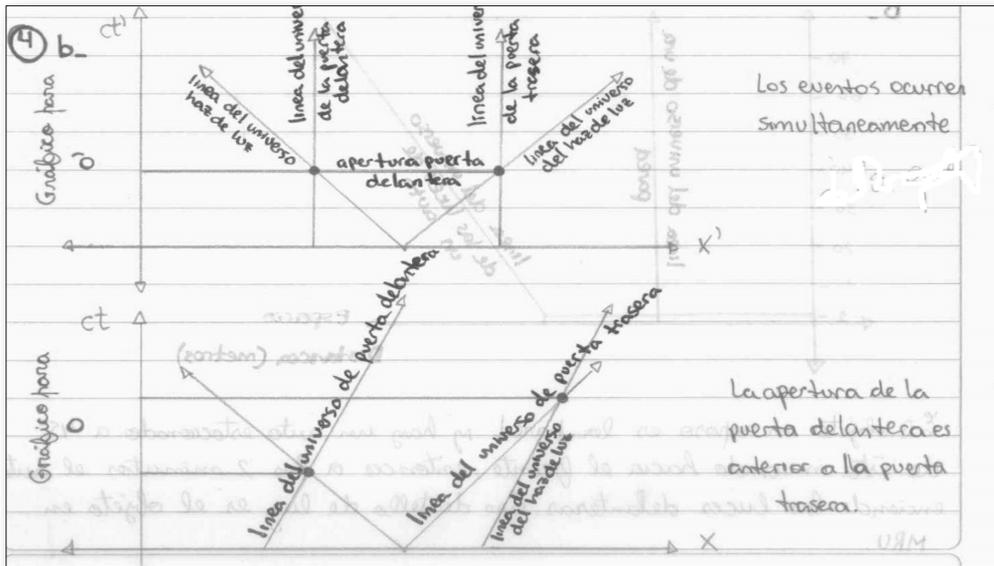
$$t_2 = \frac{l}{c - v} = \frac{l}{1.5c} = \frac{2.599 \text{ m}}{1.5c} = 57.7 \times 10^{-9} \text{ s}$$

estacionario en el que el tren se mueve

$$t_1 = \frac{2.599 \text{ m}}{c - 0.5c} = \frac{2.599 \text{ m}}{0.5c} = 1.732 \times 10^{-8} \text{ s}$$

estacionario absoluto

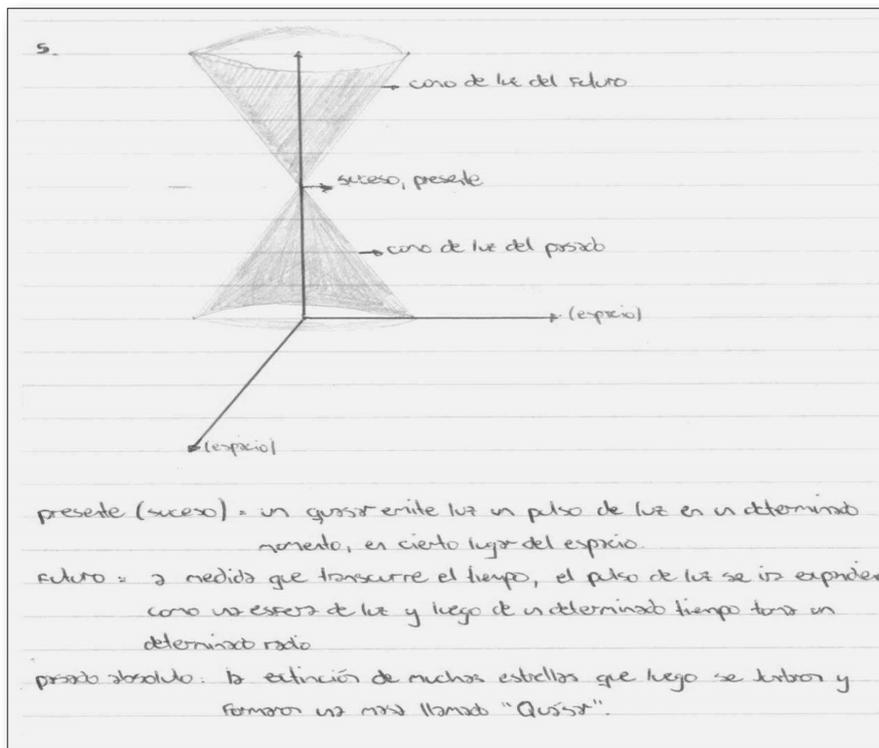
No son simultáneos, llega primero t_1



d.- En el tren de Einstein (punto de vista observador O' dentro del SP) se venían los eventos por la velocidad en que circula el tren, siempre son simultáneos y ocurren al mismo tiempo.

tomando en cuenta el SP fuera del tren localizados O se concluye que a mayor velocidad que circula el tren, el evento 1 y 2 se encuentran más alejados. El primero ocurre más rápido y el segundo después más. Si el tren iguala c la velocidad de la luz, el evento 2 nunca ocurre. Mientras mayor sea la velocidad del tren, las líneas del universo l_1 y l_2 se acercan más al eje x .

Actividad 5: Representa la historia de un quásar usando un diagrama de espacio-tiempo para eventos que ocurren en dos dimensiones espaciales más la dimensión temporal. Escribe el *pasado absoluto*, el *presente* y el *futuro* del suceso.



ANEXO 3

EJEMPLO DE LA EVALUACIÓN DE LOS DESEMPEÑOS DE LOS ALUMNOS
EN LA SEGUNDA IMPLEMENTACIÓN

Cantidad de alumnos	Categorías															
	Sistemas		Tiempo		Longitud		Líneas del Universo			Simultaneidad		Diagramas de Minkowski			Cono de Luz	
	ISP	ISI	TPC	TIC	LP	LI	LUP	LUL	LUO	IES	IEN	CDM	ADM	SDM	CL	CLR
56-65	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	B	B
41- 55	MB	MB	MB	MB	MB	B ⁺	MB	MB	MB	MB	B ⁺	B ⁺	B ⁺	B ⁺	B	R
26-40	MB	MB	MB	B	MB	B	B	MB	B	B	B	B ⁺	B	B ⁺	R	R
11-25	B ⁺	B	B	R	B ⁺	R	R	B	R	R	R	R	R	R	M	M
1-10	B	B	R	R	R	R	M	R	M	R	R	M	M	M	M	M

Cuadro 3. Resultados obtenidos en la cuarta etapa de la SEA.

El significado de los indicadores de este cuadro referido a la adquisición de los desempeños de comprensión por parte de los alumnos es el siguiente: ISP (identifica el sistema propio); ISI (identifica el sistema impropio); TPC (calcula correctamente el tiempo propio con ecuaciones horarias de movimiento rectilíneo uniforme); TIC (ídem para el tiempo impropio, utilizando ecuación de dilatación del tiempo); LP (calcula la longitud propia correctamente); LI (ídem para la longitud impropia); LUP (grafica de manera correcta la línea de universo de las puertas); LUL (ídem para haces de luz); LUO (ídem para objeto); IES (identifica la ocurrencia de eventos simultáneos analizando los resultados obtenidos en los cálculos de tiempos y longitudes propias); IEN (ídem, pero analizando los resultados obtenidos en los cálculos de tiempos y longitudes impropias); CDM (construye de manera correcta diagramas de Minkowski con lápiz y papel); ADM (analiza, interpreta y explica diagramas espacio-tiempo determinando la simultaneidad / no simultaneidad de eventos); SDM (utiliza simulaciones para analizar y explicar la simultaneidad / no simultaneidad de eventos); CL (construye correctamente el diagrama del cono de luz ubicando los posibles caminos luminosos que puede tomar un suceso); CLR (identifica la región del espacio-tiempo que se encuentra fuera de los conos de luz pasado y futuro del suceso P, como el conjunto de eventos que no son influidos por P).

Los resultados han sido clasificados como:

Muy bien (MB): se alcanzó entre el 90 y 100% esperado en cada indicador.

Bien más (B⁺): se alcanzó entre el 80 y 89% esperado en cada indicador.

Bien (B): se alcanzó entre el 70 y 79% esperado en cada indicador.

Regular (R): se alcanzó entre el 50 y 69% esperado en cada indicador.

Mal (M): el porcentaje alcanzado es inferior al 50%.

De los resultados obtenidos en la implementación de esta cuarta etapa se puede inferir que un número elevado de alumnos muestran indicios de un aprendizaje significativo de varios de los conceptos presentados en el cuadro 1. Las metas y desempeños de aprendizaje, analizadas en las categorías del cuadro 3, obtuvieron como resultados la calificación muy bien (MB), bien más (B⁺) o bien (B).

Teaching-learning sequences based on research results: proposal of a theoretical framework to address Special Relativity Theory

Irene Arriasecq

ECienTec, Facultad de Cs. Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. de Bs. As (CIC). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
irenearr@exa.unicen.edu.ar

Esther E Cayul

ECienTec, Facultad de Cs. Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Campus Universitario, Paraje Arroyo Seco, Tandil, Pcia. de Bs. As., Argentina. Comisión de Investigaciones Científicas de la Pcia. de Bs. As. (CIC)
ecayul@exa.unicen.edu.ar

Ileana M. Greca

Departamento de Didácticas Específicas, Universidad de Burgos, España
imgreca@ubu.es

This work discusses the design of a teaching learning sequence (TLS) on Special Relativity Theory (SRT) for high school level. It uses a perspective that integrates consensual ideas about the Nature of Science, theoretical frameworks of teaching and learning and the analysis of basic physical concepts for physics teaching at this level. This work also presents its implementations and the changes made based on the results found.

The theoretical framework of the TLS's design is intended to advance, in relation to other studies, in the proposal of the articulation of epistemological, psychological and didactical aspects. The study also stresses the need for coherence among all these different aspects. The potential of this framework is exemplified with a critical analysis of the design, implementation and evaluation of a TLS on SRT.

The TLS was embodied in some written material, with the structure of a text book, which can be used by teachers and students. It consists of five parts. The first part examines historical-epistemological issues: the notion of science, the characteristics of the scientific work, the evolution of ideas in science, the influences of the social, historical and cultural context in the emergence of scientific theories and its validation. In the second part, a thorough review of the concepts of classical mechanics that are necessary to interpret STR as well as those concepts that are substantially modified is made. These last concepts constitute the epistemological obstacles for the acquisition of the STR concepts. The third part addresses the concepts of electromagnetism that clash with classical mechanics and are taken up by Einstein. In the fourth part, the fundamental aspects of the STR are introduced, starting with the original article published in 1905. Different situations are used in order to help students to develop new mental schemes when confronted with situations that require the reformulation of classical concepts. The fifth part intends to introduce the students in some aspects of Albert Einstein's life.

The TLS was initially implemented in two opportunities, with students of the last year of high school in the city of Tandil (Argentina) as well as in a teacher training course. After these implementations, it was revised. The review noted that selected concepts: space, time and the associated concepts of reference system, observer, simultaneity and measurement seemed to have been adequate. Also, the objectives and most of the activities chosen to reach them appeared to be appropriate. However, the students showed difficulties in the comprehension of the concept of space-time which involves simultaneity, proper and improper time and length.

Then, it was decided to modify the TLS, using applets to work Minkowski's diagrams, which facilitate the conceptualization of space-time by means of qualitative and quantitative estimative. The way in which teachers can evaluate the overcoming of the objectives of the TLS was also modified. In order to address this point, the Theory for Comprehension was used, a theory consistent with the central aspects of our theoretical framework.

The new version of the TLS was implemented during 2013, altogether with the use of applets and the modified evaluation, in two courses of the last year ($N = 65$ pupils) of a public high school in Tandil. The context here was similar to the first implementations. The comprehension goals were evaluated through the construction of concept maps, discussions and theoretical and practical activities. The results showed that the changes made were appropriate.

The TSL designed and its written text address a topic that, despite its importance, has not been sufficiently investigated in the area of Physics teaching in Argentina. The text seems to have been very useful for teachers who, without specific training in SRT, have used it as the main resource for introducing this theory at the secondary level.

