



Modelización en la enseñanza de la relatividad especial, a nivel universitario

R. Pérez^a

^aUniversidad Autónoma de la Ciudad de México

ARTICLE INFO

Received: July 20, 2017

Accepted: August 23, 2017

Available on-line: November 2, 2017

Keywords: teoría de la relatividad especial, modelización, metacognición y argumentación.

E-mail addresses:

ricperezp1235@gmail.com

ISSN 2007-9842

© 2017 Institute of Science Education.
All rights reserved

ABSTRACT

This work arises from the design of a didactic strategy to teach the special relativity theory in higher education under the modeling approach. During design, emerged the need to propose a synthesis that allowed to understand what is a model in the most general way. The proposal made it possible to specify aspects to address relativistic phenomena which require a high degree of abstraction. A synthesis was also proposed to conceptualize modeling in which are interwoven two aspects of great relevance: argumentation and metacognition. In this proposal the conceptualization of model is immersed and it provides analysis categories to evaluate the modeling process.

Este trabajo surge del diseño de una estrategia didáctica para la enseñanza de la teoría de la relatividad especial a nivel universitario, bajo el enfoque de la modelización. Durante el diseño surgió la necesidad de proponer una síntesis que permitiera entender lo que es un modelo, de la forma más general posible. Dicha propuesta posibilitó hacer precisiones para abordar fenómenos propios de la relatividad especial, la cual requiere un alto grado de abstracción para trabajar con ella. De igual forma, se propuso una síntesis para conceptualizar la modelización, con la que se pudo entrelazar otros dos aspectos propuestos en este trabajo como componentes naturales de la modelización: argumentación y metacognición. En esta interrelación se entrecruzó la síntesis de modelo propuesta y cabe señalar que dicho planteamiento tiene la ventaja de ser bastante general, además proporciona categorías de análisis para evaluar el proceso de modelización.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo surge del diseño de una estrategia didáctica, fundamentada en la visión de la modelización, para la enseñanza de la teoría de la relatividad especial a nivel superior. Al realizar dicho diseño se hizo una revisión bibliográfica para rastrear trabajos previos que reportaran ideas previas sobre aspectos de la relatividad especial, o del diseño y aplicación de estrategias didácticas para enseñar esta teoría. A partir de los artículos que reportan ideas previas se logró dar cuenta de la necesidad que existe para continuar los esfuerzos encaminados a mejorar la enseñanza de esta teoría y de las ciencias en general, particularmente a nivel universitario.

Después de detectar las ideas previas de los estudiantes sobre aspectos de la teoría de la relatividad especial y de sacar las conclusiones más importantes de los estudios consultados, se pudo obtener una serie de criterios para el diseño de la estrategia didáctica, la cual se fundamentó en la visión de modelos y la modelización dentro del campo de la Educación en Ciencias, la cual surge de una postura que propone una visión de la naturaleza del conocimiento científico, denominada como realismo científico (Chakravarty, 2017).

En el campo de la Educación en Ciencias se habla la polisemia entorno a los modelos y como mencionan Frigg y Hartmann (2017) los modelos tienen una gran importancia en la ciencia; pero aún no se logra entender del todo que son y como funcionan. Por esta razón como primer paso, para diseñar la estrategia didáctica para abordar la teoría de la relatividad especial, se tuvo que hacer una revisión para comprender lo que es un modelo y el proceso de modelización. Se tomó como punto de partida la propuesta de Gutiérrez y al momento de implementar dicha concepción de modelo surgió la necesidad de abundar más, desde la filosofía, sobre los modelos para poder tomar decisiones que permitieran elaborar un diseño sistemático de la estrategia didáctica. Además se hizo una revisión para profundizar la comprensión sobre el proceso de modelización, y a partir de los hallazgos se elaboró una propuesta que lo esquematiza, en donde se incluye la concepción de modelo y otros dos aspectos de gran importancia dentro del campo de la Educación de las Ciencias: la argumentación y la metacognición. Con estos tres aspectos interrelacionados se cuenta con una propuesta más completa acerca del proceso de modelización.

Cabe señalar que en el presente trabajo sólo se expondrán los avances sobre la concepción de modelo y sobre la modelización. En ésta propuesta se entrelaza la idea de modelo con los aspectos de la metacognición y la argumentación para superar las dificultades en la enseñanza de la teoría de la relatividad y de forma general para las propuestas que se fundamenten en la visión de los modelos.

II. TRABAJOS PREVIOS ENTORNO A LA ENSEÑANZA DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Con la finalidad de conocer lo que se ha reportado respecto a las ideas previas de los estudiantes y el diseño de secuencias de enseñanza para abordar la TRE, se realizó una búsqueda bibliográfica en revistas especializadas del campo. Como producto de dicha búsqueda se hallaron 18 artículos. Dentro de ellos, 17 corresponden a investigaciones realizadas y uno es un análisis de tipo teórico. Las investigaciones encontradas están enmarcadas dentro de cinco niveles educativos: en secundaria se encontró una investigación que da cuenta de las ideas previas de los estudiantes (Dimitriadi y Halkia, 2012). En el nivel medio (preparatoria) se encontraron seis artículos; de éstos, uno de ellos reporta las dificultades a las que se enfrentan los docentes cuando enseñan el tema de la TRE (Arriasecq y Greca, 2004); otros cuatro proponen una secuencia didáctica que toma en cuenta las ideas previas de los estudiantes (Borghi, De Ambrosio y Ghisolfi, 1993; Gil y Solbes, 1993; Alemañ y Pérez, 2000; Arriasecq y Greca, 2012); y uno más presenta un análisis del tratamiento que se le da a la TRE en los libros de texto en Argentina destinados a estudiantes de preparatoria (Arriasecq y Greca, 2007). Con estudiantes universitarios y de posgrado se reportan once trabajos, de los cuales siete reportan ideas previas; dos exponen únicamente el diseño y la aplicación de una Estrategia Didáctica; uno considera tanto ideas previas como el diseño y aplicación de una secuencia didáctica, y un último artículo hace un análisis teórico de las ideas previas de los estudiantes sobre la TRE para caracterizarlas.

Los resultados de los once artículos que reportan investigaciones a nivel superior se expondrán a continuación y ellos permiten inferir la existencia de un problema en torno a la enseñanza y el aprendizaje de la TRE en este nivel educativo. En ellos, se reportan ideas previas de los estudiantes, de las cuales se desprende que, aún cuando ya tomaron cursos de Relatividad Especial, permanecen con una visión propia de la mecánica clásica (Hewson, 1982; Pietrocola y Zylbersztajn, 1999) en la que las propiedades de los objetos, como la contracción de la longitud o la masa de un cuerpo, no cambian (Hewson, 1982). Así, en algunos casos, los estudiantes afirman desatinadamente que el fenómeno de la contracción de la longitud es una distorsión de la percepción (Posner, 1982; Villani y Pacca, 1987), al igual que la

dilatación del tiempo, pues suponen que tanto para la longitud y el tiempo debe existir una única medición (Villani y Pacca, 1987).

También se ha encontrado que los alumnos conservan la idea del espacio y del tiempo (Posner, 1982), de sistemas de referencia absolutos (Villani y Pacca, 1987; 1990), o que consideran la velocidad, las distancias recorridas y las trayectorias como cantidades independientes de los sistemas de referencia (Villani y Pacca, 1990). Además se reportan otras dificultades de los estudiantes en relación con los marcos de referencia; por ejemplo, en algunos casos ellos mencionan que cada observador es en sí mismo un sistema de referencia, sin importar que exista reposo relativo entre los observadores (Scherr, Shaffer y Vokos, 2001), o que haya una falla en reconocer que, si un evento es observado en un sistema de referencia, también será observado en cualquier otro, lo cual refleja una tendencia a pensar en la existencia de realidades distintas para cada marco de referencia (Scherr, Shaffer y Vokos, 2002). Por las dificultades detectadas en relación con los marcos de referencia, se propone que una de las tareas principales sea la revisión del conocimiento previo de los estudiantes sobre la TRE, y que se debe enseñar esta teoría a partir de los antecedentes que tengan los estudiantes (Villani y Pacca, 1987; 1990; Toledo, Arriasec y Santos, 1997; Pietrocola y Zylbersztajn, 1999; Scherr, Shaffer y Vokos, 2001; 2002; Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno, 2009; Selçuk, 2011).

Otro de los resultados relevantes son los que proporcionan Villani y Pacca (1987; 1990), quienes trabajaron con estudiantes de posgrado (maestría o doctorado en física o en educación de las ciencias). Los autores antes mencionados encontraron en su estudio que los estudiantes con los que hicieron su investigación expresaron ideas que parecen consistentes con las de la TRE, pero que, al ser analizadas, resultan no serlo; los reportes agregan que las ideas de los estudiantes con los que trabajaron guardan similitudes con las de aquellos que se encuentran iniciando la universidad. Lo anterior sugiere que los alumnos no articulan la TRE para utilizarla en situaciones complejas relacionadas con dicha teoría, además de que su conocimiento sobre la TRE es más bien superficial y que hacen uso de su 'sentido común', provocando que sus explicaciones no se sostengan ante cuestionamientos (Villani y Pacca, 1990; Toledo, Arriasec y Santos, 1997; Pietrocola y Zylbersztajn, 1999). Villani y Pacca (1990) mencionan que tales resultados no son ocasionados por una falta de habilidades matemáticas, pues muchos de los alumnos que participaron en su estudio trabajaban en temas de física teórica, entonces argumentan que estos hallazgos se pueden explicar por la naturaleza del contenido de la TRE o por la forma de razonar que tienen los estudiantes, la cual construyen individualmente a lo largo de su vida y que es difícil cambiar.

Además en estudiantes universitarios se presenta una coexistencia entre las explicaciones propias de la física clásica y la TRE, junto con un conocimiento superficial de esta teoría, lo cual provoca que no posean una base sólida para operar la TRE (Toledo, Arriasec y Santos, 1997; Pietrocola y Zylbersztajn, 1999; Scherr, Shaffer y Vokos, 2002). Una de las razones que podrían ayudar a entender lo anterior es que los estudiantes tienen poco conocimiento sobre los orígenes de la TRE, lo cual no permite diferenciar esta teoría con la mecánica clásica (Arriasec y Santos, 1997). A lo anterior puede agregarse el hecho de que los estudiantes no mencionan explícitamente el principio de relatividad en sus respuestas (Pietrocola y Zylbersztajn, 1999; Selçuk, 2011) y que no han asimilado las implicaciones de la invarianza de la velocidad de la luz, por lo cual no pueden utilizar esto para analizar situaciones relativistas (Scherr, Shaffer y Vokos, 2001; 2002; Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno 2009). En este sentido, Villani y Arruda (1998, citado en Guisasola et al., 2009) señalan que durante los cursos de cinemática y óptica no se aborda o no se le da mucha relevancia a la medición de la velocidad de la luz, lo cual podría explicar el hecho de que los estudiantes no asimilen las implicaciones del segundo postulado de la TRE.

Entre las sugerencias que se encontraron en los once artículos, con investigaciones hechas en nivel superior, para mejorar la enseñanza de la TRE, se encuentra en primer lugar el hecho de poner mayor atención al entrenamiento de los profesores con la finalidad de cambiar el modo tradicional de enseñanza en el que el profesor da toda la información, la cual es recibida por los alumnos (Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger, 1978), y como lo menciona Posner (1982), los profesores deben asumir un papel de "adversario en el sentido socrático" (p. 226) para enfrentar a los estudiantes en los problemas que surjan por la incompatibilidad de sus concepciones con el conocimiento científico

durante la construcción del suyo. En este sentido, los profesores deben reconocer que las concepciones de las personas y sus compromisos epistemológicos juegan un papel muy importante en el proceso de aprendizaje o de construcción de conocimiento por parte de los alumnos (Hewson, 1982; Posner, 1982). Posner (1982) pone de ejemplo el caso de Einstein (1949, citado en Posner, 1982), quien aseguraba que una teoría “no debía contradecir los hechos empíricos” y que las teorías debían tener una “simplicidad lógica” (p. 218). Los estudiantes no necesariamente conocen o comparten la visión que tenía Einstein, la cual es asumida por la comunidad científica en general, por lo cual es lógico pensar que será de gran utilidad hacer inteligibles estos principios a los estudiantes para el proceso de la enseñanza de la TRE.

Además es pertinente señalar lo que Scherr, Shaffer y Vokos (2002) mencionan acerca de las paradojas, las cuales son utilizadas por los profesores para confrontar y exponer las ideas de los estudiantes con algún fenómeno relativista que contradiga su intuición, para luego resolverlas. Según los autores este enfoque no es el más adecuado sino más bien es necesario que los estudiantes tengan un papel activo en la confrontación de sus ideas y la resolución de las contradicciones. Por último los profesores deben cuidar la forma de comunicar las ideas en el aula, ya que como lo menciona Selçuk (2011), si se utilizan palabras como 'ver' y 'parecer' en vez de 'medir' y 'observar' existe la posibilidad de que los estudiantes terminen con la idea de que los fenómenos relativistas son una cuestión de percepción.

Por último, en las investigaciones en las que se diseñó una secuencia didáctica los autores reportan buenos resultados al utilizar métodos no tradicionales en los que se da mayor importancia a las ideas previas de los estudiantes y al hecho de que ellos mismos las analicen (Scherr, Shaffer y Vokos, 2002).

También apuntan que una dinámica de aula lo más abierta posible a la discusión, junto con el diseño de materiales de estudio centrados en ella, posibilita que los estudiantes recurran a una argumentación científica apoyada en evidencias que conozcan -las cuales deben irse proporcionando en el desarrollo de la secuencia- (Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger, 1978; Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno, 2009). Además los autores señalan algunas limitaciones, como el hecho de que en la implementación de las secuencias no todos los estudiantes muestran la habilidad de soportar y justificar sus ideas con argumentos científicos (Guisasola, Solbes, Barragues, Morentin y Moreno, 2009), o que la elección de un método abierto a la discusión limita la cantidad de contenido que puede cubrirse en relación a una clase tradicional (Angotti, Caldas, Delizoicov y Rüdinger, 1978). En este contexto, cobra gran relevancia el diseño de Estrategias Didácticas para mejorar la enseñanza de las ciencias, en particular con temas de gran abstracción como lo es la TRE.

III. CONCEPCIÓN DE MODELO Y DE MODELIZACIÓN.

Con lo anterior puede verse la importancia de emprender esfuerzos para mejorar la enseñanza y el aprendizaje a nivel universitario, en particular en el campo de la física. Es necesario desarrollar propuestas para contribuir en esta tarea, y por esa razón se buscó diseñar una estrategia didáctica que tomara en cuenta los hallazgos antes reportados para enseñar la teoría de la relatividad especial a nivel universitario. El diseño de la estrategia didáctica está basado en la visión de los modelos en la ciencia, que se describirá a continuación.

Frigg y Hartmann (2017) menciona que la postura de los modelos aborda diferentes cuestiones, una de ellas es la función que cumplen para representar fenómenos de la naturaleza; también para saber el tipo de objetos que son (ontología de los modelos); como aprenden o conocen los sujetos con ellos (epistemología) y por último se encuentra la relación que guardan con una teoría.

Al realizar este trabajo se realizó una revisión bibliográfica que permitió proponer una síntesis que engloba los aspectos más importantes que caracterizan a un modelo, y además se propuso un esquema del proceso de modelización que permite visualizar como conocemos en el ámbito de la ciencia, dicha propuesta considera la inclusión de la argumentación y la metacognición como elementos necesarios para desarrollar el conocimiento científico.

III.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS.

Respecto a la primera cuestión se retoma el planteamiento de Giere (1988), donde menciona que un modelo es una estructura para representar fenómenos naturales y una interpretación de los mismos. La representación se lleva a cabo mediante una relación de similitud entre el objeto o fenómeno a modelizar y el modelo mismo. En ella se idealiza el objeto o fenómeno con la intención de simplificar el modelo, eliminando aspectos irrelevantes para poder determinar las características esenciales que permitan explicar el fenómeno. El grado de validez de un modelo dependerá de la hipótesis teóricas que se hagan para elaborarlo y simplificarlo, además del grado en que se cumplan éstas para poder hacer la representación y explicación del fenómeno.

Para determinar que tipo de objeto es un modelo se pueden señalar algunos aspectos que clarifican y hacen posible operar con los modelos, en primer lugar se considerará que un modelo tiene dentro de sus componentes a las "entidades" y las "relaciones" (van Fraassen, 1989). Las entidades propuestas tienen las "propiedades" que se les atribuye en la teoría y ellas pueden tener o no un estatus ontológico, cabe aclarar que aún cuando no lo tengan no dejan de ser útiles para explicar un fenómeno por medio de modelos científicos. Puede suceder que dichas entidades no sean observables en determinado momento y posteriormente sean corroboradas o desechadas debido a que los métodos de observación evolucionan (Leplin, 2006).

Otro aspecto relevante para el manejo y manipulación de los modelos es su relación con las leyes de la naturaleza, las cuales gobiernan a las entidades y los procesos dentro del modelo (Frigg y Hartmann, 2006), a este elemento se le denota de forma general como "*reglas de inferencia*". Por último es necesario considerar las "*condiciones*" bajo las cuales un modelo pueda aplicarse o ser útil, para ello se retoma lo que Giere (1988) menciona acerca de las hipótesis teóricas: con ellas se establece la relación de similitud entre el modelo y el objeto a modelizar, dichas relaciones carecen de sentido si no se explicitan sus condiciones y grados para que sean válidas.

Es necesario señalar que no basta con disponer de una concepción acerca de lo que son los modelos, ya que es en el proceso de modelización donde los sujetos conocemos el mundo. Por esa razón se expondrá a continuación la propuesta que interrelaciona a la argumentación y la metacognición como componentes necesarios para superar las dificultades reportadas en la sección anterior.

III. 2 PROCESO DE MODELIZACIÓN: ARGUMENTACIÓN Y METACOGNICIÓN

Los modelos y la modelización desempeñan un papel tanto en la ciencia como en la educación de las ciencias. De acuerdo con Coll y Lajium (2011), los propósitos de la modelización en las ciencias son: (a) producir representaciones simples de los objetos o fenómenos, de modo que se eliminen sus aspectos no relevantes y sólo se mantengan los más importantes, lo anterior es una cualidad que permite centrarse en los aspectos claves del fenómeno a estudiar; (b) tener conocimiento acerca de los fenómenos y, (c) explicarlos desde un punto de vista científico. Además debemos recordar que según Giere (1988), los modelos sirven a los científicos para representar el mundo y para comunicar sus representaciones a otras personas.

De manera análoga, la modelización en la educación de las ciencias persigue en esencia los mismos propósitos que en la ciencia erudita; pero en el ámbito del aula se propicia el aprendizaje sobre el papel que juegan los modelos en la comunicación y difusión del conocimiento científico. Es mediante la construcción de modelos que se aprende a hacer ciencia y se enfatiza la importancia de los mismos en ella (Justi y Gilbert, 2002).

Coll y Lajium (2011) mencionan que los estudiantes no logran apreciar la función principal de los modelos en la ciencia como construcción para representar y explicar los fenómenos, ya que dicho proceso se ve influenciado por la noción que tengan sobre como conocen (epistemología), sus ideas sobre su naturaleza y la modelización en la ciencia. Por tal razón es recomendable considerar estos aspectos dentro del aula y también es útil que los profesores comprendan y analicen los modelos de los estudiantes junto con sus ideas sobre el proceso de modelización. En ese

sentido Justi y Gilbert (2002) proponen un esquema de la modelización con la intención de facilitar la enseñanza basada en este enfoque.

Justi y Gilbert (2002) describen a la modelización como un proceso cíclico, donde primero se establecen los *propósitos* que guiarán este proceso, ya sea que se desee describir un fenómeno de la naturaleza, o bien establecer únicamente las entidades que formarán parte del modelo, también es posible que se deseen conocer las causas que subyacen a éste, o predecir su comportamiento bajo ciertas circunstancias. Los autores también mencionan que al modelizar, se puede construir (o reconstruir) un modelo ya existente, aceptado por la comunidad científica. Lo anterior correspondería, por ejemplo, al proceso que se desarrolla durante la formación de los estudiantes de ciencias. También puede suceder que una persona desee construir un modelo nuevo, según los propósitos que tenga.

Los propósitos guiarán los primeros *acercamientos*, que podrán ser directos al realizar un experimento o estudiándolo de forma indirecta, o bien con un acercamiento cuantitativo o cualitativo. Con los dos aspectos anteriores es posible iniciar la *construcción del modelo* y en este momento será necesario decidir la forma que se empleará para *expresarlo*, ya sea de forma matemática, verbal o visual. Se puede decir que hay una interrelación entre la producción del modelo y su expresión, por lo que en esta etapa se considera que existe un desarrollo cíclico del modelo (Justi y Gilbert, 2002).

Una vez que se tiene el modelo es posible considerar los aspectos que permite englobar sobre el fenómeno, es decir que se puedan realizar predicciones o imaginar posibles resultados y analizar si tendrían sentido, lo anterior puede realizarse por medio de un *experimento pensado*. Cuando el modelo pasa la prueba anterior es factible comenzar a *diseñar el arreglo experimental* para realizar las pruebas empíricas que corroboren o refuten las hipótesis hechas con el modelo para explicar y predecir el fenómeno, dependiendo de los objetivos fijados. En caso de que se refute al modelo construido por el sujeto, se podrá *modificar el modelo o rechazarlo* y recomenzar nuevamente el proceso (Justi y Gilbert, 2002).

Si después de realizar las pruebas experimentales el modelo es *fructífero*, esto es, que se cumplen las predicciones hechas por el modelo y se describe al fenómeno que se eligió, es posible *analizar sus alcances y limitaciones* del mismo, con lo cual se puede recomenzar el ciclo para analizar si, por ejemplo, es necesario considerar otras condiciones o aspectos para refinar y mejorar el modelo o para hacer más precisa la descripción del fenómeno (Justi y Gilbert, 2002).

El esquema anterior propuesto por Justi y Gilbert (2002) se complementará con la propuesta de Hughes (1997) que puede sintetizar a la anterior en tres etapas. Con esto se tendría un esquema ampliado y uno sintético que permite hacer más operativo el uso de la modelización dentro de la Educación en Ciencias. La propuesta de Hughes (1997) además permite agregar aspectos que enriquecen la imagen que se tendrá de la modelización, que se describirán a continuación.

Hughes (1997) propone tres etapas para entender el proceso de modelización en el contexto de la física y en particular hace énfasis al uso de los modelos teóricos en este campo. Dichas etapas son las siguientes: ***denotación, demostración e interpretación***.

La primera de ellas, ***denotación***, es la etapa en donde se comienza a representar un modelo. En su exposición Hughes (1997) pone como ejemplo la representación que hizo Galileo para trasladar el fenómeno del péndulo a su representación geométrica, es decir, representó el movimiento periódico con una descripción geométrica que le permitió ahondar en la explicación del fenómeno, ya que al interpretar sus resultados -que obtuvo geoméricamente- pudo describir la dinámica del movimiento y además obtener relaciones en el fenómeno que le permitieron concluir que el periodo de este movimiento oscilatorio es independiente de la masa del objeto.

Hughes (1997) hace énfasis en la representación matemática de los modelos, ya que en la física esta representación es de las más importantes por que permite formalizar teóricamente lo que se sabe acerca del fenómeno y lo que se deduzca de su comportamiento. Hughes (1997) menciona que las representaciones matemáticas tienen una dinámica interna que permite hacer predicciones tanto de aspectos nuevos como de los que ya se conocen, dicha dinámica interna está provista por medio de los recursos deductivos de las matemáticas empleadas para la

representación. Todas las representaciones de este tipo comparten una característica en común, "ellas contienen los recursos que nos permiten *demostrar* los resultados en los que estamos interesados" (Hughes, 1997, pp. 332). Además Hughes (1997) menciona que es posible *demostrar* los fenómenos físicos, o los aspectos que nos interesen de él, de forma experimental.

Hughes (1997) señala que con las conclusiones que se demuestran por medio del modelo tienen que ser *interpretadas* en términos del fenómeno que se está modelizando, y posteriormente es posible determinar si las conclusiones teóricas corresponden a él, y si la teoría se ajusta con las observaciones empíricas. En este sentido Hughes (1997) menciona que la interpretación sería el proceso inverso a la denotación.

A partir de la síntesis que se propuso para entender lo que es un modelo dada en la sección III. 1 *características de los modelos*, junto con la propuestas de Justi y Gilbert (2002) y de Hughes (1997), se propone un esquema que conjuga las características más importantes de la modelización, el cual se presenta a continuación:

- **Denotación:** se debe tener contacto o experiencia con el fenómeno a modelizar y posteriormente se denotan las *entidades* que intervienen en el fenómeno; una vez hecho lo anterior se determinan sus *propiedades* y las *relaciones* posibles entre ellas. Debe mencionarse que desde esta primera etapa del proceso se toman en cuenta ciertas hipótesis para determinar que entidades son relevantes en el fenómeno, así como las propiedades y relaciones entre ellas que son de interés. En esta primera etapa se inicia la construcción del modelo y se busca establecer una primera relación de éste con el fenómeno. Además se deben considerar los propósitos para la construcción del modelo, ya sea para describir el comportamiento de un fenómeno, determinar las causas que lo generan y de este modo explicarlo en circunstancias específicas. Con esto se contempla la construcción de modelos cada vez más complejos o robustos, ya que inicialmente puede ser únicamente posible la descripción y conforme se avanza en la modelización, es posible explicar los fenómenos bajo ciertas hipótesis o condiciones más generales, o bien, si el interés es simplificar una explicación se puede optar por un modelo menos elaborado y de esto depende el propósito que se tenga.
- **Demostración:** se buscan corroborar las afirmaciones teóricas del modelo; éste debe ser expresado con la finalidad de facilitar su manipulación mental -por ejemplo con ayuda de experimentos pensados- para determinar las posibilidades que proporciona y encontrar sus posibles fallas. En caso de existir deficiencias, deben hacerse ajustes hasta eliminar las posibles inconsistencias teóricas y así poder dar paso a la experimentación empírica -la cual no siempre será posible realizar en el aula. Con la experimentación se pretenden probar las predicciones hechas por medio del modelo y en caso de no cumplirse será necesario adecuarlo a los resultados experimentales. Para los experimentos pensados, la búsqueda de las inconsistencias se hará haciendo uso de la teoría, que en nuestro caso será la Teoría de la Relatividad Especial. Es importante señalar que durante esta etapa de la construcción del modelo, las *reglas de inferencia* tienen un papel importante ya que con ellas es posible, tanto hacer predicciones como analizar las consecuencias de éstas, además que son ellas las que delimitan en gran medida al modelo mismo.
- **Interpretación:** por último los hallazgos se convierten en afirmaciones sobre el objeto o fenómeno a modelizar de modo que se genera conocimiento de ellos a través de la relación de similitud, la cual depende de las hipótesis teóricas hechas para la construcción del modelo, en esta última fase se deberán determinar las limitaciones del modelo y reafirmar las *condiciones* en las que es válido, éstas están presentes desde la primera etapa del proceso, ya que al determinar por ejemplo las relaciones se establecen ciertas condiciones para el modelo. Determinar las limitaciones y condiciones se facilita si se comunica el modelo construido a una comunidad de pares y se propicia un proceso de argumentación para establecer el rango de validez del modelo, que puede aumentar al repetir el proceso.

III. 2.1 ARGUMENTACIÓN Y METACOGNICIÓN

Para poder interrelacionar la concepción de modelo con la argumentación y la metacognición en el esquema de la modelización fue necesario realizar una revisión bibliográfica con la idea de fundamentar lo que se entiende por argumentación y metacognición. A continuación se expondrá lo más relevante de ambos componentes y al final se hará una síntesis que permitirá presentar la propuesta del esquema de la modelización.

Argumentación

Para entender lo que es la argumentación es necesario diferenciar lo que es una explicación, un argumento y la argumentación en sí (Driver, Newton y Osborne, 2000; Sampson y Clark, 2009; Erduran, Simon y Osborne, 2004; Berland & Reiser, 2009; Berland y Reiser, 2009). En las ciencias se buscan explicar del modo más completo posible los fenómenos naturales, con el requerimiento de que ellas tengan consistencia con las evidencias experimentales y las teorías científicas disponibles (Sampson y Clark, 2009; Berland y Reiser, 2009). Se dice que las explicaciones de los fenómenos se obtienen a partir de los modelos científicos, y se construyen en un proceso en el que interviene la comunidad mediante cuestionamientos y evaluaciones a estas (Berland, y Reiser, 2009).

Las explicaciones y la argumentación son aspectos complementarios en la práctica científica, ya que al explicar un fenómeno se hace uso de argumentos para persuadir a los pares, en este sentido la argumentación hace posible construir explicaciones más robustas para que sean aceptadas por la comunidad (Berland y Reiser, 2009). La argumentación se puede entender como el proceso en el que se construyen argumentos y se evalúan, se analiza el proceso de investigación y sus productos (Sampson y Clark, 2009). Por otro lado, los argumentos se pueden conceptualizar de varias formas, una de las propuestas más aceptadas es la de Toulmin que propone como componentes de un argumento: datos para soportar las afirmaciones que se hagan, justificaciones que aduzcan la relación entre los datos y las afirmaciones, y respaldo para apoyar ciertas justificaciones, además se incluyen cualificadores para especificar las condiciones bajo las cuales una afirmación se puede tomar como verdadera, y refutaciones para especificar las condiciones cuando una afirmación no se cumple (Driver, Newton y Osborne, 2000; Sampson y Clark, 2009; Erduran, Simon y Osborne, 2004).

Entre las contribuciones de la argumentación en las clases de ciencias se puede mencionar que esta práctica contribuye al soporte de los procesos de metacognición y permite llevar a cabo el proceso de modelización al discutir los modelos en una comunidad de pares; coadyuva al desarrollo de competencias comunicativas; permite aprender las prácticas que llevan a cabo los científicos y permite la evaluación racional de modelos y explicaciones (Jiménez-Aleixandre y Erduran, 2007). Por lo anterior es importante considerar y promover la argumentación en la enseñanza de las ciencias, debido a que permite involucrar a los estudiantes en el proceso de aprendizaje, además que la promoción de esta práctica en el aula hace posible explicitar el pensamiento y razonamiento de los estudiantes para su evaluación. Es importante señalar que para poder introducir la argumentación en el aula se requiere un cambio en la naturaleza normativa del discurso en el salón de clase y de la adopción de diseños instruccionales que permitan a los estudiantes trabajar colaborativamente (Osborne, Erduran y Simon, 2004).

Para promover la argumentación en el aula de ciencias se recomienda tomar en cuenta los siguientes aspectos: que los alumnos trabajen en problemas que tengan relación con el recabo de evidencia y el manejo de datos, donde los estudiantes tengan un papel activo en su propio aprendizaje; involucrar a los estudiantes en el pensamiento reflexivo y en procesos metacognitivos con la intención de alentarlos a que comparen sus ideas con posturas alternativas; el uso de la argumentación en periodos de tiempo amplios y que los profesores brinden soporte a los estudiantes para desarrollar la argumentación (Jiménez-Aleixandre, 2007).

Metacognición

Dentro de las conceptualizaciones más utilizadas de la metacognición se menciona que está constituida por dos componentes: el conocimiento sobre el propio aprendizaje, también llamado proceso de cognición, y la auto regulación del mismo (Veenman y Van Hout-Wolters, 2006; Schraw, Crippen y Hartley, 2006; Yilmaz-Tüzün, Özgül y Topcu, 2010; Grotzer y Mittlefehldt, 2012; Herscovitz, Kaberman, Saar y Dori, 2012; Herscovitz, O., Kaberman, Z., Saar, L. & Dori, Y. 2012).

El conocimiento sobre el propio aprendizaje hace referencia al conocimiento que cada sujeto tiene de su proceso de aprendizaje o proceso de cognición, sobre los factores que afectan su desempeño, el conocimiento de las estrategias y procedimientos para el aprendizaje o bien de las razones de utilizar alguna estrategia particular en alguna parte del proceso. En el proceso de cognición se considera que los individuos hacen uso de estrategias para aprender, como la formulación de preguntas, para resolver problemas y de habilidades de pensamiento crítico con las que es posible identificar fuentes de información y determinar si ésta es consistente con el conocimiento científico previo (Schraw, Crippen y Hartley, 2006). Cabe señalar que se ha encontrado que los estudiantes, incluyendo los de nivel universitario, tienen pocas habilidades para argumentar (Kuhn, 1999, citado en Schraw, Crippen y Hartley, 2006) y hacer uso del pensamiento crítico (Halpern, citado en Schraw, Crippen y Hartley, 2006), lo que hace destacar la importancia de abordar estos aspectos en la enseñanza de todos los niveles educativos.

Por otro lado, en la regulación se encuentran aspectos como la planificación para elegir estrategias, la determinación de los objetivos al iniciar una actividad, la activación del conocimiento previo o la administración del tiempo, además se considera que en la regulación interviene el auto monitoreo del proceso de aprendizaje y la evaluación del mismo, así como de las habilidades que se tengan para controlarlo (Veenman, Van Hout-Wolters, 2006; Schraw, Crippen y Hartley, 2006; White, Frederiksen y Collins, 2009; Grotzer, T. y Mittlefehldt, 2012; Herscovitz, Kaberman, Saar, y Dori, 2012) y la auto reflexión sobre el proceso mismo. Un factor importante para la regulación del aprendizaje es la motivación (Schraw, Crippen y Hartley, 2006; Herscovitz, Kaberman, Saar y Dori, 2012) que tengan los individuos, ya que según sea su percepción de la eficiencia que tienen, mayor será su seguridad para involucrarse en tareas complejas y su persistencia aumentará aunque se encuentren con dificultades (Schraw, Crippen y Hartley, 2006).

Por otro lado, al revisar diversos artículos de investigación sobre metacognición, en el ámbito de la Educación en Ciencias, se encontró que la indagación científica interrelaciona los siguientes aspectos: pensamiento crítico; argumentación; generación de preguntas; elaboración y prueba de hipótesis; evaluación y auto reflexión (Schraw, Crippen y Hartley, 2006; Yilmaz-Tüzün y Topcu, 2010; White, Frederiksen, y Collins, 2009; Herscovitz, Kaberman, Saar y Dori, 2012). Además es importante apuntar lo que White, Frederiksen y Collins (2009) señalan: “para involucrarse exitosamente en la indagación científica se requiere desarrollar capacidades metacognitivas” (p. 176).

La indagación científica se entiende como el proceso en el cual, a partir de la teoría se generan preguntas acerca del mundo e hipótesis para responderlas, para ello se debe buscar algún tipo de evidencia que sirva de soporte (Schraw, Crippen, y Hartley, 2006; White, Frederiksen y Collins, 2009). Se postula que este proceso está formado por distintos tipos de meta-conocimiento y habilidades: visualización de la indagación científica como un proceso, el cual mediante la confrontación de argumentos permite el desarrollo y prueba de modelos científicos y teorías; conocimiento acerca de la naturaleza de los modelos y las teorías científicas; plantear preguntas y elaborar hipótesis con la finalidad de evaluar los modelos y las teorías científicas; investigar mediante algún método de investigación, que puede ser inductivo o deductivo, de forma consciente; analizar y representar los datos obtenidos para construir argumentos que confirmen o permitan introducir nuevas hipótesis de investigación, así como la generalización de los resultados; además se debe considerar que es necesario el auto control del proceso de indagación, es decir de los elementos antes mencionados junto con el manejo de los objetivos de la investigación y las estrategias para llevarla a cabo (White, Frederiksen y Collins, 2009).

Es posible lograr la enseñanza de la metacognición en el aula al incorporarla con el conocimiento de las disciplinas científicas (física, química, biología, etc.) de forma explícita y prolongada, para que los estudiantes sean conscientes de lo que se desea que aprendan; también se propone promover el aprendizaje basado en la indagación, la

colaboración en el aula, el uso de discusiones grupales, el uso de modelos, y fomentar la auto regulación en los estudiantes, lo cual puede lograrse si se proveen oportunidades para la reflexión y la auto evaluación, para lo cual es importante brindar a los estudiantes retroalimentación (Veenman, Van Hout-Wolters y Afflerbach, 2006; Schraw, Crippen, y Hartley, 2006; White, Frederiksen y Collins, 2009). La enseñanza de la metacognición en la educación en ciencias es de gran importancia por que promueve la práctica de la indagación científica por parte de los estudiantes, ayuda a mejorar la comprensión tanto de la naturaleza de la ciencia como de los métodos que emplea, además promueve la auto regulación de los estudiantes y los ayuda a desarrollar autonomía (White, Frederiksen y Collins, 2009).

III. 3. SÍNTESIS: MODELIZACIÓN (ARGUMENTACIÓN \leftrightarrow METACOGNICIÓN)

Gracias a la búsqueda bibliográfica y a la síntesis que se realizó en la sección anterior “III. 2.1 *Argumentación y metacognición*”, se cuenta con una fundamentación teórica que permite clarificar lo que es la metacognición y la argumentación. A continuación se presentan dos cuadros que resumen los aspectos más importantes que se considerarán sobre la argumentación y la metacognición, posteriormente se mostrara la propuesta en la que se interrelacionan estos ambos dentro del proceso de modelización.

Los aspectos más importantes acerca de la argumentación se muestran a continuación en la tabla I, los cuales están ordenados de los más concreto (izquierda) a lo más general (derecha), en dicha tabla se toman en cuenta las distinciones hechas entre argumento, argumentación y explicación. De forma análoga se muestran los aspectos más relevantes de la metacognición en la tabla II.

TABLA I. Tamaño promedio de partículas como función de la molienda.

Argumento.	Argumentación.	Explicación.
Recabo de evidencia y datos para soportar las afirmaciones hechas.	Manejo de datos.	Explicar del modo más completo posible los fenómenos naturales. Las explicaciones deben ser consistentes con las evidencias experimentales y con la teoría, éstas se obtienen a partir de los modelos científicos y se construyen en un proceso en el que interviene la comunidad, mediante cuestionamientos y evaluaciones.
Justificaciones que aduzcan la relación entre los datos y las afirmaciones.	Pensamiento reflexivo.	
Respaldo para apoyar ciertas justificaciones.		
Especificar las condiciones bajo las cuales una afirmación se puede tomar como verdadera.	Interviene en procesos metacognitivos.	
Refutaciones para especificar las condiciones cuando una afirmación no se cumple.	Comparar ideas con posturas alternativas.	

TABLA II. Aspectos que resumen a la metacognición.

Metacognición			
Determinación de los objetivos al iniciar una actividad.	Auto regulación del proceso de aprendizaje.	Administración del tiempo.	Motivación

Formulación de preguntas.			
Activación del conocimiento previo.			
Identificar fuentes de información y determinar si son consistentes.	Estrategias de aprendizaje.	Auto monitoreo y evaluación del proceso de aprendizaje.	
Elaboración y prueba de hipótesis.			
Búsqueda de evidencias que sirvan de soporte.			
Construcción y confrontación de argumentos.	Planificación para elegir estrategias.	Auto reflexión.	
Representación de los datos obtenidos.			
Generalización de los resultados.			

A continuación se relacionarán los aspectos de la metacognición y la argumentación resumidos en las tablas I y II con la síntesis que se propuso acerca del proceso de modelización. Para lograr lo anterior se presentará una tabla que sintetiza dicho proceso y sobre ella se indicará que aspecto de la metacognición y la argumentación se pone en juego en la modelización. En el cuadro se denotaran con (M) a los aspectos que pertenecen a la metacognición y con (A) a los que pertenecen a la argumentación.

TABLA III. *Interrelación de la metacognición y argumentación en la modelización.*

Modelización		
(M) Auto regulación, planificación de estrategias, administración del tiempo, auto monitoreo, auto reflexión, motivación.		
(M) Determinación de los objetivos, formulación de preguntas, activación del conocimiento previo,		
Denotación	Demostración	Interpretación
(M) Identificar fuentes de información y determinar si son consistentes.	(M y A) Búsqueda de evidencias que sirvan de soporte a las afirmaciones hechas, justificaciones.	Afirmaciones sobre el fenómeno.
entidades, propiedades, relaciones.	reglas de inferencia	Hipótesis teóricas.
(M) Elaboración y prueba de hipótesis.	(M) Construcción y confrontación de argumentos.	(M) Generalización de los resultados.
(M) Representación de los datos obtenidos. (A) Manejo de datos.	(A) Comparen sus ideas con posturas alternativas.	
(A) Recabo de evidencia y datos para soportar las afirmaciones hechas, justificaciones.	(A) Explicación.	
Condiciones		
(A) Especificar las condiciones bajo las cuales una afirmación se puede tomar como verdadera, refutaciones para especificar las condiciones cuando una afirmación no se cumple.		

Para ejemplificar el uso de la propuesta se elaborará el modelo del siguiente fenómeno: Los muones, cuyo tiempo de vida en reposo es de 2.2×10^{-6} s, se forman a 15 km de altura cuando rayos cósmicos colisionan con átomos de la atmósfera terrestre y al producirse, salen con una velocidad de 0.99 c. Considerando el tiempo de vida de estas

partículas se podría decir que antes de desintegrarse recorren una distancia $d=(0.99c)(2.2 \times 10^{-8} \text{ s})=650 \text{ m}$. Esto nos indicaría que no podríamos detectarlos en la superficie de la Tierra. Sin embargo, se pueden medir gran cantidad de muones a nivel del mar.

Para explicar el fenómeno construimos un modelo donde las *entidades* que participan son: rayos cósmicos, átomos de la atmósfera, muones, detectores.

Las *propiedades* de estas entidades.

- rayos cósmicos: en este punto podemos quedarnos con que son protones con mucha energía que provienen del espacio exterior y que viajan a velocidades cercanas a la velocidad de la luz.
- Átomos de la atmósfera: tienen núcleos formados por protones y neutrones.
- Muon: partícula elemental que tiene la misma carga que un electrón, su masa es 200 veces mayor que la del electrón y es una partícula inestable con tiempo de vida de $2.2 \times 10^{-8} \text{ s}$. Para el modelo sólo nos interesa la última propiedad.
- Detectores: dispositivo que reacciona al paso de los muones, lo cual posibilita la detección de estas partículas.

Las *relaciones* entre las entidades.

- Los rayos cósmicos (compuestos mayormente por protones de gran energía) colisionan con los núcleos atómicos, lo cual da lugar al surgimiento de muchas partículas subatómicas y entre ellas están los muones.
- Los muones recorren los 15,000 km de la atmósfera terrestre y son detectados por los detectores.

Las *reglas de inferencia* son aquellas que nos permiten demostrar resultados del fenómeno que nos interesa representar y explicar.

- Utilizando mecánica clásica se puede inferir que los muones solamente recorrerían una distancia aproximada de 450 m antes de dejar de existir, lo cual de entrada plantea una inconsistencia con la explicación que podría dar la mecánica clásica para dicho fenómeno.
- Dado lo anterior es necesario recurrir a la teoría de la relatividad especial que nos proporciona las transformaciones de Lorentz, con las que es posible “reproducir” las observaciones empíricas que se harían con el detector. La llegada de los muones a la superficie terrestre se da a pesar de que su tiempo de vida ($2.2 \times 10^{-8} \text{ s}$) es menor a los 0.05 s que se calculan, con mecánica clásica, para el recorrido de una partícula que recorre 15,000 km a una velocidad de $0.99c$.
-

Las *condiciones* son aquellas que hacen que el modelo sea válido para ciertas situaciones. En este caso la suposición principal radica en considerar que el fenómeno tiene lugar en sistemas de referencia inerciales, y en los que los campos gravitacionales son despreciables.

Lo anterior sólo expresa el modelo de un fenómeno que se observa en la naturaleza, y no deja ver el proceso en el que se construye y usa (modelización). Además, si quisiéramos enseñar la teoría de la relatividad especial, sería de esperarse que los alumnos no tengan un modelo terminado del fenómeno antes expuesto.

Es ahí donde radica la importancia de la propuesta que sintetiza el proceso de modelización y que se muestra en la tabla III, ya que los alumnos podrían llegar con modelos propios de la mecánica clásica y la meta que se persigue, en un curso de ciencias, es que los alumnos sean capaces de construir un modelo que concuerde con el modelo consensado por la comunidad científica.

Para construir dicho modelo, en el marco de la teoría de la relatividad especial, los alumnos deben determinar los objetivos que se persigue para construir el modelo, también es necesario que identifiquen sus conocimientos previos, elaboren hipótesis, construyan y usen argumentos para discutir con sus compañeros con la finalidad de que revisen sus ideas, comparen posturas alternativas, reflexionen y al final logren dar una explicación del fenómeno que sea consistente a la explicación aceptada por la comunidad científica.

Además, con los aspectos de la tabla III se contempla que los estudiantes desarrollen la habilidad para determinar las condiciones bajo las que el modelo es válido, es decir que conozcan su grado de validez. Con esto es posible que ellos puedan generalizar el modelo a otras situaciones donde se cumplan las mismas condiciones y no lo apliquen a situaciones donde no suceda esto, ya que se obtendrían resultados o predicciones erróneas.

Por lo tanto, la tabla III sirve de guía para desarrollar el proceso de modelización en el aula y permite hacer diseños de estrategias didácticas en las que se trabaje de forma gradual, por medio de actividades planeadas, los aspectos ahí señalados. Dichos aspectos están sustentados en investigaciones previas de distintos ámbitos:

- La visión de modelos nos da una visión epistemológica que nos posibilita visualizar como conocemos, lo que podemos conocer, así como los límites de nuestro conocimiento.
- El esquema de la modelización como proceso para conocer en la ciencia permite que los aspectos de este proceso puedan ser aprendidos y enseñados de forma consciente.
- La argumentación y metacognición son aspectos útiles que posibilitan embonar los dos aspectos anteriores y sirven como articulación para que la modelización se practique como un proceso dinámico en el aula con los estudiantes, para que estos aprendan a modelizar y aprendan las prácticas que se realizan en la ciencia.

IV. CONCLUSIONES

En la sección II. “*Trabajos previos entorno a la enseñanza de la teoría de la relatividad especial*” se expusieron los resultados de investigaciones previas que dejan ver la necesidad de desarrollar propuestas para mejorar la enseñanza de esta teoría. En ese sentido fue que se originó el presente trabajo. Al desarrollar una propuesta en esta línea se encontró otra área de oportunidad en la que contribuir, dado que se hallaron problemas que dificultaron hacer operativo el diseño de una estrategia didáctica para abordar la enseñanza de la teoría de la relatividad especial.

En particular fue necesario hacer precisiones que permitieran caracterizar los modelos y además posibilitaran utilizarlos para el diseño de estrategias didácticas, encaminadas a que los estudiantes construyan modelos cada vez más concordantes con los consensuados por la comunidad científica. Lo anterior hizo ver la necesidad de visualizar el diseño de estrategias didácticas como un proceso dinámico en el que se debe poner en juego la modelización y no solamente la concepción de modelos. Por esa razón se hizo una revisión bibliográfica que sirvió de guía para conceptualizar ese proceso. En dicha revisión se encontró que para desarrollar la modelización se requiere tener otras habilidades que es necesario enseñar a los estudiantes, y por eso fue necesario conjuntar otros dos aspectos de gran importancia, la argumentación y metacognición. Cabe recordar que según Hewson (1982) y Posner (1982) las concepciones de las personas y sus compromisos epistemológicos juegan un papel importante en la construcción de conocimiento, además Posner (1982) afirma que es necesario hacer inteligibles prácticas que se realizan en la ciencia como lo es la búsqueda de una simplicidad lógica para explicar los fenómenos.

Para finalizar, una primera contribución de este trabajo es la síntesis propuesta acerca de lo que es un modelo, la cual permite tener una concepción más precisa de ellos (ver sección III.1). La segunda aportación gira entorno a la síntesis propuesta del proceso de modelización y la conjunción de la argumentación y la metacognición junto con la concepción de modelo en este proceso. Lo anterior queda resumido en la tabla III y los detalles que permiten entender dicha tabla están desarrollados en la sección “III. CONCEPCIÓN DE MODELO Y DE MODELIZACIÓN”. Por último, se debe mencionar que la tabla III permite considerar categorías de análisis para evaluar una estrategia que se diseñe bajo el enfoque de la modelización.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado que permitió la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

Angotti, J. A. P., Caldas, I. L., Delizoicov D., Rüdinger E. (1978). Teaching relativity with a different philosophy. *American Journal of Physics*, 46(12), 1258-1262.

Arriasecq, I., y Greca, I. (2004). Enseñanza de la teoría de la relatividad especial en el ciclo polimodal: dificultades manifestadas por los docentes y textos de uso habitual. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), 211-227.

Arriasecq, I., & Greca, I. M. (2007). Approaches to the teaching of special relativity theory in high school and university textbooks of Argentina. *Science & Education*, 16(1), 65-86.

Arriasecq, I., & Greca, I. M. (2012). A teaching–learning sequence for the special relativity theory at high school level historically and epistemologically contextualized. *Science & Education*, 21(6), 827-851.

Berland, L. K. & Reiser, B. J. (2009). Making sense of argumentation and explanation. *Science Education*, 93(1), 26-55.

Chakravartty, A. (2017). "Scientific Realism". [online] Plato.stanford.edu. Available at: <https://plato.stanford.edu/cgi-bin/encyclopedia/archinfo.cgi?entry=scientific-realism> [Accessed 16 Sep. 2017].

Coll, R. and Lajium, D. (2011). Modeling and the future of science learning. In M. S. Khine & I. M. Saleh (Eds.), *Models and Modeling* (pp. 3-22). Dordrecht: Springer.

Dimitriadi, K., & Halkia, K. (2012). Secondary students' understanding of basic ideas of special relativity. *International Journal of Science Education*, 34(16), 2565-2582.

Driver, R., Newton, P. & Osborne, J. (2000). Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. *Science education*, 84(3), 287-312.

Erduran, S., Simon, S. & Osborne, J. (2004). TAPping into argumentation: Developments in the application of Toulmin's argument pattern for studying science discourse. *Science education*, 88(6), 915-933.

Etxebarria, U., (2000). Enseñanza e investigación. La relatividad especial en el sistema universitario alemán, 1906-1917. *LLULL*, 23 (48), 577-597.

Frigg, R. & Hartmann, S. (2006). Scientific Models. In J. Pfeifer & S. Sarkar (Eds.), *The philosophy of science: An encyclopedia* (pp. 740-749). New York: Routledge.

Frigg, R. and Hartmann, S. (2017). *Models in Science*. [online] Plato.stanford.edu. Available at: <https://plato.stanford.edu/entries/models-science/> [Accessed 16 Sep. 2017].

Giere, R. (1988). *Explaining science, a cognitive approach*. Chicago: The university of Chicago Press.

Gilbert J. K., Boulter., C. & Elmer, R.(2012). Positioning models in science education and in design and technology education. In J. K. Gilbert & C. Boulter (Eds.), *Developing models in science education*. Netherlands: Springer Science & Business Media.

Grotzer, T. & Mittlefehldt, S. (2012). The role of metacognition in students' understanding and transfer of explanatory structures in science. In A. Zohar, Y. J. Dori (Eds.), *Metacognition in science education* (pp. 79-100). New York: Springer.

Guisasola, J., Solbes, J., Barragues J. I., Morentin M., & Moreno, A. (2009). Students' Understanding of the Special Theory of Relativity and Design for a Guided Visit to a Science Museum, *International Journal of Science Education*, 31(15), 2085-2104, DOI: 10.1080/09500690802353536

Gutiérrez, R. (2014). Lo que los profesores de ciencias conocen y necesitan conocer acerca de los modelos: aproximaciones y alternativas. *Bio-grafía*, 7(13), 37-66.

Herscovitz, O., Kaberman, Z., Saar, L. & Dori, Y. (2012). The relationship between metacognition and the ability to pose questions. In A. Zohar, Y. J. Dori (Eds.), *Metacognition in science education* (pp. 165-195). New York: Springer.

Hewson, P. (1982). A Case Study of Conceptual Change in Special Relativity: The Influence of Prior Knowledge in Learning. *European Journal of Science Education*, 4(1), 61-78.

Hughes, R. I. G. (1997), "Models and Representation," *Philosophy of Science* 64 (Proceedings): S325-S336.

Izquierdo-Aymerich, M., Espinet, M., García, M. P., Pujol, R. M. y Sanmartí, N. (1999). Caracterización y fundamentación de la ciencia escolar. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(1), 45-59.

Jiménez-Aleixandre, M. (2007). Designing argumentation learning environments. In S. Erduran, M. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in science education* (pp. 91-116). New York: Springer.

Jiménez-Aleixandre, M. & Erduran, S. (2007). Argumentation in science education. In S. Erduran, M. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in science education* (pp. 3-28). New York: Springer.

Justi, R. & Gilbert, J. K. (2002). Modelling, teachers' view on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4), 369-387.

Ladyshevsky, R. K. (2006). Peer coaching: a constructivist methodology for enhancing critical thinking in postgraduate business education. *Higher Education Research & Development*, 25(1), 67-84.

Larkin, S. (2006). Collaborative group work and individual development of metacognition in the early years. *Research in Science Education*, 36(1-2), 7-27.

Leplin, J. (2006). Realism. In J. Pfeifer & S. Sarkar (Eds.), *The philosophy of science: An encyclopedia* (pp. 686-696). New York: Routledge.

Lloyd, E. (2006). Theories. In J. Pfeifer & S. Sarkar (Eds.), *The philosophy of science: An encyclopedia* (pp. 822-828). New York: Routledge.

- Osborne, J., Erduran, S. & Simon, S. (2004). Enhancing the quality of argumentation in school science. *Journal of research in science teaching*, 41(10), 994-1020.
- Pfeifer, J. & Sarkar, S. (2006). The philosophy of science: an introduction. In J. Pfeifer & S. Sarkar (Eds.), *The philosophy of science: An encyclopedia* (pp. xi-xxvi). New York: Routledge.
- Pietrocola, M. & Zylbersztajn, A. (1999). The use of the Principle of Relativity in the interpretation of phenomena by undergraduate physics students. *International Journal of Science Education*, 21(3), 261-276.
- Posner, G. (1982). Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Sampson, V. & Clark, D. (2009). The impact of collaboration on the outcomes of scientific argumentation. *Science Education*, 93(3), 448-484.
- Schraw, G., Crippen, K. J., & Hartley, K. (2006). Promoting self-regulation in science education: Metacognition as part of a broader perspective on learning. *Research in Science Education*, 36(1-2), 111-139.
- Scherr, R., Shaffer, P. & Vokos, S. (2001). Student understanding of time in special relativity: Simultaneity and reference frames. *American Journal of Physics*, 69(7), 24-35.
- Scherr, R., Shaffer, P. & Vokos, S. (2002). The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity. *American Journal of Physics*, 70(12), 1238-1248.
- Scherr, R. (2007). Modeling student thinking: An example from special relativity. *American Journal of Physics*, 75(3), 272-280.
- Selçuk Sezgin, G. (2011). Addressing pre-service teachers' understandings and difficulties with some core concepts in the special theory of relativity. *European Journal of Physics*, 32, 1-13.
- Veenman, M. V., Van Hout-Wolters, B. H., & Afflerbach, P. (2006). Metacognition and learning: Conceptual and methodological considerations. *Metacognition and learning*, 1(1), 3-14.
- Villani, A. & Pacca, L. A. (1987). Students' spontaneous ideas about the speed of light. *International Journal of Science Education*, 9(1), 55-66
- Villani, A. & Pacca, L. A. (1990). Spontaneous reasoning of graduate students. *International Journal of Science Education*, 12(5), 589-600.
- White, B., Frederiksen, J. & Collins, A. (2009). The interplay of scientific inquiry and metacognition. In D. Hacker, J. Dunlosky & A. Graesser (Eds.), *Handbook of metacognition in education* (pp. 173-205). New York: Routledge.